

APLICACIÓN DEL MODELO PHREEQC PARA ESTIMAR PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS Y CALIDAD QUÍMICA DE AGUA, A PARTIR DE MONITOREO COMUNITARIO.

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniero Ambiental

HELEN NATALY PEREIRA ROMERO

Profesor Guía: Dra. Mariela Yévenes B.

Profesor Co-Guía: Dr. Ricardo Barra

Concepción, Chile

2021

"APLICACIÓN DEL MODELO PHREEQC PARA ESTIMAR PROCESO HIDROGEOQUÍMICOS Y CALIDAD QUÍMICA DE AGUA, A PARTIR DE MONITOREO COMUNITARIO"

PROFESOR GUÍA: DRA. MARIELA YEVENES BURGOS



PROFESOR CO- GUÍA: DR. RICARDO BARRA RÍOS



PROFESOR COMISIÓN: DR. RICARDO FIGUEROA JARA



PROFESOR COMISIÓN: DR. JOSPE ARUMI RIBERA



CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, noviembre 2021

ÍNDICE GENERAL

Índice de Tablas.....	ii
Índice de Figuras.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
RESUMEN.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	6
3. OBJETIVOS	
2.1 Objetivo general	6
2.2 Objetivos específicos.....	6
4. ANTECEDENTES GENERALES.....	7
4.1 Estudios de calidad del agua en Chile.....	7
4.2 Estudio de la hidrogeoquímica del agua subterránea	8
4.3 Evolución del agua subterránea.....	9
4.31 Precipitación y disolución	10
4.32 Intercambio iónico.....	10
4.33 Reacciones de oxidación-reducción.....	11
4.4 Valores Límites de concentración para diferentes elementos considerados porNormas Chilenas e Internacionales.....	12
4.5 Diagrama de piper	13
4.6 Modelación hidrogeoquímica	14
4.7 Modelación hidrogeoquímica con PHREEQC	15
4.71 Estudios hidrogeoquímicos donde se ha utilizado el software PHREEQC....	17
4.8 Ciencia ciudadana.....	19
5. METODOLOGÍA.....	23
5.1 Área de estudio	23
5.2 Clima	24
5.3 Geomorfología.....	24
5.4 Suelo	24
5.5 Geología	25
5.6 Enfoque metodológico.....	27
5.7 Análisis de resultados químicos:.....	28

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
6.1 Geoquímica General.....	35
6.2 Diagrama hidroquímica de Piper.....	43
6.3 Índice de calidad Dirección General de aguas	47
6.4 Índices de equilibrio de especiación y saturación de fases minerales en soluciones	53
6.5 Modelo Hidrogeoquímico Inverso	58
6.6 Monitoreo comunitario.....	64
7. CONCLUSIÓN.....	65
8. SUGERENCIAS:	69
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Intercambiadores iónicos	11
Tabla 2. Valores límites establecidos por las diferentes normas para cada uno de los parámetros descritos en los puntos anteriores.....	12
Tabla 3. Tipos de ciencia ciudadana.....	20
Tabla 4. Descripción de estaciones de muestreo microcuenca Boca Itata.....	30
Tabla 5. Clasificación de los índices de calidad individual (ICi)	33
Tabla 6. Relación entre clases de calidad y valores límites establecidos por diferentes organismos tanto internacionales como nacionales	34
Tabla 7. Criterios para establecer el IC general	34
Tabla 8. Estadística descriptiva de las muestras analizadas en las punteras y pozos de Boca Itata, junto con la comparación de análisis realizados con ayuda de ciencia ciudadana y análisis de laboratorio	40
Tabla 9. Estadística descriptiva estacional.....	42
Tabla 10. Índice de calidad general	52
Tabla 11. Índices de saturación ruta W3-W2 28-04-2017	54
Tabla 12. Índice de saturación ruta W1-W2 17-12-16.....	57
Tabla 13. Resultados de modelo inverso, transferencias molares de los minerales presentes en Boca Itata, ruta W3-W2.....	61
Tabla 14. Resultados de modelo inverso, transferencias molares de los minerales presentes en Boca Itata, ruta W1-W2.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 . Mecanismos de mayor importancia en la composición de las Aguas Subterráneas.....	8
Figura 2. Representación diagrama de Piper	13
Figura 3. Mapa de la zona de estudio, Boca Itata	23
Figura 4. Mapa geológico sector Trehuaco. En esta figura también se incluyen los puntos de muestreo W1, W2, W3 y W4. Datos Cartográficos: Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) Huso 18 Sur, Sistema de Referencia Geodésico: WGS-84.	26
Figura 5. Modelación inversa mediante PHREEQC.....	30
Figura 6. Diagrama de Piper con los datos recogidos en la temporada de invierno .	44
Figura 7. Diagrama de Piper con los datos recogidos en la temporada de otoño	45
Figura 8. Diagrama de Piper con los datos recogidos en la temporada de primavera.	46
Figura 9. Diagrama de Piper con los datos recogidos en la temporada de verano ...	47
Figura 10. Concentración de Cloruros y limites normativos.....	49
Figura 11. Concentraciones de Sulfatos y limites normativos	49
Figura 12. Concentraciones de Calcio y limites normados	50
Figura 13. Concentraciones de Sodio y limites normados	50
Figura 14. Concentraciones de Magnesio y limites normados.....	51
Figura 15. Concentraciones de Nitrato y limites normativos	51
Figura 16. Concentraciones de Arsénico y limites normativo	52
Figura 17. Índice de saturación inicial Punto W3	55
Figura 18. Índice de saturación final Punto W2	55
Figura 19. Índice de saturación inicial Punto W1	58
Figura 20. Índice de saturación inicial Punto W2	58
Figura 21. Mapa geológico sector Trehuaco. En esta figura también se incluyen los puntos de muestreo W1, W2, W3, W4 y los flujos de modelación. Datos Cartográficos: Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) Huso 18 Sur, Sistema de Referencia Geodésico.....	59
Figura 22. Resultados de modelo inverso, transferencias molares de los minerales presentes en Boca Itata, ruta W3-W2.....	61
Figura 23. Resultados de modelo inverso, transferencias molares de los minerales presentes en Boca Itata, ruta W1-W2.....	63
Figura 24. Principales Conclusiones	68

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi familia, en especial a mi madre quien siempre creyó en mí y fue uno de mis más grandes pilares, a mis raíces que fueron la inspiración para desarrollar este largo aprendizaje y a mis amigos quienes siempre estuvieron dándome ánimo, con quienes compartí penas y muchas alegrías, quienes me ayudaron a sobrellevar los momentos difíciles y me apoyaron de diferentes formas. También agradecer a mi profesora guía, Mariela Yévenes que fue una excelente profesora guía, siempre tuvo una respuesta ante mis inquietudes y me brindó su ayuda siempre que la necesite.



RESUMEN

La calidad de agua subterránea es considerada clave para el desarrollo sostenible de las Naciones Unidas para el 2030; pero aun así aparece débilmente estudiada sobre todo en las zonas rurales de Chile central. No obstante, una buena calidad de agua subterránea es la columna vertebral de zonas rurales que se abastecen de este recurso principalmente para consumo y agricultura. En nuestro país, la fuente directa de agua subterránea en zonas rurales ha sido utilizada históricamente a través de pozos, norias y punteras. Pero sin mayor consideración de los procesos hidrogeoquímicos que influyen en la calidad del agua subterránea.

Mediante la modelación hidrogeoquímica inversa se busca identificar estos fenómenos, donde ha sido esencial contar con programas que permitan hacer más eficiente la modelación, uno de ellos es PHREEQC, un modelo hidrogeoquímico robusto en la modelación química de aguas subterráneas. Este programa desarrolla una serie de cálculos hidrogeoquímicos permitiendo de esta forma comprender las reacciones y procesos hidrogeoquímicos del agua subterránea.

Mediante la información recabada tanto por ciencia ciudadana como análisis en laboratorio se ha identificado que la disolución de minerales de carbonato juega un rol fundamental en la composición del agua, puesto que minerales como la Calcita, Dolomita, Yeso y Halita se encontraron en la trayectoria de forma disuelta produciendo un incremento en la concentración de iones mayores. Otros factores que influyen en la composición química del agua es la precipitación de compuestos que contienen Fe^{2+} lo que intensifica los altos niveles de este ion. De acuerdo con el análisis desarrollado con la modelación inversa, en conjunto con el análisis de la geoquímica de la zona, se determinó que de todas las estaciones analizadas el punto W4, presentaría condiciones químicas generales óptimas para la implementación de un sistema de agua potable rural (APR). Además, se identificó la fuerte influencia del agua de mar y los factores antropogénicos que se desarrollan en la zona de estudio, los que tienen una gran influencia en la calidad del agua que utilizan en la zona rural de Boca Itata.

1. INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es un recurso natural valioso que forma parte esencial del ciclo hidrológico y que constituye un tercio (30.1%) del agua dulce del planeta (Tziritis et al., 2016). En la actualidad, al menos la mitad de la población mundial depende del agua subterránea (WWAP, 2019), la cual se distribuye principalmente para uso doméstico (22%), irrigación y ganadería (67%) e industria y minería (11%) (Hatch, 2018). El agua subterránea en una cuenca tiene gran relevancia para complementar los recursos hídricos de superficie cuando están cerca de los límites de la sostenibilidad del ecosistema, por ejemplo, durante periodos de sequía (Baeza, 2020). No obstante, la constante demanda de agua subterránea para diversas actividades humanas y la disminución en la precipitación en la última década, ha impactado negativamente no sólo su cantidad, sino también la calidad del agua. (Barzegar et al., 2018).

La calidad de agua subterránea es considerada clave para el objetivo seis de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas para el año 2030. (United Nations, 2018). Por ello, alcanzar una buena calidad de agua subterránea es primordial para muchas zonas rurales que en la actualidad consumen este recurso sin previo tratamiento (Mahaqi et al., 2018; Naderi Peikam y Jalali, 2016; Rabia et al., 2017). La calidad de agua subterránea depende de una serie de parámetros físicos, químicos o biológicos que ocurren a lo largo del ciclo del agua tanto a factores naturales y antropogénicos. (Rivera-Rodríguez et al., 2019; Witkowski et al., 2018). Dentro de los factores naturales, la interacción entre los minerales y rocas con el agua determinan procesos de descomposición o degradación de los minerales que se encuentran en este sistema. (Li et al., 2010). Otros factores naturales incluyen al clima, las entradas atmosféricas y el tiempo de residencia del agua subterránea. Dentro de los factores antropogénicos los diferentes usos del suelo y actividades humanas que se desarrollan en torno al agua subterránea influyen directamente en su composición final. (Mahaqi et al., 2018). Actividades como la agricultura, la ganadería, actividades industriales, forestales y desarrollo urbano pueden generar

un deterioro significativo de la calidad del agua subterránea. (Abdenmour et al., 2021; Mahaqi et al., 2018; Rivera-Rodríguez et al., 2019). La interacción de estos factores determina en el agua subterránea diferentes procesos como dilución y precipitación de minerales, intercambio catiónico, reacciones de reducción y oxidación (redox) y evaporación. Younes (2012), identificó que la interacción del CO₂ con el sistema de carbonatos del agua subterránea produce un aumento de la alcalinidad del agua. En tanto, Witkowski et al. (2018) determinó que actividades como extracción de minerales de Zn-Pb y la extracción intensiva de agua subterránea para actividades industriales, agrícolas, descargas de aguas residuales municipales e industriales están directamente relacionados con el deterioro de la calidad del agua.

En el caso de Chile, los impactos del uso de suelo y la disminución de las precipitaciones en la última década son un problema latente para comunidades rurales que requieren de agua subterránea a través de pozos, norias y punteras (Delgado et al., 2017). Aproximadamente más de un 40% del volumen total del agua utilizada para consumo humano en zonas urbanas proviene de aguas subterráneas y este número aumenta en las zonas rurales llegando a casi un 76% (Arumí y Oyarzún, 2006; Renaud y Schuster-Wallace, 2017). A pesar de esto, en la actualidad cerca de un 47.2% de los habitantes de sectores rurales del país no cuenta con tratamientos para potabilizar el agua y de ese porcentaje el 58,8% del agua que extraen proviene directamente de pozos o punteras. Desde 1964 se ha buscado dar cobertura de agua potable a estas comunidades, mediante el programa de Agua Potable Rural (APR). Este programa en sus inicios contaba con un 6% de cobertura, para luego en 2018 llegar un 53%, atendiendo a 1.787.916 beneficiarios. (Fundacion Chile, 2018).

Por otra parte, dada la amplitud del territorio chileno, existen innumerables zonas rurales donde no hay registros de datos de calidad de agua, por lo que el conocimiento de la química del agua en zonas rurales ha sido parcialmente cubierto, e impide contar con la información suficiente para conocer la calidad de agua subterránea rural. (Yevenes, 2016). Es aquí donde la ciencia ciudadana o también

denominada ciencia participativa puede tener una función primordial en la generación de datos y de cobertura de estudios de calidad de agua en zonas rurales. (Yevenes, 2016, 2018). La ciencia ciudadana es una ciencia colaborativa entre científicos y voluntarios a través de la participación de ciudadanos en actividades científicas que entrega beneficios tanto para la sociedad como la sociedad científica (Baalbaki et al., 2019; Breuer et al., 2015; Haklay et al., 2018; Miller-Rushing et al., 2012; Paul et al., 2018). A través de la ciencia ciudadana las comunidades participan en procesos de investigación que pueden ayudar a conservar los recursos naturales (Brouwer et al., 2018), pueden identificar los problemas ambientales de una localidad y cogenerar información en conjunto con científicos. (Baalbaki et al., 2019).

Existen diversas iniciativas de ciencia ciudadana relacionadas a la calidad de agua que se han desarrollado para generar información relevante en química ambiental (Brouwer et al., 2018; Paul et al., 2018). Muchas de estas iniciativas han buscado fortalecer la participación activa de los ciudadanos en la toma de muestras ambientales para robustecer la información científica. (Amadori et al., 2020; Baalbaki et al., 2019; Perevochtchikova y Sandoval-Romero, 2020). En Chile, la ciencia ciudadana ha destacado principalmente en áreas como la ornitología (Bustos, 2019; López, 2016; Rozzi et al., 2006). Algunos estudios en el área de la química ambiental han destacado la calidad del agua a partir del desarrollo de monitoreos comunitarios de la calidad de agua a través de talleres y charlas para instruir a los ciudadanos en muestreos efectivos del agua (Amsteins et al., 2013; Brintrup et al., 2019; Rivas et al., 2020). Amsteins et al. (2013), estudió la creciente contaminación de la bahía del lago Panguipulli e incorporó la ciencia ciudadana para buscar alternativas de gestión y participación de los actores locales. Yévenes (2016) comenzó un registro a través de talleres junto con la comunidad costera y rural de Boca Itata para cuantificar parámetros fisicoquímicos básicos en aguas superficiales del río Itata y de los pozos y punteras de la misma comunidad. Brintrup et al. (2019), estudiaron la materia orgánica presente en ríos perenne e intermitentes con la ayuda de estudiantes y la comunidad local. Rivas et al. (2019), investigaron la

disponibilidad, el uso y la calidad del agua en comunidades rurales en la Cordillera de la Costa. Para ello, incorporó el monitoreo comunitario, la recolección de datos cualitativos y cuantitativos por parte de voluntarios.

La generación sistemática de datos entregados por los ciudadanos puede servir para predecir problemas de calidad de agua, a través de la estimación de potenciales escenarios de calidad de agua producidos por la modelación hidrogeoquímica (Buytaert et al., 2014). La modelación hidrogeoquímica es una herramienta muy utilizada y robusta en el análisis de datos de calidad de agua subterránea y se clasifica en modelación directa e inversa. (Barzegar et al., 2018). En el caso de la modelación directa esta tiene como función predecir la composición del agua y las transferencias de masa resultantes de reacciones hipotéticas (Plummer et al., 1992), debido a un conjunto de reacciones químicas conocidas y dada un agua inicial de composición también conocida. (Martinez et al., 2000). La modelación inversa indica los cambios químicos que ocurren a lo largo de una trayectoria de flujo de agua. (Chandrasekar et al., 2019; Dhiman y Keshari, 2006). Esta modelación utiliza un enfoque de balance de masa, para identificar y cuantificar procesos geoquímicos que contribuyen a la composición química del agua, como precipitación o dilución de minerales presentes en el agua. Relativo a esto, en la modelación se describe la composición del agua inicial y final a lo largo de una trayectoria de flujo dentro de un sistema de agua subterránea. (Sharif et al., 2008). Este tipo de modelación es de gran interés en el estudio del agua subterránea, debido al papel importante de los procesos de meteorización de rocas o minerales en la composición química del agua. (Li et al., 2010).

En la modelación inversa existen diversos programas tales como Geochemist'Workbench, NETPATH, PHREEQC para el estudio de la calidad química del agua. No obstante, el modelo hidrogeoquímico PHREEQC cuyo nombre proviene del acrónimo pH-Redox-Equilibrium, creado en 1975, por Parkhust y Appelo, es ampliamente reconocido a nivel mundial por ser robusto en la modelación inversa del agua subterránea. (Abdelshafy et al., 2019; Abdennour et al., 2021; Bécher y Blarasin, 2015; Galli et al., 2013; Li et al., 2010; Mahaqi et al.,

2018; Naderi Peikam y Jalali, 2016). En Chile son escasos los estudios que han utilizado PHREEQC, estos se han realizado especialmente en el norte del país, principalmente relacionados a la especiación química de metales y el origen del agua subterránea. (Gutiérrez et al., 2015; Herrera y Custodio, 2014; Herrera et al., 2006). Sin embargo, en zonas del centro y sur del país los estudios de modelación hidrogeoquímica han sido más reducidos principalmente por la falta de datos de calidad de agua subterránea disponibles.

En consecuencia, la generación de datos químicos de calidad de agua por parte de la comunidad e investigadores puede aportar y cubrir los vacíos de conocimiento relacionados a las zonas rurales de Chile. La información generada por parte de las comunidades puede actuar como la base para la implementación de soluciones para mejorar la calidad del agua en los sectores rurales de nuestro país. Un ejemplo de ello es la comunidad de Boca Itata en la localidad de Trehuaco, región del Ñuble, una comunidad rural donde su principal fuente de suministro de agua corresponde a pozos y punteras. Esta comunidad no cuenta con un sistema de agua potable rural (APR), por lo que no existe conocimiento sobre la calidad del agua que utilizan para consumo diario y riego, ni cuentan un sistema de tratamiento al agua que utilizan, lo cual genera una creciente incertidumbre y preocupación en esta localidad rural. Es por lo que implementar la ciencia ciudadana y la aplicación de modelos hidrogeoquímicos como PHREEQC, les permitiría conocer la calidad del agua que utilizan, a partir de la precipitación o disolución de minerales y de esta forma dar una respuesta a sus inquietudes.

2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

• Al considerar la importante función que cumple la hidrogeoquímica en la composición de las aguas subterráneas y en la calidad del agua de una comunidad rural de Chile Central, se plantea conocer:

¿Cuáles son los procesos hidrogeoquímicos que controlan la calidad química de las aguas subterráneas de la zona rural de Boca Itata, Región del Ñuble?

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Evaluar la calidad del agua subterránea y los procesos hidrogeoquímicos en Boca Itata, región del Ñuble, Chile Central, a través del monitoreo comunitario y la modelación geoquímica PHREEQC.

3.2 Objetivos específicos

- Recabar información sobre la litología y geología de la cuenca baja de Boca Itata a través de revisión bibliográfica y datos obtenidos de monitoreo comunitario de calidad de agua.
- Modelar los procesos hidrogeoquímicos del agua subterránea en la cuenca baja de Boca Itata, utilizando el Software PHREEQC.
- Identificar las reacciones geoquímicas en solución que controlan la química del agua subterránea para transmitir la información a la comunidad.

4. ANTECEDENTES GENERALES

4.1 Estudios de calidad del agua en Chile

Diferentes estudios relacionados al agua subterránea en Chile tienen como finalidad conocer que tan segura es el agua para ser usada tanto para consumo humano como para riego. Herrera Apablaza et al. (2018) estudió en el norte del país, específicamente en el sector el Oasis de Pica, la calidad del agua subterránea, para determinar si esta es óptima para su utilización como agua para riego, junto con la caracterización de las propiedades fisicoquímicas de la zona. (Herrera Apablaza et al., 2018). En el norte de Chile, específicamente en las costas de la región de Tarapacá, se identificó la calidad del agua subterránea y se determinó, dada la alta alcalinidad y salinidad de la zona, problemas de incrustaciones calcáreas, además de un aumento en la tendencia de corrosión, producto de la concentración de sulfatos y cloruros. (Herrera et al., 2019). En las provincias de Valdivia, Osorno y Llanquihue, Nissen M. et al. (2000) evaluaron el uso de agua subterránea extraída a través de pozos como potable, para bebida animal y riego, basado en la normativa chilena (Nch 409; Nch 1333) y determinó que la calidad del agua sólo era apta para riego. Al igual en la región del Biobío se llevó a cabo la investigación hidrogeoquímica de las aguas subterráneas y superficiales, asociadas a la cuenca hidrográfica del río Claro en Yumbel, Región del Biobío, donde se determinó que las aguas analizadas se podían clasificar como bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas magnésicas, lo que implica que son aguas de recarga, que presentan poco tiempo de residencia. Junto con ello se determinó que las aguas subterráneas eran aptas para el consumo y, también, pueden utilizarse en faenas de regadío. (González et al., 1999). Arumí y Oyarzún (2006), determinaron el grado de contaminación de pozos de suministro de agua potable rural, donde se analizaron datos de concentraciones de nitrato de diferentes pozos, en los que se demostró que un 14% de los pozos estudiados presentó una superación de los niveles permitidos por la normativa chilena. Otro estudio realizado en la región del Biobío, por parte del Departamento de Conservación y Protección de Recursos

Hídricos ((DCPRH), 2019) de la Dirección General de aguas (DGA), en donde se identificó el estado de la calidad del agua en las zonas costeras de la región del Biobío y la actual región de Ñuble, e identificaron los principales iones presentes en el agua subterránea; pero sin dar mayor relevancia a la hidrogeoquímica de la zona y su interacción con el agua.

4.2 Estudio de la hidrogeoquímica del agua subterránea

En la figura 1, se pueden observar los mecanismos y propiedades geoquímicas que controlan el comportamiento de los constituyentes disueltos de las aguas subterráneas.

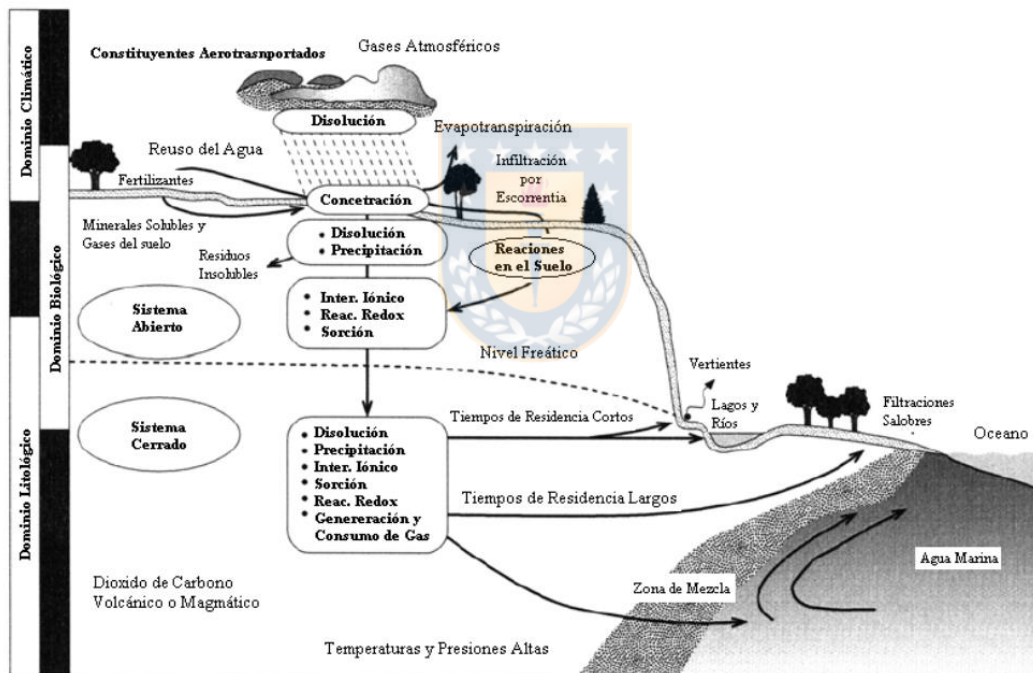


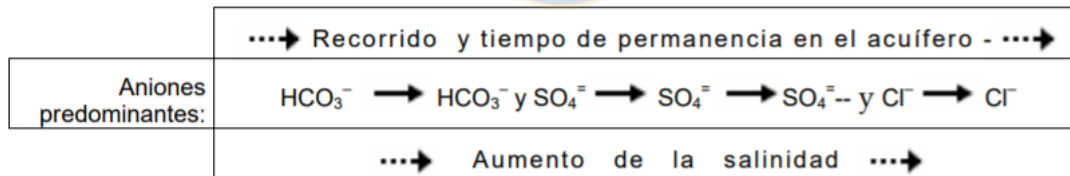
Figura 1 . Mecanismos de mayor importancia en la composición de las Aguas Subterráneas.

Fuente: Elaborado por (Aguilera et al., 2010) basado en Kovalevsky, Kruseman, y Rushton.

4.3 Evolución del agua subterránea

El agua subterránea se ve influenciada por una serie de procesos, que generan cambios en la calidad y composición química del agua, esto se puede desarrollar en cortos periodos de tiempo, como días, o puede ser de largos periodos de tiempos como miles de años, también el recorrido del agua subterránea puede ser de largos kilómetros o pocos metros, lo cual influye directamente en su composición. (Aguilera et al., 2010; Sánchez, 2012). Además, otros procesos como el contacto con los minerales y la duración de ese contacto definen el tipo y calidad del agua subterránea. (Daniele et al., 2013).

De acuerdo con Freeze y Cherry (1979), definen como regla general, que mientras mayor es el tiempo de residencia del agua subterránea, esta presentará una mayor salinidad, lo que va a depender de la presencia de cloruro sódico en contacto con el agua. Al igual que si el agua presenta cortos periodos de residencia, se espera que presenten una composición bicarbonatada. A esto se le denomina secuencia de Chebotarev:



Para los principales cationes la norma sería $\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Na}^+$; pero existen mayores controversias al respecto.

Esta secuencia se basa principalmente en dos causas, la solubilidad y la abundancia de los distintos minerales o sales presentes en el terreno. Esto se debe a que la solubilidad varía en las diferentes especies que se encuentran en contacto con el agua, por consiguiente, la solubilidad de los carbonatos es mucho menor que la de los sulfatos y los cloruros, por lo tanto, los carbonatos logran con mayor facilidad, que los otros iones presentes, alcanzar su máxima solubilidad. Otra causa

importante es la abundancia de los minerales que presenten dichos iones, es decir, carbonatos, sulfatos o cloruros, ya que si existiera una fuente directa de cualquiera de estos iones implicaría una mayor presencia de estos en el agua y sería una excepción a la secuencia de Chebotarev. Pero como muchas veces esta no es la realidad que presentan los acuíferos, los mayores aportes son las sales carbonatadas, que se obtienen por medio del CO₂ del suelo o de minerales como la calcita. Luego se presentan en mayor proporción los sulfatos, provenientes de minerales como el yeso y por último las sales cloruradas que son las que se encuentran en menores proporciones.

4.31 Precipitación y disolución

La precipitación o disolución se produce debido a un desequilibrio en las reacciones en ambos sentidos de la ecuación, por lo cual utilizar los índices de saturación permiten saber si una reacción se encuentra en equilibrio o si se encuentra por sobre o por debajo del equilibrio, para ello se desarrolla la siguiente ecuación:

$$IS = \frac{Q}{k_{eq}}, Q = \frac{[B]^b [C]^c}{[D]^d [E]^e}$$

Donde b, c, d y e representan el número de moles de los constituyentes químicos B, C, D y E respectivamente. Si $IS > 1$, el agua contiene un exceso de iones constituyentes por lo que la reacción tendería a equilibrarse hacia la izquierda, generando precipitación mineral, en cambio si $IS < 1$, la reacción tendería hacia la derecha, generando disolución mineral; si $IS = 1$, la reacción está en equilibrio, lo que significa que el agua se encuentra saturada con respecto al mineral en cuestión.

4.32 Intercambio iónico

Custodio y Llamas (1976), describen al intercambio iónico como diversas sustancias sólidas que se encuentran en la naturaleza en estado electrónicamente desequilibradas, por lo que al encontrarse con iones con cargas opuestas a la que presentan estas sustancias y al rodearse de estos iones se produce la neutralidad.

Los iones retenidos lo están muy débilmente y al entrar en contacto con una disolución acuosa pueden ser reemplazados, valencia a valencia, por otros iones del mismo signo.

Naturalmente existen muchos minerales con la capacidad de intercambio iónico, siendo el grupo de las arcillas las que presentan esta característica más acentuada. A continuación, una tabla donde se muestran algunas especies con esta capacidad:

Tabla 1. Intercambiadores iónicos.

Intercambiadores Catiónicos	Arcillas: Caolinita, halloisita, montmorillonita, illita, vermiculita, entre otras. Otros: ácidos húmicos, turba y lignito, madera, etc.
Intercambiadores Aniónicos	Arcilla: alúmina

Fuente: Custodio y Llamas, 1976.

Como se puede observar existen muchas más sustancias catiónicas con la capacidad de intercambio iónico y mientras estos materiales se encuentren en mayor estado de división, mayor es la facilidad y rapidez con que se realiza el intercambio iónico, siendo máximo cuando se encuentran en estado coloidal. Además, la retención de estos iones no es igual en todos los casos, siendo mayor la retención cuanto mayor sea su carga eléctrica. (Alves, 2021).

4.33 Reacciones de oxidación-reducción

Numerosos elementos poseen diversos estados de oxidación a los que van ligadas propiedades características de cambios de solubilidad en el momento de formar compuestos. Reacciones en que se producen cambios en el estado de oxidación pueden facilitar entonces la solubilización de diferentes elementos. (Freeze y Cherry, 1979).

4.4 Valores Límites de concentración para diferentes elementos considerados por Normas Chilenas e Internacionales.

En Chile existen diversas normativas que regulan diferentes parámetros característicos del agua, para sus diferentes usos. Entre las normativas asociadas a la calidad del agua en Chile se destacan las siguientes:

Nch. 1333/78: Norma de Calidad del agua para diferentes usos: Riego, Vida Acuática, Agua como Bebida Animal, Uso Recreativo y Estética.

Nch. 409/2004: Norma de calidad de agua Potable D.S. N.º 46: Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas.

D.S. N.º 46: Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas.

Tabla 2. Valores límites establecidos por las diferentes normas para cada uno de los parámetros descritos en los puntos anteriores.

Parámetros	Unidades	Chile						Internacional
		Nch 409/2004	Nch 1333			D.S. N.º 46		OMS
			Bebida Humanos	Bebida Animal	Riego	V. Baja	V. Media	
Olor	-	Inolora	Inolora	Inolora	-			Aceptable
Sabor	-	Insípida	Insípida	Insípida	-			Aceptable
pH	-	[6,5-8,5]	[6,5-8,5]	[6,5-8,5]	[5,5-9,0]	[6,5-9,5]	[6,5-9,5]	[6,0-8,0]
SDT	mg/l	1500	1500	1500	-	-	-	1000
Mg^{2+}	mg/l	125	125	125	-	-	-	-
NO_3^-	mg/l	50	50	50	-			50
Fe^{2+}	mg/l	0,3	0,3	0,3	5	10	5	0,4
Cl^-	mg/l	400	400	-	200	250	250	-
SO_4^{2-}	mg/l	500	500	500	250	500	250	400

Fuente: ((DCPRH), 2019).

Los parámetros que comúnmente se analizan en estudios hidrogeoquímicos son los iones denominados como mayoritarios o fundamentales que incluyen aniones como Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , y cationes como Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} . En algunos casos también se analizan los iones minoritarios, que se encuentran formando menos del 1% del contenido iónico total. Pueden mencionarse NO_3^- , CO_3^{2-} , K^+ , Fe^{2+} , NO^- , F^- , NH_4^+ . Los iones NO_3^- , CO_3^{2-} y K^+ pueden considerarse como mayoritarios en algunos casos. (Bustamante, 2017).

4.5 Diagrama de piper

- En general, el estudio de la hidrogeoquímica de aguas subterráneas está enfocada principalmente a la identificación de los tipos de aguas a través de diagramas como Piper, Stiff, Durov, Schoeller y de dispersión etc. (Abdelshafy et al., 2019; Naderi Peikam y Jalali, 2016; Rabia et al., 2017). Dentro de los más utilizados se encuentran los diagramas de Piper o Stiff, que proporcionan un método conveniente para clasificar y comparar tipos de agua mediante el conocimiento de la composición iónica de diferentes muestras de agua. (Mahaqi et al., 2018). Los diagramas de piper presentan una forma triangular que representan la proporción de iones mayores presentes en el agua.

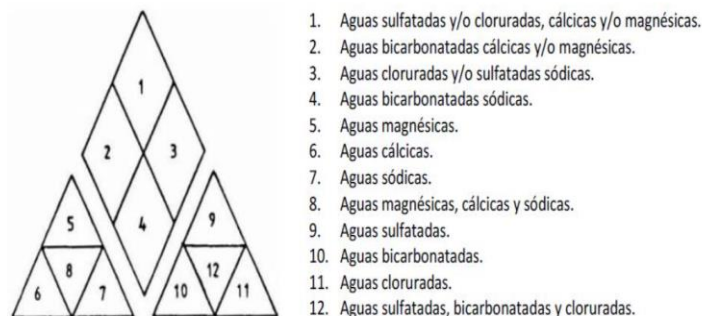


Figura 2. Representación diagrama de Piper.

Fuente: Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos ((DCPRH)).

4.6 Modelación hidrogeoquímica

Una herramienta importante en la evaluación de estudios hidrogeoquímicos es la modelación hidrogeoquímica, que ha sido identificada como una herramienta eficaz para explorar la química de las aguas subterráneas y estimar procesos hidrogeoquímicos, que dan como resultado la composición química del agua. (Abdelshafy et al., 2019). Este tipo de modelación cuenta con una rama específica denominada modelación inversa, donde se utiliza un enfoque de balance de masa para determinar la cantidad de reacción y la composición química del agua subterránea después de su interacción con la roca a lo largo de un gradiente. (Li et al., 2010).

Este tipo de modelación se basa en principios fisicoquímicos que se aplican para la identificación del origen y funcionamiento de los sistemas hidrogeológicos, esto mediante la construcción teórica y conceptual de modelos que engloba el conjunto de reacciones termodinámicas, las cuales, son responsables de la composición química del agua subterránea (Mahaqi et al., 2018). Permite cuantificar las fases de reacción gaseosa, mineralógica y acuosa en cantidades apropiadas a fin de determinar las diferencias entre los productos inicial y final. (Parkhurst y Appelo, 1999).

La solidez de los resultados, esta modelación depende de la conceptualización válida del sistema, la validez de los conceptos y principios básicos, la precisión de los datos de entrada y el nivel de comprensión de la litología del área a estudiar. Es necesario contar con información litológica y geológica, patrones generales de evolución hidroquímica, índices de saturación y diagramas de estabilidad mineral para restringir los modelos inversos. (Rabia et al., 2017).

4.7 Modelación hidrogeoquímica con PHREEQC

Para realizar análisis de los diferentes procesos que ocurren en las aguas subterráneas y desarrollar modelos hidrogeoquímicos, es necesario contar con un programa hidrogeoquímico como PHREEQC, el cual permite optimizar tiempos y facilita los cálculos matemáticos. PHREEQC es un modelo hidrogeoquímico robusto en la modelación química de aguas subterráneas. Derivado de las iniciales pH-Redox-Equilibrium, debido a que este software originalmente incluía funcionalidades basadas en el cálculo de equilibrios químicos en soluciones acuosas.

Este modelo fue creado por Parkhurst y Appelo cerca del año 1975 y con el tiempo ha adquirido más características y propiedades. (Lozada, 2018). PHREEQC es un programa que permite el cálculo de equilibrio entre agua y minerales, intercambiadores de iones, complejos de superficie, soluciones sólidas y gases. La formulación cinética general permite modelar la disolución y precipitación de minerales en desequilibrio, reacciones microbianas, descomposición de compuestos orgánicos y otras reacciones cinéticas. Además, permite modelar transporte reactivo en una dimensión (1D), e incluye procesos como la difusión de múltiples componentes y el transporte de especies químicas.

Con este software se puede realizar modelación inversa para hacer una aproximación del balance de masas de las reacciones en el agua. (Parkhurst y Appelo, 1999). Dada la facilidad en su uso, PHREEQC se ha integrado como módulo de cálculo geoquímico en varios programas. (Charlton y Parkhurst, 2011). Otra de las ventajas que presenta este programa es la capacidad de incluir incertidumbres en los datos analíticos que se utilizan en el cálculo de modelos inversos. Esta capacidad produce modelos inversos más robustos que son menos susceptibles a grandes diferencias en los resultados, debido a pequeños cambios en los datos de entrada. (Parkhurst y Appelo, 2013).

En sus inicios el software utilizaba un lenguaje de programación Fortran, donde se podían realizar operaciones básicas, provenientes de la mezcla de aguas, la adición

de reacciones irreversibles, la disolución y precipitación de fases minerales en la fase acuosa y soportando los efectos en el cambio de temperatura. Para el año 1995, el programa cambió a lenguaje de programación C, que se conserva hasta la actualidad. Además, se incorporaron nuevas funciones de equilibrio como: el intercambio iónico, de complejización de superficies y de gases a presiones preestablecidas, además del transporte advectivo y la modelación geoquímica inversa.

Actualmente la versión que se utiliza es PHREEQC3, la cual incluye mejoras en el código de programación, base de datos y contiene módulos adicionales que permiten la creación de gráficos que como herramienta brindan una mejor demostración de resultados (Gidahatari,2017). Este software también permite desarrollar modelaciones tanto directas como inversas.

Algunos modelos que se pueden desarrollar con PHREEQC son los siguientes:

Modelos de especiación y solubilidad: Calculan las especies acuosas y determinan el estado de saturación de las soluciones, calculan la partición de un elemento entre las diferentes especies acuosas y complejos para determinar el estado de saturación en la solución.

Modelos de balance de masa: Permite definir la masa neta de minerales o gases, tanto disueltos como precipitados a lo largo de un gradiente.

Código de transporte de masa química: Permiten obtener un primer acercamiento de la evolución química del agua y las relaciones en modelos de masas acoplados con los flujos hidrodinámicos.

Además de PHREEQC es necesario utilizar una interfaz llamada Notepad. Este editor es hasta ahora la única Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) que orienta el ingreso y escritura de datos para construir archivos con la versión 3 de PHREEQC, junto con la lectura de los datos de salida. (Parkhurst y Appelo, 2013).

4.71 Estudios hidrogeoquímicos donde se ha utilizado el software PHREEQC

El programa PHREEQC ha sido ampliamente utilizado para análisis hidrogeoquímico del agua subterránea. (Abdelshafy et al., 2019; Li et al., 2010; Mahaqi et al., 2018; Naderi Peikam y Jalali, 2016). Peikan y Jalali (2016) realizó estudios de la evolución de la química del agua superficial en la cuenca hidrográfica de Ekbatan, Irán occidental, mediante análisis estadístico multivariado y modelado geoquímico inverso, donde fue posible describir como la química del agua cambió de modo que las aguas con composición de Ca-HCO₃ y Mg-Cl llegaron a ser del tipo Mg-Cl-HCO₃ a lo largo de la trayectoria de flujo. Barzegar et al. (2018) desarrolló el análisis de la hidrogeoquímica, la llanura de Khoi al noreste de Irán, por medio de PHREEQC, tomando en consideración los siguientes supuestos: los puntos iniciales y finales siguen una misma vía de flujo o trayectoria. Este estudio demostró que los procesos más importantes que afectan la calidad del agua subterránea en esta zona son la meteorización y la disolución de minerales evaporíticos, la mezcla y el intercambio iónico. Por otra parte, Li et al. (2010) en el área de la llanura sur del condado de Pengyang, China, llevó a cabo el análisis de la evolución hidroquímica del agua subterránea y de los mecanismos de formación de ésta. Este estudio, se desarrolló mediante técnicas estadísticas como el análisis de conglomerados, junto con la modelización geoquímica inversa del agua subterránea con PHREEQC, donde se determinó que a lo largo de la trayectoria de flujo el agua subterránea tuvo una variación en cuanto a su composición pasando del tipo Ca-HCO₃ y Mg-Cl al tipo Mg-Cl-HCO₃. Además, mediante la modelación inversa se identificó la disolución de Silvita y Caolinita, junto con la precipitación de feldspatos y andalucita lo que se debe principalmente al intercambio de cationes entre Na⁺ y Ca²⁺. Ibrahim (2019) buscó investigar y evaluar los principales factores que afectan la calidad del agua subterránea, en Safaga y El Qesir, utilizando métodos geoquímicos convencionales y los métodos modernos, en donde se logró demostrar que gran porcentaje del agua de la zona de estudio correspondía a agua salobre y que los altos niveles de salinidad en la zona se deben principalmente a la evaporación, insuficiente recarga de los acuíferos y la lixiviación de algunas sales

solubles encontradas dentro del acuífero. Mediante la modelación con PHREEQC se determinó que el agua se encontraba saturada con minerales de carbonato como aragonita, calcita y dolomita, por otro lado, también se identificó que minerales como la anhidrita se encuentran subsaturados y minerales como el yeso se encuentran sobresaturados lo que en el caso de este último mineral indica que ya no es posible que exista mayor disolución de él. Abdelshafy et al. (2019), determinó las características hidrogeoquímicas de los acuíferos subterráneos de Sohag, Egipto, en función de las propiedades fisicoquímicas de la zona, para comprender las interacciones entre rocas y agua. En este estudio se llevó a cabo un análisis de la idoneidad del agua subterránea para beber y para usos domésticos de acuerdo con las normas de la Organización Mundial de la Salud (OMS), determinándose que la mayoría de las muestras no son aptas para consumo humano, ya que se sobrepasan los niveles permitidos. Este estudio también determina que la mayoría de los parámetros hidrogeoquímicos se correlación positiva con el ion HCO_3^- lo cual indica numerosos procesos como la interacción agua-roca, el intercambio iónico y meteorización de la roca madre del acuífero. En relación con el programa PHREEQC en este estudio se determinó que la mayoría de las muestras se encuentran sobresaturadas con minerales de carbonato y por el contrario la halita se encuentra bajo la saturación, por lo tanto, presenta un proceso de disolución.

Galli (2013) a través del uso de PHREEQC logró identificar los procesos hidrogeoquímicos presentes en las aguas subterráneas de la cuenca de la laguna Mar Chiquita en Argentina, laguna de importancia considerada como reservas MAB (Man and the Biosphere), reconocida por la UNESCO. Lecomte et al. (2011), desarrolló un estudio de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas de la Sierra de Córdoba, donde se evidencia la disolución y/o hidrólisis de minerales primarios presentes en las rocas como los principales procesos que explican la evolución química del agua en esta cuenca. Otro estudio realizado en Argentina por Bécher y Blarasin (2015), buscó realizar una caracterización hidrodinámica e hidrogeoquímica de las relaciones entre el agua superficial y subterránea en el sur de Córdoba. Junto con ello se realizó la simulación de posibles mezclas y evolución

geoquímica del agua, mediante modelación numérica inversa para validar el modelo hidrogeológico utilizando el programa PHREEQC.

En Chile se han desarrollado diversos estudios para determinar la calidad de agua (Arumí y Oyarzún, 2006; González et al., 1999; González et al., 2000; Herrera et al., 2006; Herrera et al., 2019) y en algunas investigaciones para el estudio de la calidad de las aguas subterráneas en el norte del país, se ha utilizado el modelo PHREEQC (Gutiérrez et al., 2015; Herrera y Custodio, 2014; Herrera et al., 2006). Herrera y Custodio (2014) llevaron a cabo el estudio de manantiales localizados en la zona costera de Antofagasta, en donde se calcularon los índices de saturación mineral utilizando el código informático PHREEQC. También en la zona altiplánica del norte de Chile, Herrera et al. (2006), desarrollaron un análisis de las aguas subterráneas y superficiales del lago Chungará y lagunas de Cotacotani y mediante el programa PHREEQC, se realizó la modelación de la mezcla de agua subterránea y el agua superficial del lago Chungará. (Herrera et al., 2006). Gutiérrez et al. (2015) por medio de la modelación con PHREEQC estudio la interacción de agua con la mineralogía de la zona de la cuenca alta del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca, e identificaron que los minerales alunita, la jarosita y los óxidos de Fe estarían controlando las características observadas en el agua de la zona. (Gutiérrez et al., 2015).

4.8 Ciencia ciudadana

Como se muestra anteriormente, desarrollar estudios de modelación hidrogeoquímica en zonas rurales representa un gran desafío, dado que es una ardua tarea poder contar con los datos suficientes de las propiedades fisicoquímicas y datos hidrogeoquímicos que presenta el agua subterránea de la zona que se desea estudiar. Por ello la ciencia ciudadana o también denominada participativa podría llegar a ser de gran ayuda en la recolección de información. La ciencia ciudadana es la participación de voluntarios ciudadanos en interacción con investigadores en diferentes etapas dentro del proceso de investigación científica

como la recolección, categorización, transcripción o análisis de datos científicos. (Bonney et al., 2009). A través de la ciencia ciudadana se puede realizar el diseño, ejecución, recopilación, e interpretación de datos por parte de los mismos ciudadanos, junto con el intercambio de conocimientos y análisis en conjunto con los científicos. La ciencia ciudadana o ciencia participativa puede ser clasificada como contributiva, colaborativa y co-creada. A continuación, una tabla con siguientes características:

Tabla 3. Tipos de ciencia ciudadana.

Contributiva	Generalmente diseñados por científicos y donde los miembros del público contribuyen principalmente con datos; también incluye estudios en los que los científicos analizan las observaciones de los ciudadanos, como las de las revistas u otros registros.
Colaboración	Generalmente diseñados por científicos y para los que los miembros del público aportan datos; pero también pueden ayudar a perfeccionar el diseño del proyecto, analizar los datos o difundir los resultados.
Co-creada	Diseñada por científicos y miembros del público que trabajan juntos y en la que al menos algunos de los participantes del público participan activamente en la mayoría o en todas las etapas del proceso científico; también incluye la investigación concebida y realizada en su totalidad por científicos aficionados. (no profesionales).

Fuente: "The history of public participation in ecological research", Miller-Rushing, A., Primack, R. y Bonney, R. (2012)

Algunas plataformas en donde se ha destacado la ciencia ciudadana son ebird, inaturalist, eyesonwater o el Fondo de información global sobre biodiversidad (GBIF) entre otros (Rivas et al., 2020; Tejeda y Medrano, 2018). Sin embargo, aún en ramas de la ciencia que requieren mayores conocimientos técnicos, como la hidrología, geología o la calidad del agua este proceso ha sido mucho más lento, pues se debe

contar con conocimientos previos para poder realizar muestreos efectivos y realizar capacitaciones, talleres o charlas para instruir a los ciudadanos en estos temas más complejos. (Njue et al., 2019; Paul et al., 2018).

Actualmente la ciencia ciudadana ha tenido avances con relación a la comunicación y la transferencia de información, producto del desarrollo tecnológico, que facilita la gestión y el análisis de datos (Miller-Rushing et al., 2012). Esto debido a la facilidad con los teléfonos inteligentes que permiten desarrollar la comunicación de forma directa y transmitir la información mucho más rápido. (Meier et al., 2015). Mayor acceso a internet y los equipos de detección de bajo costo han generado nuevas oportunidades para desarrollar la ciencia ciudadana, como ampliar la base de datos meteorológicos o la gran variedad de aplicaciones informativas que presentan los teléfonos inteligentes que son simples de usar y que permiten informar y hacer parte a la población en la ciencia. (Njue et al., 2019). No obstante, a pesar de los avances que se han presentado en la ciencia ciudadana, existen grandes desafíos que se deben superar, como integrar los datos recolectados por los voluntarios en una base de datos amplia que permita mejorar la escasez de información. (Nerbonne y Nelson, 2004). Otra inquietud que se debe enfrentar es la necesidad de contar con redes más densas de monitoreo que permitan obtener una mayor resolución temporal y espacial, para contar con evidencia sobre las condiciones en que se encuentran los ecosistemas naturales. (Buytaert et al., 2014). Sin embargo, una errónea interpretación de los datos es donde se debe poner mayor atención, dado que es uno de los principales desafíos asociados a esta ciencia (Brouwer et al., 2018), es por ello que la validación y calibración de los datos analizados es esencial.

Hoy en día los proyectos que implementan la ciencia ciudadana han crecido en número, escala y alcance, siendo en los campos de la vigilancia ambiental y la salud donde se ha desarrollado más esta rama de la ciencia. (Dickinson et al., 2012). El estudio del agua es uno de los procesos que engloba estos campos, debido a que es fundamental en el desarrollo de la vida de las personas y en mejorar su calidad de vida. Aplicar este tipo de estudios representa una opción de mejora en la recolección de datos o parámetros que permiten determinar la calidad del agua que

utilizan las personas y poder comunicar los conocimientos que se extraen del análisis de estos datos de parte de científicos o expertos en estos temas. (Nerbonne y Nelson, 2004). Contar con mayor cantidad de datos hidrológicos, hidrogeoquímicos y fisicoquímicos permite determinar las características del agua que se está utilizando, generar proyecciones futuras basadas en modelos, incluso determinar medidas de mitigación o brindar información relevante para la toma de decisiones sobre estos temas. (Tetzlaff et al., 2017).

Diferentes estudios han desarrollado la ciencia ciudadana y han aplicado un enfoque colaborativo que involucra a ciudadanos locales e investigadores para evaluar la calidad del agua subterránea. (Amadori et al., 2020; Baalbaki et al., 2019; Perevochtchikova y Sandoval-Romero, 2020). Amadori et al. (2020) mediante el conocimiento local buscó identificar las corrientes superficiales y los patrones de transporte en el lago de Garda, Italia, por medio de entrevistas a actores locales. Perevochtchikova y Sandoval-Romero (2020), presentaron la experiencia de Monitoreo Comunitario Participativo (MCP) del agua en una comunidad forestal de la periferia suroeste de la Ciudad de México, donde identificaron los principales iones que caracterizaban la calidad de agua de la localidad.

5. METODOLOGÍA

5.1 Área de estudio

El área de estudio está situada en el sector costero de Boca Itata que corresponde a la comuna de Trehuaco, Región del Ñuble y forma parte del valle de Itata. Esta comuna está ubicada al norte del río Itata, entre los paralelos $36^{\circ} 22' 40''$ de latitud sur y $72^{\circ} 52' 0''$ de longitud oeste (Figura 3). Boca Itata es una zona rural que posee una superficie aproximada de 50 km² y una población de 150 habitantes aproximadamente. El uso del agua subterránea en esta zona se dispone principalmente entre riego, agua potable, uso industrial.

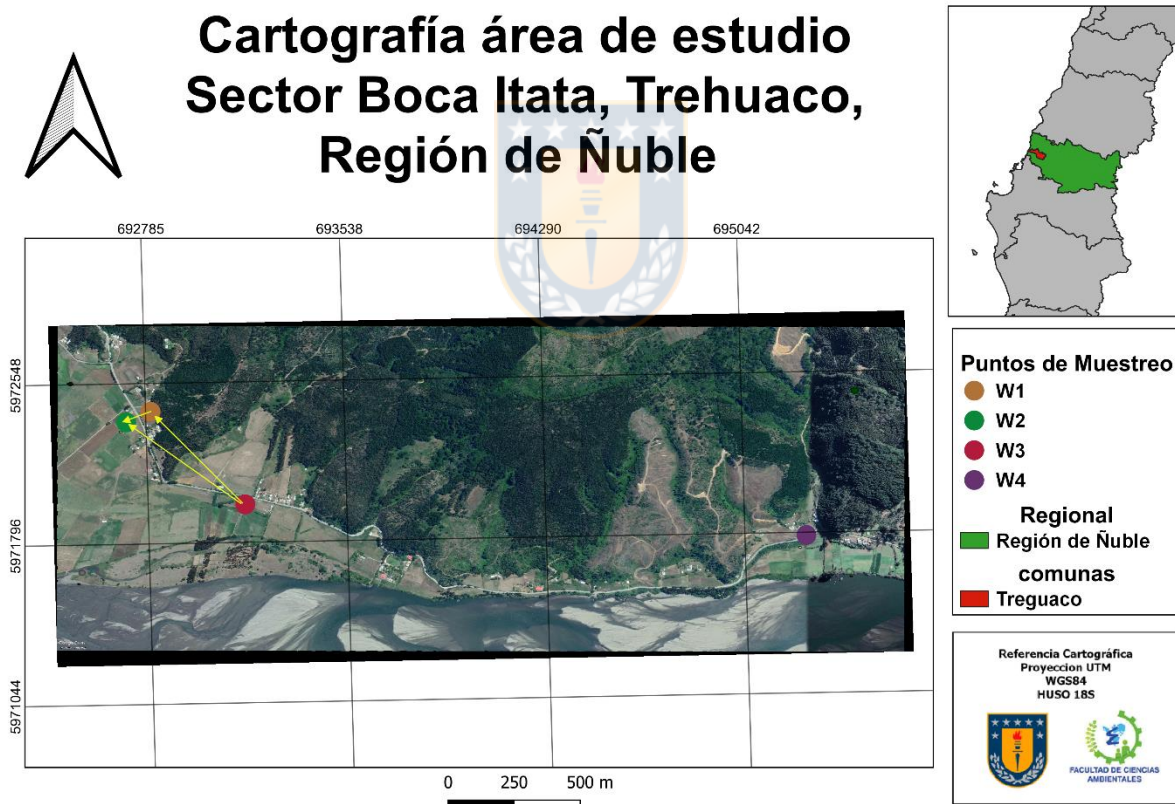


Figura 3. Mapa de la zona de estudio, Boca Itata.
Fuente: Elaboración propia en QGIS con datos de Google Earth.

5.2 Clima

Se caracteriza por poseer diferentes unidades de relieve dentro de las cuales está la franja litoral de poca amplitud, ladera de la costa con alturas relativamente bajas y la cuenca interior o depresión intermedia. La comuna se encuentra bajo el dominio de clima templado mediterráneo, una pluviometría cercana a los 1000mm anuales. (www.explorador CR2), concentrados en los meses de abril a septiembre. Su clima se caracteriza por veranos muy secos y calurosos durante el día; pero con muy altas diferencias en la noche donde la temperatura cae fuertemente, lo cual es favorable para praderas, cultivos y algunos frutales; pero desfavorable para cultivos sensibles a heladas invernales de comienzo de primavera PLADECO Trehuaco, 2011).

5.3 Geomorfología

Además, la zona del valle del Itata presenta un tipo de suelo denominado serie Cobquecura que se caracteriza por poseer suelo profundo, sedimentario, de textura franco arcillo limosa en superficie y texturas arcillo limosa a franco arcillo limosa en profundidad (Consulting regional group, 2016). Que se encuentra sobre un substrato constituido por sedimentos marinos. Ocupa una posición de terraza marina de topografía suavemente ondulada a ondulada y disectada por quebradas que bajan desde la parte alta de la Cordillera de la Costa. Su suelo es de permeabilidad moderada a lenta, con buena capacidad de retención de agua, bien estructurada, de buena actividad biológica y desarrollo de raíces. (Ministerio de Agricultura, 2019).

5.4 Suelo

Hacia el sector litoral de la comuna, se localizan suelos de praderas costeras sobre terrazas marinas, muy desarrollados, debido a la existencia de mayor humedad y precipitaciones. Hacia el sector de la Cordillera de la Costa, se desarrollan suelos pardo-forestales que han evolucionado sobre rocas graníticas y pizarras metamórficas. Estos suelos se denominan suelos pardo-rojizos lateríticos y su

principal uso es la forestación. Sin embargo, son muy susceptibles a la erosión. (GORE Biobío 2009).

Trehuaco es conocido por su cultura agrícola, donde sus habitantes provienen de antiguos fundos en donde se continúa con esta actividad económica, aunque en menor medida. En esta zona también se cultivan viñedos, membrillos, papas y papayas del sector costero, junto con la recolección de mora por parte de muchas mujeres y la pesca de supervivencia. Esta área se caracteriza por presentar suelos Clase VII, los que poseen un uso limitado, generalmente no adaptados para cultivos. En la actualidad, la empresa forestal es la principal actividad económica que se desarrolla en la zona. También predominan los suelos de la Clase III que presentan moderadas limitaciones en su uso y restringen la elección de cultivos, aunque pueden ser buenas para ciertos cultivos. Tienen moderadas limitaciones que reducen la elección de plantas o requieren de prácticas especiales de conservación o de ambas. Los suelos de esta Clase requieren prácticas moderadas de conservación y manejo.



5.5 Geología

En relación con la geología de la zona ésta presenta rocas intrusivas de la formación CPg, corresponden principalmente a granitos, granodioritas, tonalitas, dioritas de hornblenda y biotita, localmente de moscovita. Además, de la presencia de rocas metamórficas de la formación Pz4b, se caracteriza por el contenido de pizarras, filitas y metareniscas con metamorfismo de bajo gradiente del Carbonífero temprano (Aquaterra Ingenieros Limitada, 2011). Según lo expuesto por Munizaga (1973), los principales minerales que se presentan en esta zona son cuarzo (SiO_2), biotita ($\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$), moscovita ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), filita ($\text{Al}_2\text{O}_3 - 4\text{SiO}_2 - \text{H}_2$), clorita ($(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 * (\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{OH})_6$) y andalucita (Al_2SiO_5) (Mackenzie, F. y Garrels, R., 1971) (Aquaterra Ingenieros Limitada, 2011; Munizaga et al., 1973). Además, esta zona está compuesta por una amplia variedad de arcillas como Caolinita, Hornblenda, montmorillonita y Illita. (SERNAGEOMIN, 2003).



Geología del área de estudio Boca Itata, comuna de Trehuaco

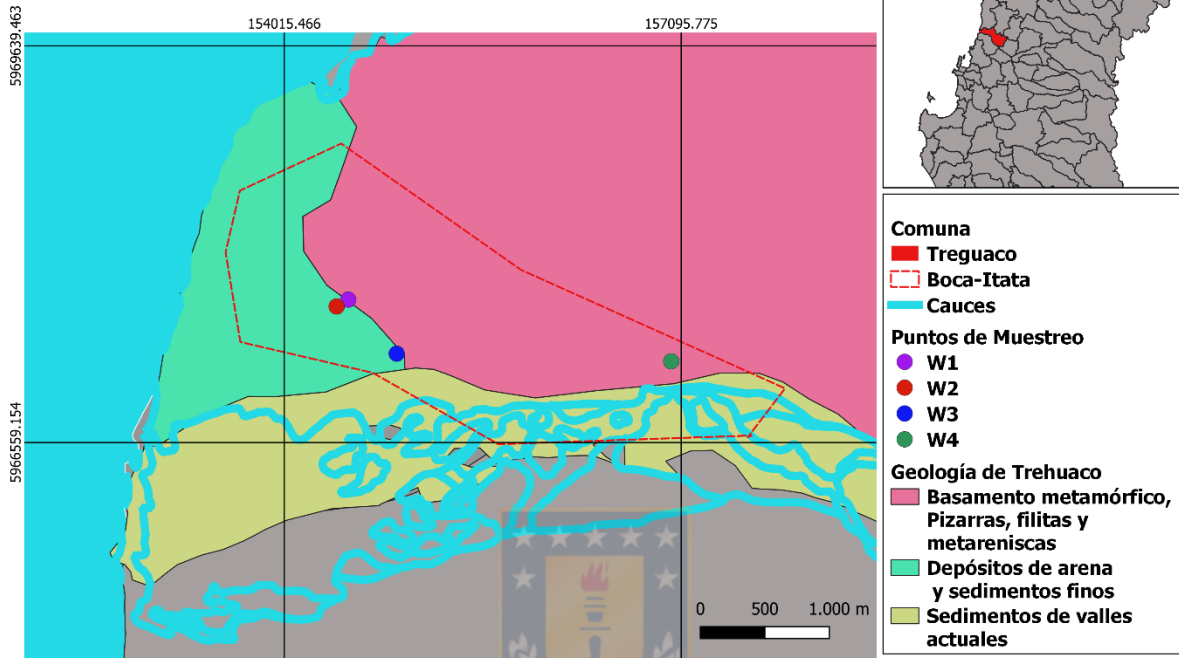


Figura 4. Mapa geológico sector Trehuaco.

En esta figura también se incluyen los puntos de muestreo W1, W2, W3 y W4. Datos Cartográficos: Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) Huso 18 Sur, Sistema de Referencia Geodésico: WGS-84.

DEPÓSITOS NO CONSOLIDADOS

Q1m: Terrazas Marinas (Pleistoceno-Holoceno) Estas unidades están cubiertas por sedimentos arenosos y limosos, parcialmente estratificados, compuestos por material proveniente de las erupciones volcánicas de la Cordillera Andina.

Q1: Depósitos fluvio-aluviales actuales (Pleistoceno-Holoceno): En el cauce actual de los ríos y esteros se encuentran depósitos fluviales, torrenciales, donde se mezclan bloques, gravas, arenas y arcillas.

ROCAS ESTRATIFICADAS

Pz4b Serie Oriental Basamento Metamórfico (Silúrico-Carbonífero): Consiste principalmente en esquistos, filitas, gneises y metareniscas, cuyo grado de metamorfismo varía entre las facies esquistos verdes y granulitas.

5.6 Enfoque metodológico

La metodología a utilizar para el desarrollo del tema es la siguiente:

- **Caracterizar la litología y geología de la cuenca baja de Boca Itata a través de revisión bibliográfica y datos obtenidos de monitoreo comunitario de calidad de agua.**
- Realización de una recopilación de información sobre las características litológicas y los datos históricos de la calidad de aguas subterráneas disponibles en diferentes plataformas como la Dirección General de Aguas (DGA), estudios científicos proporcionados de universidades y privados junto con estudios científicos proporcionados por otros organismos del estado, universidades, donde se deberá realizar, seleccionar y organizar la información sobre las características propias de la zona como lo son el clima, la hidroquímica, las direcciones de flujo, las principales actividades económicas que se desarrollan en la zona y los usos de suelo.
- La obtención de datos de este estudio comienza desde el año 2016 hasta marzo 2021. Cabe destacar que el monitoreo comunitario se centra en 4 pozos, en un área aproximada de 15 km². Para el muestreo con la comunidad se llevan a cabo diversos talleres y capacitaciones a la comunidad completa en la sede de la Junta de vecinos de Boca Itata para dar a conocer las técnicas y materiales de muestreo de calidad de agua in situ. El muestreo se

realiza con la utilización de kit portátiles HANNA, para el análisis de diferentes parámetros:

- Análisis in situ por parte del monitoreo comunitario: Los análisis son realizados por medio de kit portátiles HANNA modelo Hi 9829 y Hi 9828-10. Los parámetros analizados son Temperatura, pH, Nitrato (NO_3^-), Hierro (Fe total), Alcalinidad, Dureza, Sulfato (SO_4^{2-}), Cloruro (Cl^-).
- Análisis parámetros químicos en laboratorio: Las muestras luego de su obtención fueron mantenidas bajo las condiciones de temperatura necesarias para su posterior análisis en laboratorio, mediante Espectrofotómetro HANNA UV-VIS ICP-AES or flame- AAS, en donde se analizarán parámetros como: Alcalinidad, Cloruro (Cl^-), Sulfato (SO_4^{2-}), Nitrato (NO_3^-), Potasio (K^+), Sodio (Na^+), Magnesio (Mg^{2+}), Calcio (Ca^{2+}), Arsénico Total disuelto (As_T) y Hierro Total disuelto (Fe_T).

5.7 Análisis de resultados químicos:

- La calidad de los resultados de los análisis químicos de iones es verificada mediante el cálculo del balance iónico. Este cálculo considera la sumatoria de cationes y aniones expresados en unidades de miliequivalentes/litro (meq/L). El error de balance iónico no debe ser mayor a 5% (en términos absolutos) según la expresión que se presenta a continuación. (DGA, 2009):

$$Error(\%) = 100 \cdot \frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones}$$

Para complementar el análisis de los iones mayoritarios se realizarán diagramas, ya sea de Piper o Stiff. El desarrollo de estos diagramas se lleva

a cabo mediante el programa HATARICHEM, el cual permite desarrollar diagramas de piper y diagramas de Stiff. Se utiliza para realizar cálculos de los balances químicos en análisis de agua y su representación gráfica. (Piper, Stiff, Schöeller y Diagramas de salinidad).

Además, a los datos se les realiza un análisis de estadística descriptiva para identificar los procesos hidrogeoquímicos que dan lugar a variaciones en la composición química de las aguas subterráneas, mediante el programa estadístico IBM SPSS statistic.

- **Modelar los procesos hidrogeoquímicos del agua subterránea en la cuenca baja de Boca Itata, utilizando el Software PHREEQC.**

Los modelos hidrogeoquímicos se caracterizan por ser una útil herramienta para identificar procesos que impactan los sistemas acuáticos. Considerando aquello, existen dos vías para la modelación acuática tales como: los modelos directos que estiman la composición del agua a partir de reacciones y supuestos hipotéticos y los modelos inversos, los cuales utilizan las composiciones de agua y minerales para restringir reacciones hipotéticas. (Campbell y Nordstrom, 2014). En consecuencia, en este estudio se utilizó un modelo inverso para simular la trayectoria de un flujo de agua subterránea desde un punto inicial y final.

Este estudio se basa en la modelación inversa, proceso que busca calcular la cantidad de masa neta que es transferida entre las distintas fases del medio (líquido, sólido o gaseoso) para cada una de las reacciones especificadas. (Rafighdoust et al., 2016). Para llevar a cabo este tipo de modelos se debe cumplir con las ecuaciones de conservación de la materia y los principios que rigen el equilibrio químico. Además, programas como PHREEQC trabajan en líneas asociadas en serie paralelo. En la primera serie desarrollan algoritmos numéricos que buscan ajustar los datos

experimentales a modelos matemáticos, en cambio la otra serie es la que permite estimar propiedades termodinámicas a partir de una amplia base de datos con la que cuenta PHREEQC.

Para desarrollar el modelo se utilizaron los módulos *INVERSE MODELING*, *uncertainty*, *balances* y *PHASES* Parkhurst y Appelo (2013) basado en el contexto geoquímico del área de estudio.

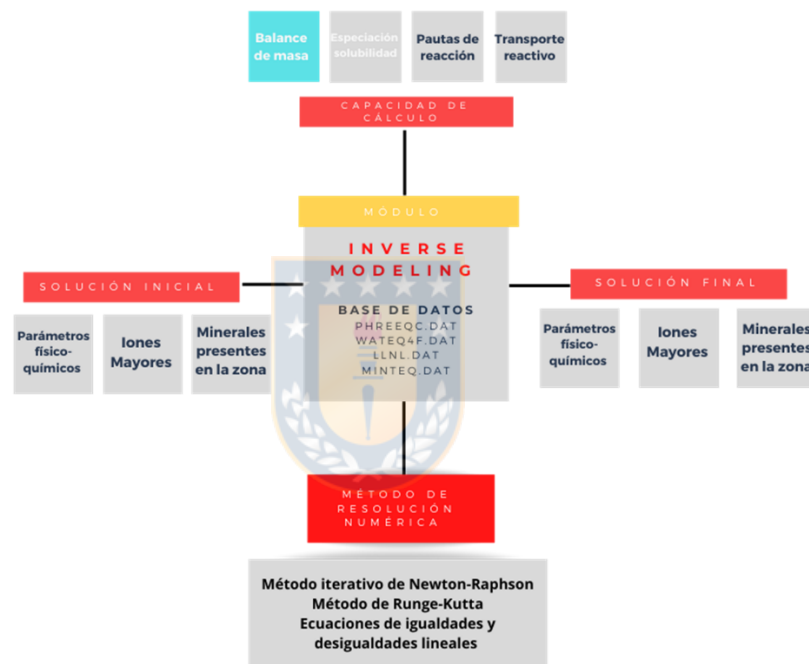


Figura 5. Modelación inversa mediante PHREEQC.

A continuación, una descripción de los principales puntos de estudio analizados:

Tabla 4. Descripción de estaciones de muestreo microcuenca Boca Itata.

Punto	Profundidad de la napa	Profundidad Del pozo	Latitud	Longitud	Sector (dueño)
W1	4 m	15 m	36° 22' 26.695´S	72° 51' 2.880" W	Omar Gutiérrez
W2	4 m	15 m	36° 22' 28.247´S	72° 51' 6.736" W	Evaristo Cabrera
W3	4 m	15 m	36° 22' 40.944´S	72° 50' 47.98" W	Sin nombre
W4	7 m	12 m	36° 22' 45.671´S	72° 49' 23.52" W	Camino principal

Las mediciones de Ciencia ciudadana han sido realizadas desde el año 2016. Se han generado trimestralmente muestreos a lo largo de los años, con 11 muestreos en total hasta otoño del año 2021. Han existido intermitencia en los muestreos, sin embargo, se ha continuado en el tiempo. Las muestras colectadas han sido muestreadas en diferentes estaciones del año (invierno, otoños, primavera y verano). En cuanto a los análisis de laboratorio se desarrollaron cinco análisis desde el año 2016 para ir corroborando lo que se mide en el terreno. En total se han colectado de 546 muestras para la determinación de cada parámetro a analizar.

- Mediante la información obtenida en el punto anterior se desarrolla la modelación inversa utilizando el programa PHREEQC, donde se debe identificar las reacciones geoquímicas que llevaron a una determinada calidad del agua e identificar las condiciones de equilibrio de concentración de especies químicas en solución y procesos hidrogenoquímicos (precipitación/dilución) mediante los índices de saturación mineral de las fases sólidas, entre otros. El IS de las fases minerales, se calcula de la siguiente manera (Parkhurst y Appelo, 2013)

$$IS = \log_{10} \left(\frac{IAP}{K_{sp}} \right)$$

Donde IAP es el producto de actividad iónica de las especies químicas disociadas en solución y Ksp denota el producto de solubilidad de equilibrio para las sustancias químicas involucradas a la misma temperatura. IS <0 y IS > 0 indican estados de sub-saturación (disolución) y sobresaturación (precipitación) para el agua subterránea con respecto a la fase mineral específica, respectivamente. (Parkhurst y Appelo, 2013).

Para la realización de una modelación inversa es necesario contemplar lo siguiente Kuldip et al. (2011):

1. Conocer la química del punto inicial y final que se encuentren con la misma tendencia de flujo.

2. La hidroquímica de las aguas subterráneas no está influenciada por la difusión.

3. La composición química del punto analizado prevalece durante un tiempo considerado, es decir, las especies químicas disueltas en la fase acuosa se encuentran en equilibrio homogéneo, aunque la disolución en su conjunto no esté en equilibrio con otras fases presentes, como puedan ser las diferentes especies químicas que constituyen un suelo o cualquier otra fase sólida que se encuentre en contacto con la fase acuosa original formando un equilibrio heterogéneo. (Ruiz y Martínez, S.F).

4. Las fases minerales usadas en la modelación son o estuvieron presentes en el acuífero.

- Para desarrollar el modelo, es necesario contar con los parámetros fisicoquímicos, la identificación de los minerales presentes en la zona de estudio, los códigos para desarrollar la modelación y contar con la plataforma Notepad+ que es el editor de texto donde se escribe y desarrolla la modelación, este editor permite también obtener los archivos de salida con los datos producidos y ejecutados por el programa PHREEQC.

- **Identificar las reacciones geoquímicas en solución que controlan la química del agua subterránea para transmitir la información a la comunidad**

- Para dar cumplimiento a este objetivo es necesario contar con la información obtenida mediante el modelamiento realizado con el programa PHREEQC, de esta forma realizar la interpretación de los datos. En consideración que se realizara una modelación inversa para identificar las reacciones geoquímicas que llevaron a una determinada calidad del agua e identificar las condiciones de equilibrio de concentración de especies químicas en solución y procesos hidrogeoquímicos (precipitación/dilución) mediante los índices de saturación mineral de las fases sólidas, etc.

5.8 Índice de Calidad Dirección General de Aguas

Para realizar el cálculo de este índice de calidad es necesario identificar el índice de calidad individual de cada parámetro a evaluar en este caso: Cloruro, Sulfato, Calcio, Sodio, Magnesio, Nitratos y Arsénico, los cuales se contrastan con los valores identificados en la Tabla 5 para de esta forma asignarles un valor de C1 a C5 (tabla 5), en donde el valor C1 indica la calidad excepcional y al ir aumentando este valor la calidad disminuye. Luego de obtener todos los valores de IC individuales se debe realizar el cálculo del índice de calidad general el cual se determina mediante el cálculo que se identifica en la tabla 7.

Tabla 5. Clasificación de los índices de calidad individual (ICi)

Indices de calidad	Valor de Corte	
C1 Excepcional	VC1	Según Indicaciones de OMS respecto a la calidad de agua de uso humano
C2 Buena	VC2	Norma Chilena con respecto a calidad de aguas.
C3 Regular	VC3	Norma para actividad agrícola, y norma chilena de riego.
C4 Insuficiente	VC4	Puede ser tratada para alcanzar la calidad de agua potable definida por la norma establecida.
C5 Intratable	VC5	Aguas que no se pueden tratar. De ser posibles serían mediante procesos muy costosos o complejos.

Fuente: DGA (2009).

Tabla 6. Relación entre clases de calidad y valores límites establecidos por diferentes organismos tanto internacionales como nacionales.

Parámetros	Unidad	VC1	VC2	VC3	VC4
Cloruro	mg/l	250	400	1064	1600
Sulfato	mg/l	250	500	961	10000
Calcio	mg/l	100	200	401	4000
Sodio	mg/l	200	200	920	6000
Magnesio	mg/l	100	125	250	2500
Nitrato	mg/l	10	50	133	200
Arsénico	mg/l	0,01	0,01	0,1	4

Fuente: DGA, 2009

Tabla 7. Criterios para establecer el IC general.

Condición IC individual	Resultado IC general	Expresión
Si existe un parámetro con IC Intratable	IC general es Intratable	Si $IC_{individual} > 4$ $IC_{general} = 5$
Si alguno de los parámetros que afectan la salud humana, según Nch409, presentan IC Bueno, Regular o Insuficiente	IC general es el peor IC individual de todos los parámetros	Si $1 < IC_{individual} \leq 4$ $IC_{general} = \max_{i=parametro} (IC_i)$
Si todos los parámetros que afectan la salud humana, según Nch409, presentan IC Excepcional	IC general es el promedio aritmético del IC individual de todos los parámetros	Si $IC_{individual} \leq 1$ $IC_{general} = \frac{\sum IC_i}{n^{\circ} parametros}$

Fuente: DGA, 2009.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Geoquímica General

La Tabla 8 presenta la comparación de análisis de iones presentes en el agua de pozo y punteras de la localidad de Boca Itata realizados por la comunidad y en laboratorio, en los puntos de muestreo W1, W2, W3 y W4. En este estudio se evaluaron cuatro estaciones de muestreo donde se analizó pH, Alcalinidad, temperatura del agua, iones tales como Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , Fe_T , NO_3^- y As_T en laboratorio. Sin embargo, también se llevó a cabo un análisis por parte de la población de iones como SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , Fe_T .

De acuerdo con los valores promedio observados en el estudio, las características fisicoquímicas del agua de pozo medidas por la comunidad presenta algunas diferencias con los análisis en laboratorio para algunos iones tales como SO_4^{2-} , Cl^- , Fe_T . Al igual pH, Alcalinidad y temperatura del agua, parámetros medidos *in-situ* tanto por la comunidad como por los investigadores presentaron pequeñas diferencias. En cambio, los iones que no fue posible su medición por parte de la comunidad, como Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ fueron analizados en laboratorio, dado que en terreno es complejo desarrollar este tipo de análisis.

Relativo a los valores mínimos y máximos registrados en el estudio, las características del agua de pozo y puntera estudiadas superan algunas concentraciones características de aguas subterráneas registrados en estudios para la zona costera. Destacan entre ellas, NO_3^- con más del doble de su valor en algunas estaciones (W1, W2) alcanzando la alarmante concentración por sobre los 90 mg L^{-1} . Los valores de NO_3^- registrados por los voluntarios mostraron valores mayores a 40 mg L^{-1} en la mayoría de los puntos analizados. Asimismo, los análisis de laboratorio indican valores muy por sobre los 50 mg L^{-1} alcanzando hasta los $99,1 \text{ mg/l}$ durante la temporada de otoño. Estos valores son considerablemente altos al tratarse de aguas subterráneas, dado que generalmente la concentración de NO_3^- en aguas subterráneas no deben exceder los 50 mg L^{-1} . Relativo a esto, diversos

estudios han registrado que concentraciones mayores a 50 mg L^{-1} de NO_3^- en el agua potable causa metahemoglobinemia, una enfermedad que se manifiesta principalmente en bebés de hasta 6 meses de edad y embarazadas lo que causa la disminución de la capacidad de transporte de oxígeno de los glóbulos rojos. Esto trae consigo disminución del oxígeno en los órganos y tejidos de todo el cuerpo, con daños en ellos e incluso, la muerte (Bolaños et al., 2017). No obstante, en adultos la exposición a altas concentraciones de NO_3^- también puede manifestar problemas en disfunción de la glándula tiroides. (Donoso et al., 2015).

Relativo a la caracterización fisicoquímica del agua en las distintas temporadas del año, la Tabla 9 presenta la información registrada para todo el periodo analizado. La temperatura del agua subterránea no presenta significativas variaciones durante las estaciones del año (invierno, otoño, verano y primavera), la cual oscila entre $11,10^\circ\text{C}$ y $18,96^\circ\text{C}$ en la temporada de invierno, entre 11°C y $16,1^\circ\text{C}$ en otoño, entre los $10,23^\circ\text{C}$ y $18,44^\circ\text{C}$ durante la primavera y en verano las temperaturas van desde los $11,02^\circ\text{C}$ y los $20,30^\circ\text{C}$, respectivamente. En tanto, el agua presenta un pH ligeramente alcalino que varía entre 6,2 y 8,2 con un promedio $7,1 \pm 0,42$ para todo el periodo de estudio y se destaca una alta concentración de sales representados por registros elevados de SO_4^{2-} ($2,1 \text{ mg L}^{-1}$ - $44,3 \text{ mg L}^{-1}$), en promedio $30,7 \pm 10,7 \text{ mg L}^{-1}$, lo cual son concentraciones altas en comparación con lo que señala la DGA, en un estudio del agua subterránea en la cuenca del Itata y el Biobío, indica que las concentraciones de SO_4^{2-} son bajas en las muestras de la cuenca costera entre los ríos Itata y Biobío indicando que no presentan valores mayores a 10 mg L^{-1} . A pesar de presentar concentraciones altas de SO_4^{2-} estas concentraciones se encuentran dentro de las permitidas por la normativa. La zona de Boca Itata presenta formación geológica de rocas ígneas las cuales son quienes aportan concentraciones de SO_4^{2-} , aunque estas concentraciones se pueden deber también a contaminación debido a la actividad humana. Además, se presenta una alta concentración de Cl^- que superan los 40 mg L^{-1} . En cambio, existe un punto de muestreo, la estación W4, donde se observa un pH más alcalino con menores concentraciones de sales (SO_4^{2-} y Cl^-). Los valores más bajos de pH (6.9) registrados en la estación W1 y con una

gran cantidad de sulfatos se asocia probablemente al origen de los mismos a través de procesos de oxidación de SO_4^{2-} (Mathess, 1982 citado por Bustamante, 2017). El menor valor de SO_4^{2-} corresponde al punto W4, el cual se encuentra más cercano a la superficie y el valor más alto corresponde al Punto W1 el cual es el que presenta una mayor profundidad y se encuentra más cercano a la costa.

El Cl^- oscila entre $7,3 \text{ mg L}^{-1}$ y $50,3 \text{ mg L}^{-1}$ donde la concentración mínima se sitúa en el Punto W4 y la concentración máxima se presenta en el Punto W3. La concentración promedio de Cl^- es de $35,6 \pm 12,9 \text{ mg L}^{-1}$ lo cual está dentro de los rangos normales de zonas costeras que van desde los 10 a los 40 mg L^{-1} (DCPRH, 2020). Dentro de las principales fuentes de Cl^- se encuentran lavado de terrenos de origen marino, agua de lluvia, mezcla con agua marina en regiones costeras y de vertidos urbanos e industriales (Custodio y Llamas, 1976), además los iones de Cl^- en el agua subterránea se originan a partir de sales de Cloruro que son solubles en agua que se encuentran en los minerales. (Shakerkhatibi et al., 2019). Este ion suele presentarse en mayores proporciones en aguas más maduras y con mayor interacción con roca, proceso que tienden a aumentar su cantidad de Cl^- . En relación con la normativa las concentraciones no exceden los límites de la normativa chilena (Nch N°1.333) vigente que permite una concentración máxima de 200 mg L^{-1} para el agua de riego y de 400 mg L^{-1} para el agua potable (Nch N°409).

El Mg^{2+} varía entre $2,7 \text{ mg L}^{-1}$ y $26,2 \text{ mg L}^{-1}$, la concentración mínima se presentó en el Punto W4 y la concentración máxima en el punto W2. El promedio que presenta este ion es de $14,4 \pm 7,2 \text{ mg L}^{-1}$, lo cual es una concentración óptima que no supera los límites establecidos en las normas. El Mg^{2+} es un mineral que no llega a ser dañino para la salud de las personas y que proviene principalmente de la disolución de rocas carbonatadas, evaporíticas y de la alteración de silicatos ferromagnésicos, así como del agua marina.

El K^+ oscila entre $0,28 \text{ mg L}^{-1}$ y $34,75 \text{ mg L}^{-1}$. El valor más pequeño corresponde al Punto W2 y el más grande al Punto W4. Las concentraciones de K^+ en su mayoría son bajas, alcanzando en promedio $5,5 \pm 10,5 \text{ mg L}^{-1}$. Sin embargo, existen dos

puntos en donde las concentraciones se alejan del promedio alcanzando concentraciones mayores a 30 mg L^{-1} , lo cual de acuerdo con los valores registrados no alcanza a ser perjudicial; pero se puede deber a algún proceso de contaminación por vertidos de aguas residuales.

El As_T presenta en la zona niveles bajos con un promedio de $0,002 \pm 0,002 \text{ mg L}^{-1}$, con concentraciones mínimas de $0,0005 \text{ mg L}^{-1}$ y máximas de $0,01 \text{ mg L}^{-1}$. Aunque las concentraciones de As_T en la mayoría de los puntos analizados se encuentran dentro de los rangos permitidos, existe un punto donde la concentración de este ion excedió la concentración permitida por la norma 409/1 de $0,01 \text{ mg L}^{-1}$. El cual fue en invierno del año 2016 en el punto de estudio W3. La presencia de As_T en cada caso es la consecuencia de un ambiente geoquímico y condiciones hidrogeológicas específicos para cada caso (Lillo, 2008). Sin embargo, es necesario estudiar más a profundidad el origen de este elemento en la zona, ya que la presencia de As_T puede producir intoxicación crónica, asociadas con diversas formas de enfermedades de la piel y daños en órganos internos: alteraciones cardiovasculares, renales, circulatorias y respiratorias, en última instancia cáncer. (Hossain, 2006, citado por Mayorga, 2013).

En relación con la Alcalinidad total esta presentó concentraciones de 35 mg L^{-1} y 250 mg L^{-1} estas concentraciones se presentaron en el Punto W1, en diferentes estaciones del año, siendo en primavera en donde se presentó la menor concentración y en invierno la mayor concentración. Como promedio la alcalinidad alcanzó concentraciones de $119,6 \pm 55,4 \text{ mg L}^{-1}$, lo cual está dentro de los rangos normales de Alcalinidad, puesto que si se presentan concentraciones menores a 10 mg L^{-1} esto podría traer como consecuencia un agua muy corrosiva. La Alcalinidad puede tener una relación inversa con el NO_3^- debido los procesos de nitrificación llevados a cabo por bacterias nitrificantes que utilizan amonio para convertir a NO_3^- en lugar de carbono en el agua subterránea (Esmaeili et al., 2014). Por lo tanto, la Alcalinidad fue menor en estaciones donde la concentración de NO_3^- fue mayor y viceversa. Por otra parte, las bacterias desnitrificantes que dan paso al proceso de desnitrificación, que atenúa las concentraciones de Nitrógeno en el agua, usan

oxígeno o NO_3^- para generar energía a partir del Carbono orgánico y liberar Bicarbonato y Nitrógeno al sistema como subproducto. (Mohamed, 2003).

Además, el aumento del contenido de NO_3^- en el agua subterránea puede por una parte disminuir liberación de As de los sedimentos y propiciar la precipitación de Goethita que proporcionan un mecanismo para la inmovilización de As_T a través de la adsorción y precipitación, disminuyendo el contenido de arsénico de las aguas subterráneas (Mayorga, 2013). Lo cual en base a las condiciones descritas han sido un mecanismo para inhibir un mayor aumento de As en el agua.

Al analizar las concentraciones de Fe_T presentes en la zona de estudio se determina que existen puntos que se encuentran por sobre los $0,3 \text{ mg L}^{-1}$ permitidos por la normativa chilena de agua potable (Nch N°409), llegando a alcanzar valores máximos de 3 mg L^{-1} en el caso del punto W3. Si bien en la mayoría de las muestras se encuentran por debajo de los $0,14 \text{ mg L}^{-1}$, los niveles más altos alcanzados pueden producir problemas en la calidad del agua, produciendo problema operacionales y estéticos en el agua. A pesar que no se conoce ciertamente si el exceso de Fe_T pueda producir problemas en la salud de las personas, este elemento si interfiere en la turbiedad, el color, el sabor y el olor del agua, lo cual produce rechazo en quienes consumen esta agua. Estos problemas están asociados a la oxidación del Hierro el cual al pasar de Fe^{2+} en forma soluble a Fe^{3+} en estado insoluble, lo que puede provocar compuestos rojos corrosivos que tiñen y provocan el bloqueo de bombas, tuberías y sistemas de recirculación de agua. La alcalinidad juega un papel importante en la eliminación del Fe^{2+} debido a su capacidad de actuar como un amortiguador de pH durante el proceso de oxidación del Fe^{2+} e influye en las características del precipitado. En presencia de aguas de baja alcalinidad, la oxidación de Hierro es lenta y se forman precipitados difíciles de filtrar (Shakerkhatibi et al., 2019). Por lo cual la concentración de Fe^{2+} se ve frecuentemente limitada por la solubilidad de los carbonatos, por lo tanto, las aguas de alta Alcalinidad a menudo, tienen un contenido de Hierro inferior al agua de baja Alcalinidad. (Fuentes, 2013).

Tabla 8. Estadística descriptiva de las muestras analizadas en las punteras y pozos de Boca Itata, junto con la comparación de análisis realizados con ayuda de ciencia ciudadana y análisis de laboratorio.

Estadística descriptiva	Análisis de ciencia ciudadana				Análisis de laboratorio			
	Min	Max	Promedio	Desviación estándar	Min	Max	Promedio	Desviación estándar
Temperatura (°C)	10,23	20,3	14,7	2,23	10,3	20,7	15,1	1,87
pH	6,2	8,2	7,1	0,42	6,8	8,2	7,3	0,31
Cl ⁻ (mg/l)	6,50	49,42	30,02	12	7,25	50,30	35,63	12,90
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	1,75	35,90	25,25	9,35	2,11	44,30	30,72	10,71
Alcalinidad Total (mg/l)	35,0	250,0	119,6	55,4	29,7	135,2	94,9	57,03
Fe _T (mg/l)	0,5	2,5	0,28	0,26	0,001	3	0,14	0,43
NO ₃ ⁻ (mg/l)	0,44	44,3	38,2	11,9	0,001	99,1	67,6	35,5
Mg ²⁺ (mg/l)	-	-	-	-	2,7	26,2	14,4	7,2
Ca ²⁺ (mg/l)	-	-	-	-	3,3	39,0	23,4	10,1
K ⁺ (mg/l)	-	-	-	-	0,3	34,2	5,4	10,5
Na ⁺ (mg/l)	-	-	-	-	8,7	58,6	19,5	12,5
As _T (mg/l)	-	-	-	-	0,0005	0,01	0,002	0,002

En la Tabla 9, se observa un análisis estadístico descriptivo de iones mayores y parámetros fisicoquímicos. Este análisis se aplicó a las diferentes muestras tomadas en las cuatro estaciones del año, para identificar diferencias. En relación con la temperatura del agua, ésta presenta algunas variaciones, cambios principalmente producidos en las diferentes estaciones del año, lo que indicaría que existen diferentes fuentes de recargas del agua subterránea, esta agua igual sigue un comportamiento de aguas subterráneas poco profundas, las cuales están un poco menos expuestas que el agua superficial. En relación con el pH, es ligeramente alcalino a lo largo de las estaciones, aunque en la temporada de invierno se puede observar un valor más alto que en comparación con las otras estaciones del año, alcanzando un valor de pH levemente alcalino de 8,16, el cual

estaría aportando mayor resiliencia a las concentraciones de iones disueltos en el agua.

La Alcalinidad presenta diferencias entre los meses más fríos (invierno y otoño) y los meses más cálidos (primavera y verano) en donde se nota una disminución en estas últimas temporadas. La capacidad buffer de la Alcalinidad unido al pH alcalino del sistema son mecanismos importantes para mantener una alta capacidad de carga en el sistema.

Respecto los iones mayores el Cl^- presenta valores más bajos en los meses más fríos y mayores concentraciones en los meses cálidos, alcanzando su valor mínimo en la temporada de invierno. Esto se relaciona con la capacidad de dilución del agua subterránea, porque en invierno hay mayor influencia de agua de lluvia y/o mezcla de aguas (Alves, 2021). Los SO_4^{2-} que alcanzan valores de 44 mg L^{-1} en meses de otoño en comparación con meses de verano que tienen un máximo de $29,4 \text{ mg L}^{-1}$ los cuales pueden presentarse de manera natural o como consecuencia de descargas de aguas industriales o por la utilización de fertilizantes (Castro et al., 2009). No obstante, la zona se caracteriza por presentar arcillas como clorita (Munizaga et al., 1973) y minerales como el yeso o la anhidrita con presencia de SO_4^{2-} .

Relacionado al Mg^{2+} y Ca^{2+} , Mg^{2+} presentan mayores concentraciones en los meses de invierno y primavera respectivamente, en cambio las concentraciones más bajas se dan en verano y otoño. En general, el Mg^{2+} presenta menores concentraciones que el Ca^{2+} . En aguas altas en bicarbonatos como en los meses de invierno y otoño coincidente con las concentraciones más bajas de Mg^{2+} y Ca^{2+} , éstas tienden a precipitar en forma de carbonatos si la solución se va haciendo más concentrada (Can-Chulim et al., 2011). En el caso de K^+ presenta concentraciones mayores en la temporadas más frías y menores en primavera y verano. Por último, el Na^+ se presenta mayormente en las temporadas de verano y otoño, mientras que las concentraciones menores se dan en invierno y primavera.

Respecto del NO_3^- , en temporada de invierno presentó concentraciones altas en la mayoría de los puntos muestreados superando los 55 mg L^{-1} , excepto por la estación W4 la cual está más cercana a la superficie presentando un valor de $0,032 \text{ mg L}^{-1}$, durante la temporada de otoño se mantuvo la misma tendencia anterior donde la mayoría de los puntos muestreados presentó valores altos con un máximo de $99,1 \text{ mg L}^{-1}$ y la estación W4 con un valor de $1,38 \text{ mg L}^{-1}$, en la estación de primavera los valores son igual de altos todos superiores a los 80 mg L^{-1} y en temporada de verano los valores siguen siendo altos superando los 70 mg L^{-1} en las estaciones W1, W2 y W3 y la estación W4 sigue presentando valores mucho menor menores que los demás puntos.

Tabla 9. Estadística descriptiva estacional.

Estación	Estadística	Temperatura	pH	Alcalinidad	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺
Invierno	Min	11,10	6,92	91,8	7,80	2,11	22,40	36,0	0,032	2,34	12,01
	Max	18,96	8,16	250,0	40,2	35,5	26,15	39,0	>55	3,14	15,68
	Promedio	14,81	7,33	157,8	30,0	23,24	24,28	37,5	-	2,74	13,85
	Desviación estándar	2,01	0,41	47,43	13,99	18,38	2,65	2,12	-	0,57	2,60
Otoño	Min	11,00	6,48	57,0	9,87	2,44	2,71	3,3	1,38	1,16	8,67
	Max	16,10	7,64	216,0	47,6	44,30	18,93	28,0	99,1	34,20	33,80
	Promedio	13,76	7,10	148,4	36,0	31,17	11,04	17,1	51,11	11,10	20,76
	Desviación estándar	1,57	0,33	57,85	13,88	14,90	6,20	9,56	52,9	15,19	10,34
Primavera	Min	10,23	6,20	35,0	33,2	29,70	15,00	26,5	83	0,28	9,60
	Max	18,44	7,83	149,6	45,8	37,80	25,00	31,2	89	0,45	16,24
	Promedio	14,58	7,18	74,96	42,7	32,97	20,67	29,1	85,93	0,37	12,94
	Desviación estándar	2,55	0,44	38,11	5,34	4,27	5,13	2,38	2,25	0,08	2,74
Verano	Min	11,02	6,23	46,8	7,25	23,00	4,95	14,0	0,56	1,23	14,31
	Max	20,30	7,36	141,3	50,30	29,40	13,29	33,0	78,8	2,59	58,55

Promedio	15,86	6,82	105,3	36,68	27,00	10,59	23,3	57,01	1,90	26,82
Desviación estándar	2,63	0,42	30,51	14,13	3,49	3,91	7,93	37,69	0,56	21,28

6.2 Diagrama hidroquímica de Piper

A partir del diagrama de Piper se determinó las características químicas principales del agua subterránea analizada y de esta forma realizar su clasificación mediante una presentación visual simple. A continuación, se presentan cinco diagramas en donde las cuatro primeras Figuras (Figura 6 ,7 ,8 y 9) representan el tipo de agua en las diferentes temporadas del año, como lo son invierno, otoño, primavera y verano. Las muestras fueron obtenidas en diferentes años, siendo estos 2016, 2017 y 2018 en 4 diferentes pozos los cuales se clasifican como W1, W2, W3, W4.

Como se puede observar en la Figura 6, donde se presenta el análisis iones mayores de la zona de Boca Itata, mediante diagrama de piper, durante la temporada de invierno se ha determinado que la mayoría de las aguas presentes en la zona de estudio son de tipo bicarbonatadas y otro porcentaje se clasifica como Bicarbonatada Cálcica-Magnésica. En la temporada de otoño se identifican dos tipos de aguas, por lo que al observar en la Figura 7, se demuestra que la mayoría de las aguas son de tipo bicarbonatadas o Bicarbonatada Cálcica y otro porcentaje de las aguas se clasifican como una mezcla entre clorurada-cálcica-magnésica. Durante el periodo de primavera se identifican 4 tipos de aguas, Figura 8, se demuestra que la mayoría de las aguas son de tipo bicarbonatadas, un pequeño grupo se clasifica como mezcla de agua (Ca-Mg), (CO₃-Cl), sulfatada y/o clorurada cálcica Ca-Mg y/o magnésica y los otros tipos de agua se clasificaron como Bicarbonatada-Sódica y Clorurada. En verano se identifican 2 tipos de aguas (Figura 9), donde se muestra que la mayoría de las aguas son de tipo bicarbonatadas, un pequeño grupo se clasifica como mezcla de agua (Mg-Ca), Bicarbonatada cálcica y/o magnésica, otras aguas se clasificaron como Bicarbonatada-Sódica.

Diagrama de Piper temporada de invierno

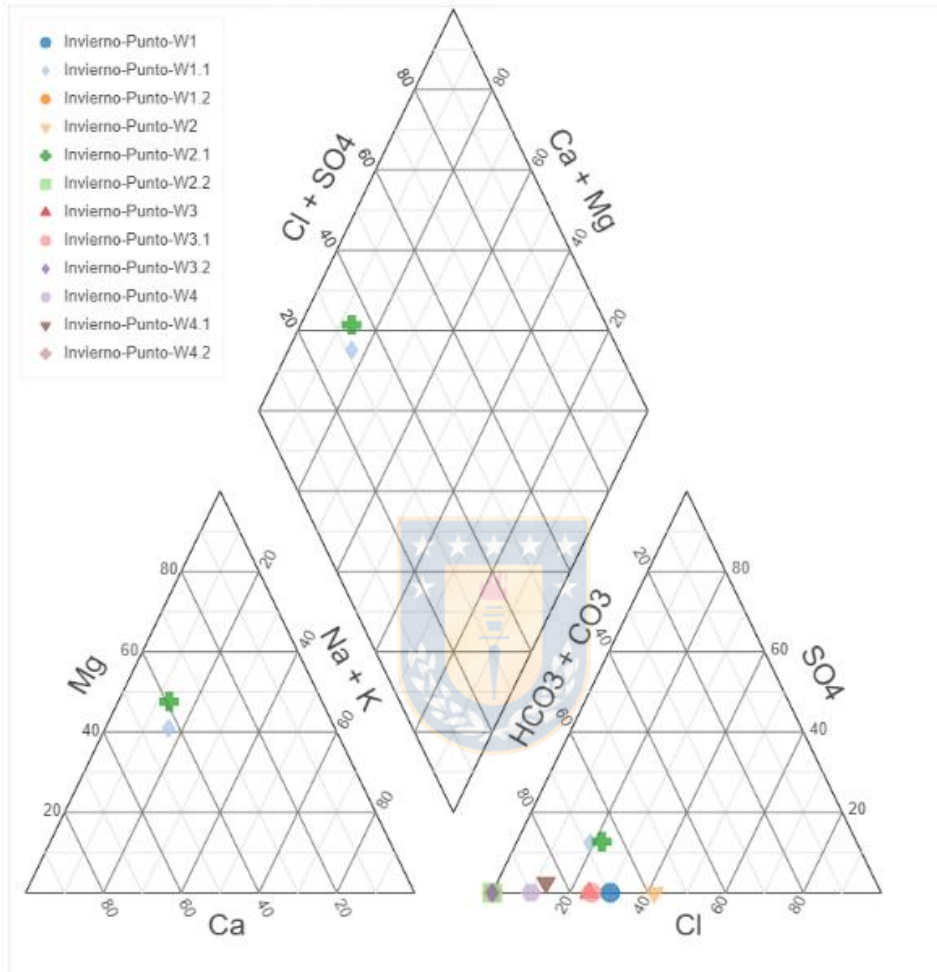


Figura 6. Diagrama de Piper con los datos recogidos en la temporada de invierno.

Diagrama de Piper temporada de otoño

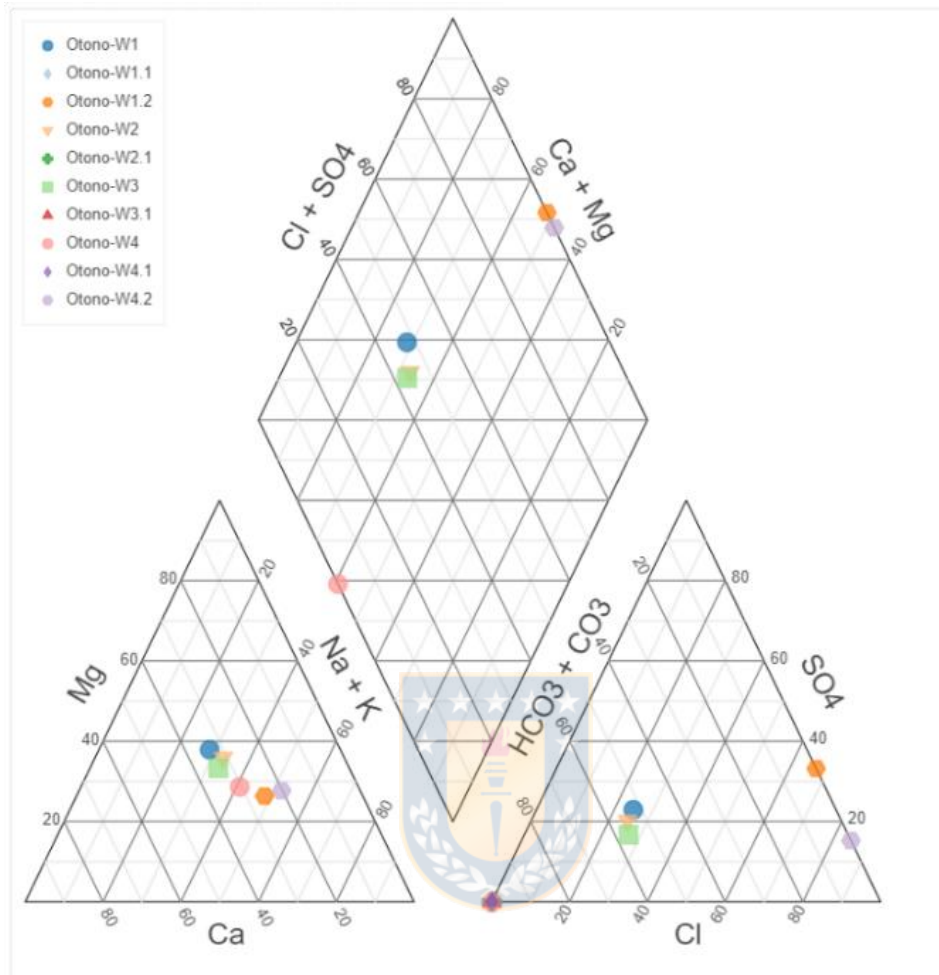


Figura 7. Diagrama de Piper con los datos recogidos en la temporada de otoño.

Diagrama de Piper temporada de primavera

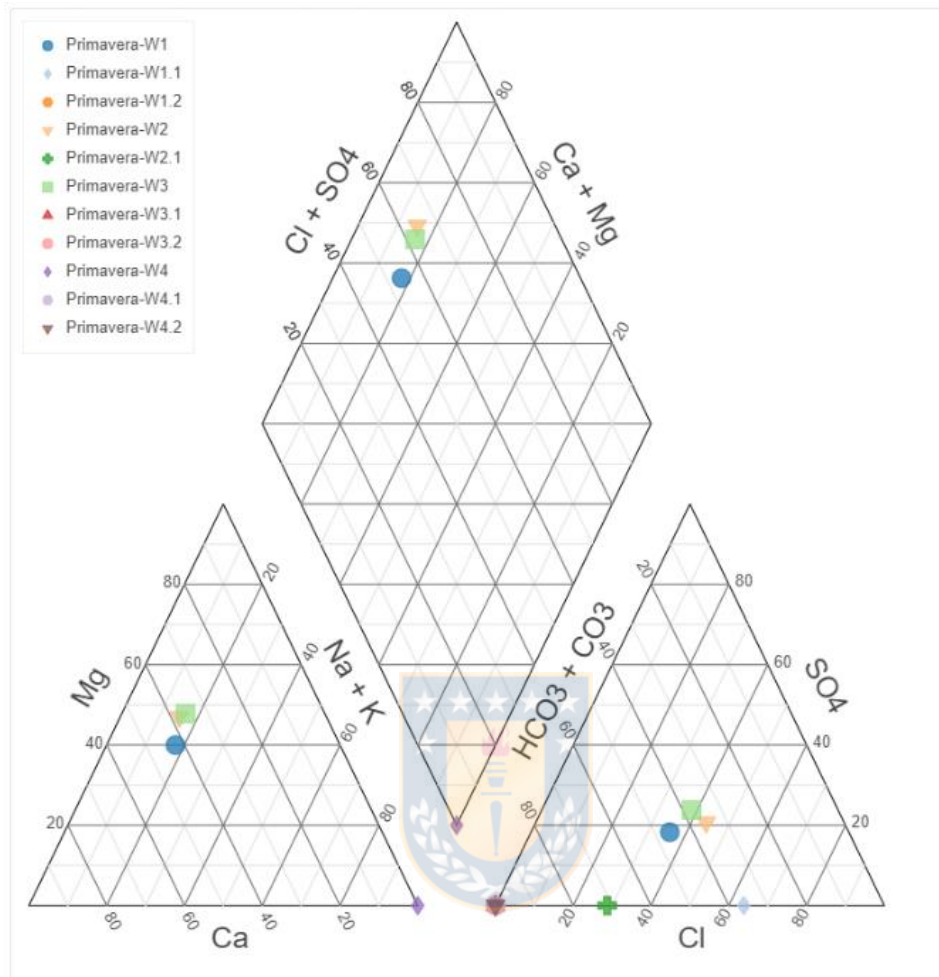


Figura 8. Diagrama de Piper con los datos recogidos en la temporada de primavera.

Diagrama de Piper temporada de verano

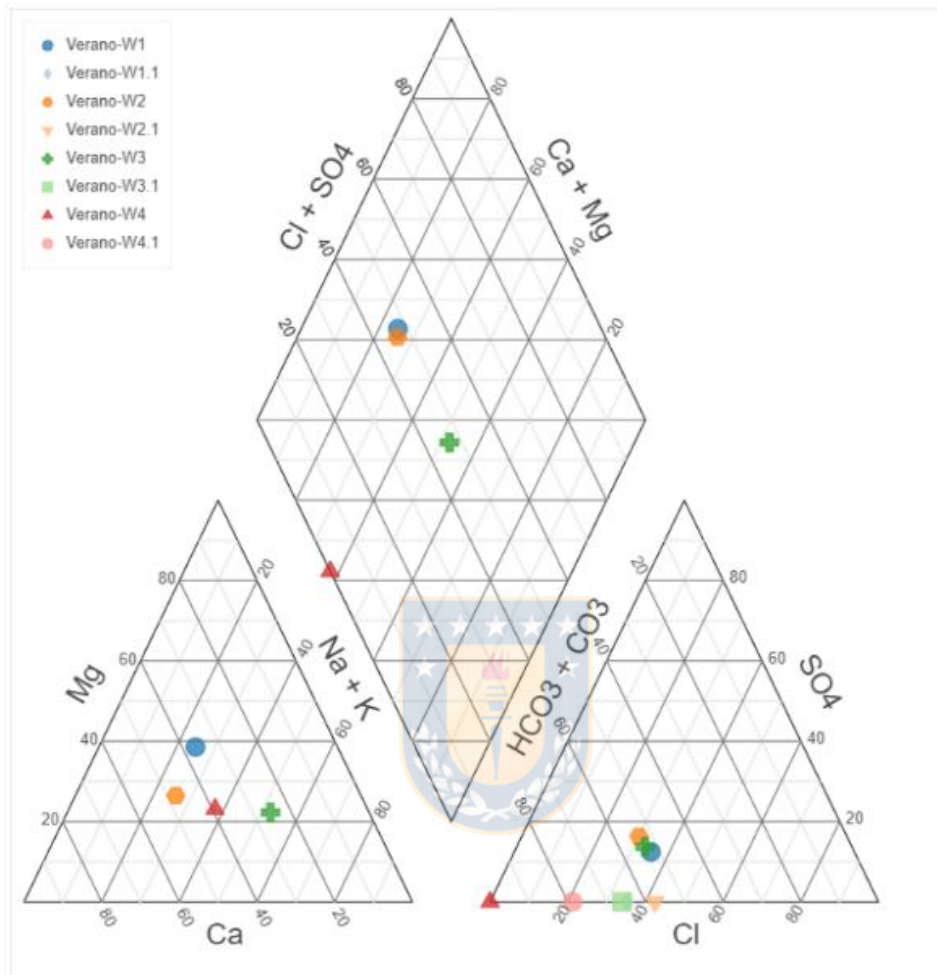


Figura 9. Diagrama de Piper con los datos recogidos en la temporada de verano.

6.3 Índice de calidad Dirección General de aguas

Los parámetros analizados se categorizan en 2 grupos: en el primer grupo se encuentran iones como Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ que son iones que interfieren en la calidad del agua, ya sea en factores estéticos como el color, sabor o pueden producir corrosión en las canalizaciones. En el segundo grupo se encuentra

parámetros como el As_T y el NO_3^- que son parámetros que al sobrepasar los límites permitidos por la norma (Nch 409/2004) pueden afectar la salud de las personas y la calidad del agua.

Los iones analizados del primer grupo presentaron concentraciones muy por debajo de las permitidas en las normas internacionales y la norma chilena de calidad de agua potable (Nch 409/2004), por lo cual se encuentran dentro de la categoría VC1, es decir, cumple con las Indicaciones de OMS respecto a la calidad de agua de uso humano. En cambio los iones del segundo grupo (Nitrato y Arsénico) presentan valores superiores a los presentados en las indicaciones de OMS respecto a la calidad de agua de uso humano y a la norma Chilena 409/04 con respecto a calidad de aguas, sobre todo en el ion NO_3^- , dado que en todos los puntos analizados se observa la superación de los niveles muy por encima de los 50 mg/l, lo cual pone en posición a la calidad del agua en la categoría VC3 lo que indica que el agua solo cumple con la norma para actividad agrícola y norma Chilena de riego. En relación con el As_T este en la mayoría de las muestras analizadas presenta concentraciones por debajo de los 0,001 mg/l que permite la Nch 409/04 para consumo humano; pero en la muestra de agua W3 del año 2016 presentó un valor de 0,0018 lo cual está por sobre los niveles permitidos lo cual genera que aquella muestra se encuentre en la categoría VC3. En base a lo descrito anteriormente es que la calidad del agua de la zona de Boca Itata y en base al índice de calidad del agua descrito por la dirección general de agua presenta calidad regular, por lo que el agua no es apta para el consumo humano; pero puede ser utilizada para el agua de riego.

Concentración de parámetros Grupo 1 y valores de corte

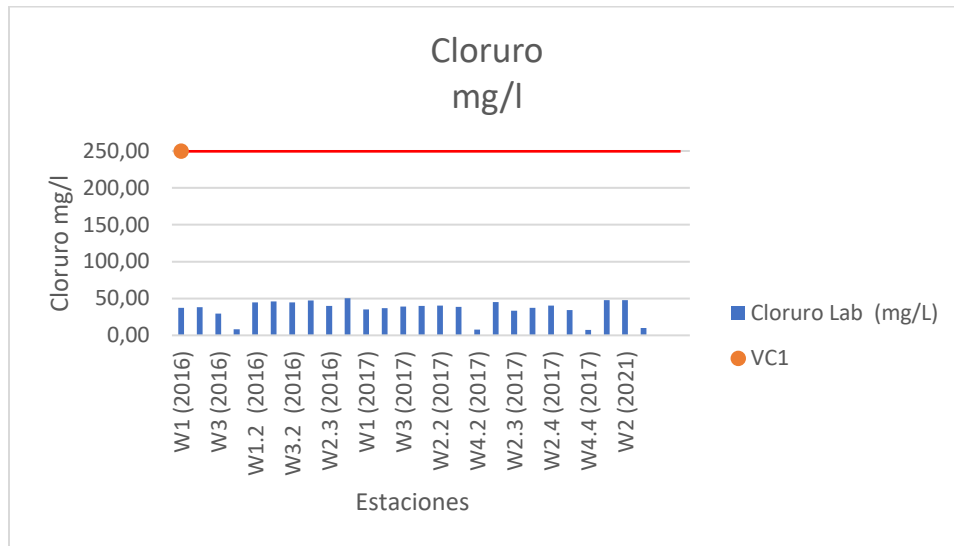


Figura 10. Concentración de Cloruros y limites normativos.

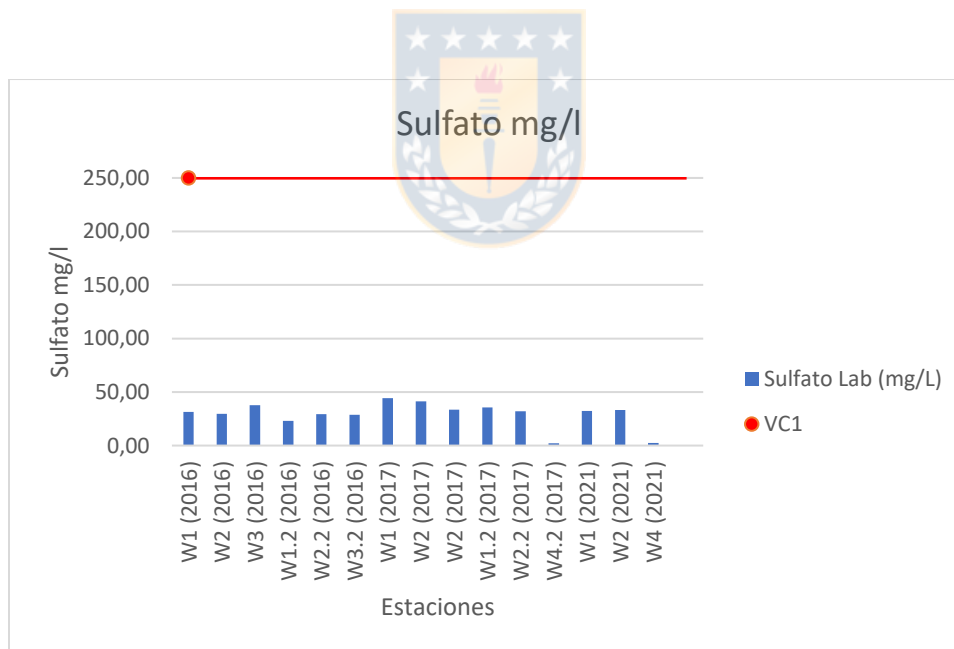


Figura 11. Concentraciones de Sulfatos y limites normativos.

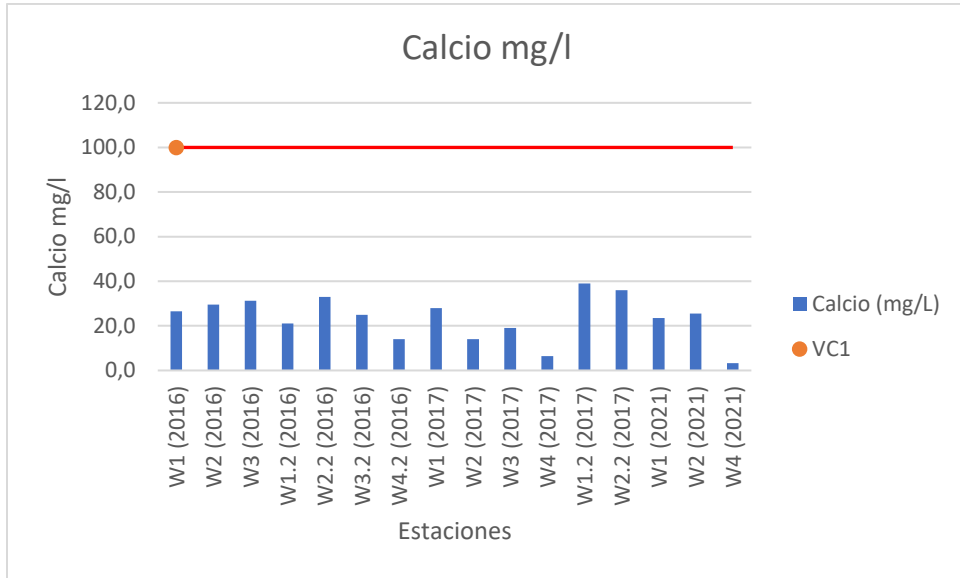


Figura 12. Concentraciones de Calcio y limites normados.

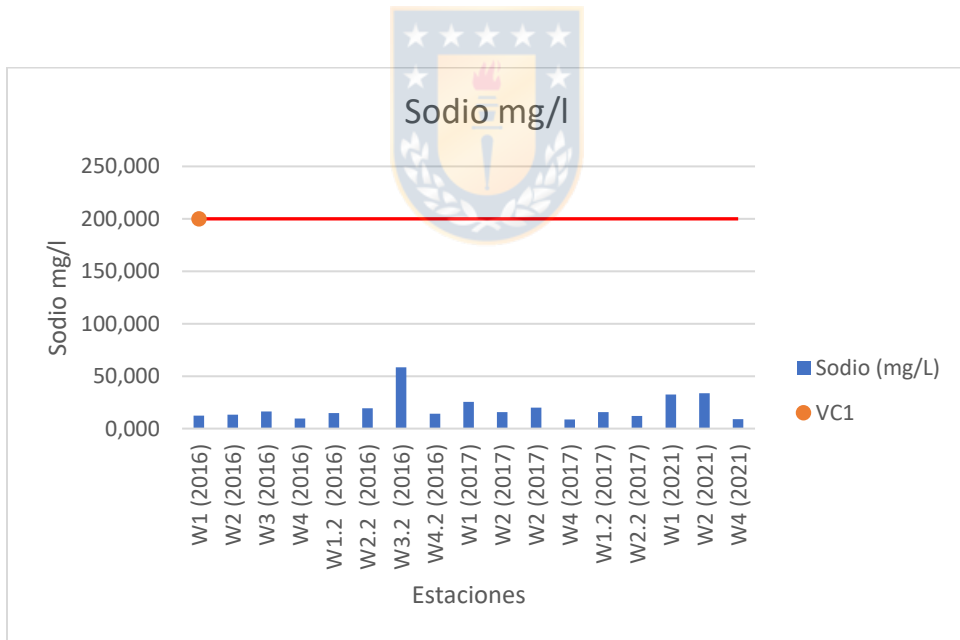


Figura 13. Concentraciones de Sodio y limites normados.

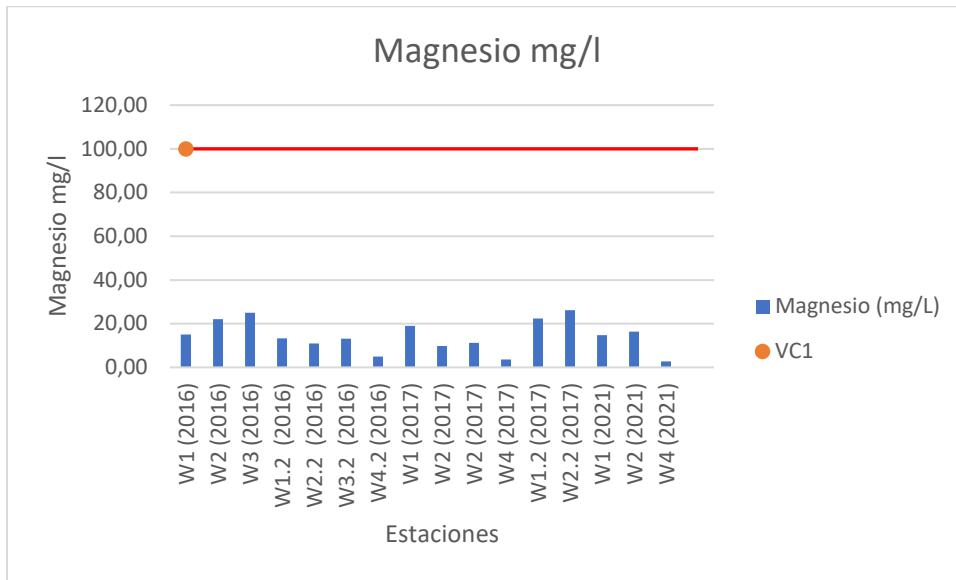


Figura 14. Concentraciones de Magnesio y limites normados.

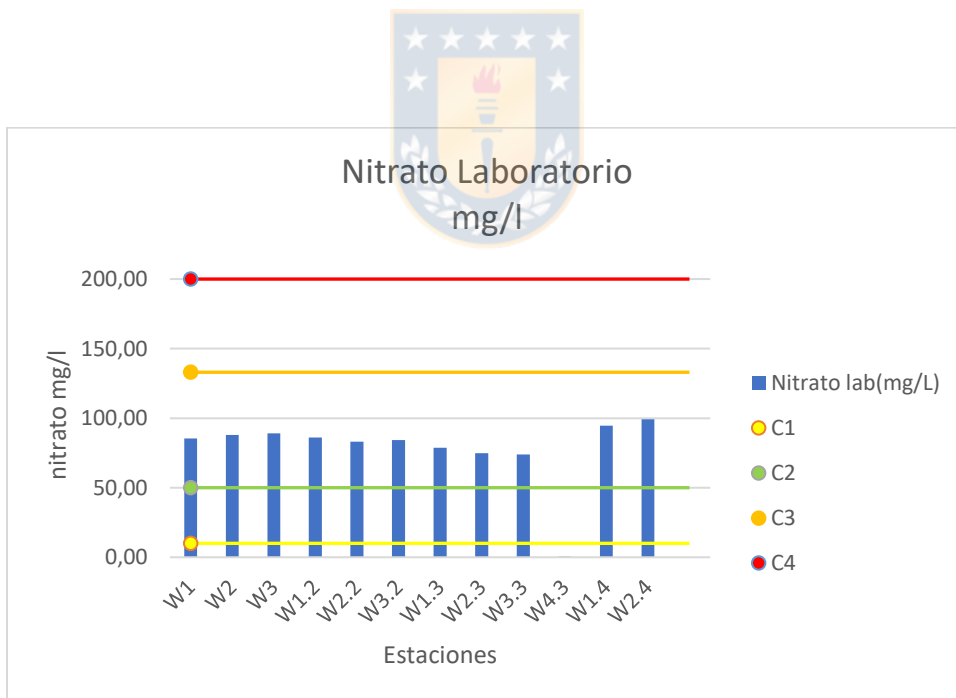


Figura 15. Concentraciones de Nitrato y limites normativos.



Figura 16. Concentraciones de Arsénico y límites normativo.

Tabla 10. Índice de calidad general.

Punto de muestreo	Año	Temporada	IC
W1	2016	Primavera	Regular
	2017	Otoño	Regular
	2017	Invierno	Regular
	2021	Otoño	Regular
W2	2016	Primavera	Regular
	2017	Otoño	Regular
	2017	Invierno	Regular
W3	2016	Primavera	Regular
	2017	Otoño	Regular
	2021	Otoño	Regular

Índices de equilibrio de especiación y saturación de fases minerales en soluciones

Los cálculos llevados a cabo por el programa PHREEQC de los índices de saturación para las muestras de agua subterránea de la zona de Boca Itata, que sigue una trayectoria desde el punto W3 a W2, se presentan en la Tabla 11. El resultado indica que las fases minerales sólidas de la solución 1, Anhidrita, Aragonito, Calcita, Yeso, Halita, CO_2 (g) y Dolomita, estaban subsaturadas, lo que implica que es necesario disolver más fases o minerales sólidos. Los minerales como $\text{Fe}(\text{OH})_3$, Goethita y Hematita estaban sobresaturados, lo que indica que estos minerales se encuentran precipitados, como se muestra en la Figura 17 y 18, en donde se representan los índices de saturación al generarse la mezcla entre el estado inicial y final. Además, el programa PHREEQC permite calcular las actividades de los iones, estas en su mayoría fueron muy pequeñas a excepción de especies como HCO_3^- , CO_2 , CaSO_4 , Ca^{2+} , K^+ , Cl^- , MgSO_4 , MgHCO_3^+ , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} que presentaron los niveles más altos.

En base a los índices de saturación de la ruta W3-W2, es posible determinar que uno de los principales procesos que genera cambios químicos en el agua son la disolución de carbonatos, como Calcita y Dolomita, lo cual es consistente con los índices de saturación de estos minerales que son negativos, lo que implica que estos minerales se encuentran subsaturados, esto también es consistente con los análisis geoquímicos de la sección anterior, en donde se determina que desde el punto W3 hacia los demás puntos existe un aumento de la presencia de iones como Ca^{2+} , Mg^{2+} y HCO_3^- , los cuales provienen principalmente de estos minerales. Además, en base a lo determinado por el diagrama de Piper el tipo de cationes dominantes en orden de abundancia, en la mayoría de los puntos analizados, son Ca^{2+} , Na^+ y Mg^{2+} ; como anión dominante en la zona se presenta el ion bicarbonato, seguido del ion Cl^- .

El yeso es un mineral de SO_4^{2-} que al encontrarse en disolución genera la oxidación de SO_4^{2-} , lo que trae consigo una acidificación del medio (Witkowski et al., 2018). No obstante, si hay presencia de minerales de origen carbónico se genera un efecto Buffer, evitando de esta forma cambios bruscos en la composición química del agua y permitiendo equilibrar el pH del agua (Barzegar et al., 2018). Otro efecto de la disolución de sulfatos es el aumento de las concentraciones de Hierro en el agua, lo cual es un problema importante en la calidad del agua de la zona. Como se observa en la Tabla 11 los principales minerales que presentan iones de Hierro son $Fe(OH)_{3a}$ y Hematita los cuales se encuentran sobresaturados respecto al índice de saturación, es decir, se encuentra de forma precipitada.

Tabla 11. Índices de saturación ruta W3-W2 28-04-2017.

Mineral	IS inicial	IS final
Anhidrita ($CaSO_4$)	-2,85	-2,95
Aragonita ($CaCO_3$)	-1,22	-0,87
Calcita ($CaCO_3$)	-1,06	-0,72
Dolomita ($CaMg(CO_3)_2$)	-2,13	-1,4
Ferrihidrita $Fe(OH)_3$	0,72	1,01
Goethita ($FeOOH$)	6,61	6,9
Yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)	-2,38	-2,53
Halita ($NaCl$)	-7,57	-7,78
Hematita (Fe_2O_3)	14,05	15,02
Jarosita-K ($KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$)	-9,19	-7,54
Melanterita ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)	-7,95	-8,4
Siderita ($FeCO_3$)	-2,06	-1,94
Silvita (KCl)	-8,54	-8,1

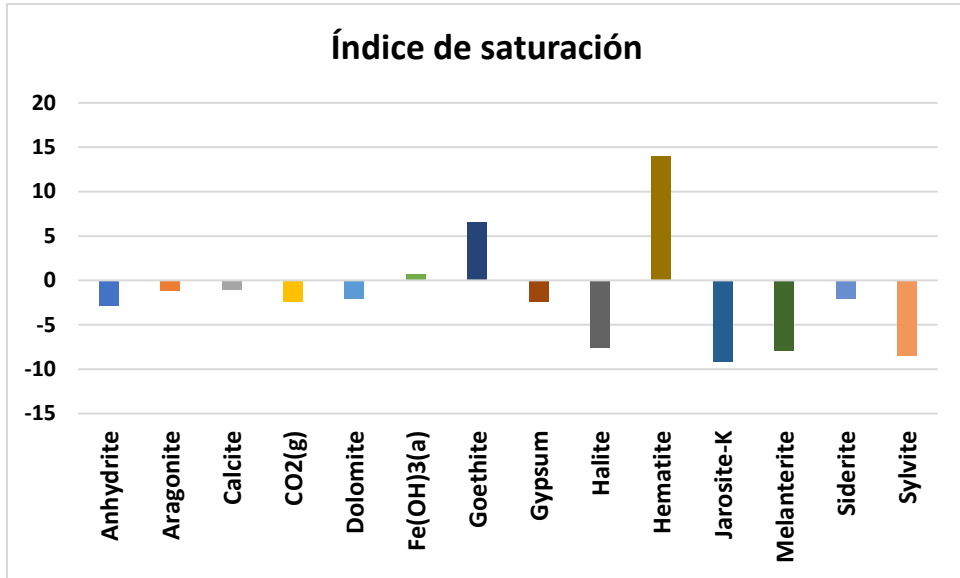


Figura 17. Índice de saturación inicial Punto W3.

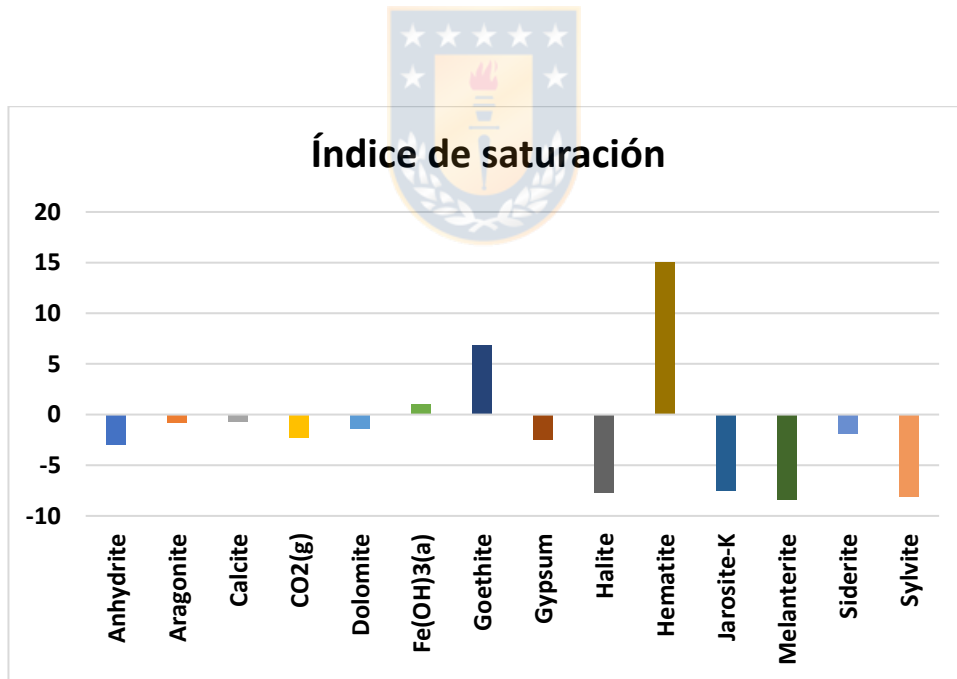


Figura 18. Índice de saturación final Punto W2.

6.4 Índice de saturación

Tomando en consideración la trayectoria desde el punto W1 a W2, el resultado indica que las fases minerales sólidas de la solución 1 (W1), Anhidrita, Aragonito, Calcita, Yeso, Halita, CO_2 (g), Jarosita, Melanterita, Siderita, Silvita y Dolomita, estaban subsaturadas, por lo que es necesario disolver más fases o minerales sólidos. Los minerales de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, Goethita y Hematita estaban sobresaturados, lo que indica que más minerales necesitan precipitación, esto queda graficado en la Figura 19, donde se muestran los índices de saturación de este punto. Como se observa, los minerales que se encuentran en proceso de precipitación son principalmente minerales que cuentan con composición de Hierro, lo cual, en base a lo determinado anteriormente, en la sección sobre geoquímica, es consistente con que en varios puntos muestreados los niveles de Hierro se encuentran por sobre los permitidos en la normativa (Nch 409/04), lo que se debe principalmente a los procesos naturales que presenta el agua subterránea de la zona debido a la disolución de minerales con presencia de Hierro como Siderita, Melanterita y Jarosita que permitieron la formación de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, Goethita y Hematita. En la solución 2 (W2) se observan algunas diferencias en los índices de saturación del punto anterior, donde los minerales que se encuentran de forma disuelta son anhidrita, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, Halita, Jarosita, Melanterita y Silvita. Se produce la precipitación de minerales como Calcita, Dolomita, Yeso Hematita, Aragonita y Goethita producto de la disolución de Anhidrita y melanterita debido a que se encuentran sobresaturados deben precipitar. Otro proceso que influye en la precipitación de minerales de carbonato es la precipitación de CO_2 . Lo cual indicaría que existe una alta presencia de iones carbonatos en el agua lo que propicia que el sistema busque generar un equilibrio de los iones de Ca^{2+} , Fe^{2+} y SO_4^{2-} desde el punto W1 hacia el punto W2. Al existir mayores concentraciones de estos iones mayores también existe gran presencia del ion HCO_3 por lo cual existe un incremento en la Alcalinidad, lo que permite mantener el equilibrio del sistema ante cambios bruscos.

Además, minerales como Halita y Silvita se encuentra en proceso de disolución, por lo cual existe un incremento de iones como Na^+ , Cl^- y K^+ , lo que se condice con la hidrogeoquímica de la zona, en donde se presentó un incremento de estos iones a lo largo de la ruta seleccionada. Otros factores que pueden producir el incremento de estos iones es la cercanía con la costa, ya que desde Boca Itata hacia el mar solo hay un kilómetro de diferencia. También el aumento del ion Cl^- puede ser producto de agua de mar antigua atrapada en sedimentos, disolución de halita y minerales relacionados que están presentes o disolución de lluvia seca de la atmósfera. (Rabia et al., 2017).

Tabla 12. Índice de saturación ruta W1-W2 17-12-16.

Mineral	IS inicial	IS final
Anhidrita	-3,07	-0,21
Aragonita	-1,76	0,76
Calcita	-1,6	0,91
CO2(g)	-1,42	0,38
Dolomita	-3,27	1,32
Fe (OH)3(a)	-0,65	-1,3
Goethita	5,24	4,6
Yeso	-2,61	0,21
Halita	-7,68	-4,95
Hematita	11,38	10,41
Jarosita-K	-10,54	-6,8
Melanterita	-7,34	-5,7
Siderita	-1,75	-0,35
Silvita	-7,94	-5,27

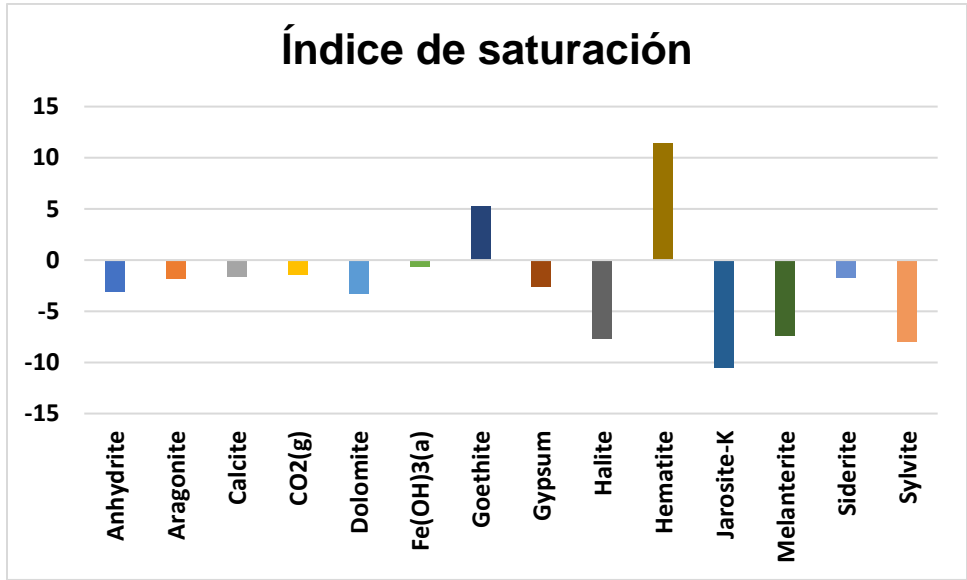


Figura 19. Índice de saturación inicial Punto W1.

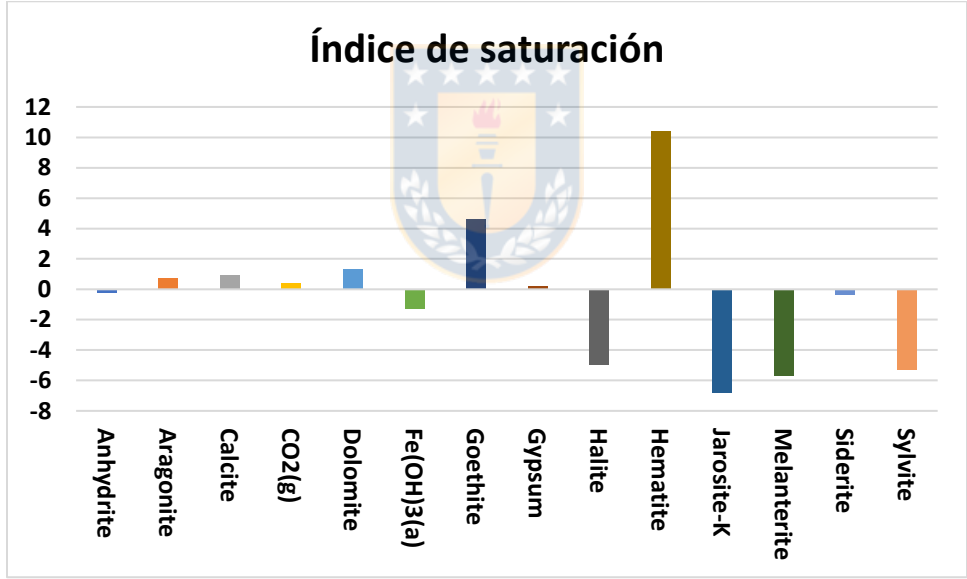


Figura 20. Índice de saturación inicial Punto W2.

6.5 Modelo Hidrogeoquímico Inverso

Para realizar la modelación inversa se contó con parámetros fisicoquímicos como pH, Temperatura, Alcalinidad, concentraciones de iones mayores como Ca²⁺, Mg²⁺,

Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ y Fe_T. Para cada uno de los modelos obtenidos, las soluciones iniciales se cargan equilibrando con ion Cl⁻ con la finalidad de realizar un balance a partir del ion Cloruro, el cual es un ion conservativo (Martínez, Bocanegra y Manzano, 2000). El modelo se permite definir las incertezas en los datos analíticos que se agreguen a las soluciones iniciales, para que el modelo pueda satisfacer el balance molar para cada elemento, la valencia y balance de cargas para la solución (Lecomte, 2003; Parkhurst, 1995). De esta manera se obtiene un equilibrio de carga de las muestras analizadas que se comprueba en los resultados del modelo. Además, se determinó un límite de incertidumbre de 0,025 para las rutas seleccionadas (W3-W2 y W1-W2), para que dentro de esos rangos se desarrolle el balance molar realizado por el programa PHREEQC.



Estaciones de Muestreo y flujos de modelación inversa

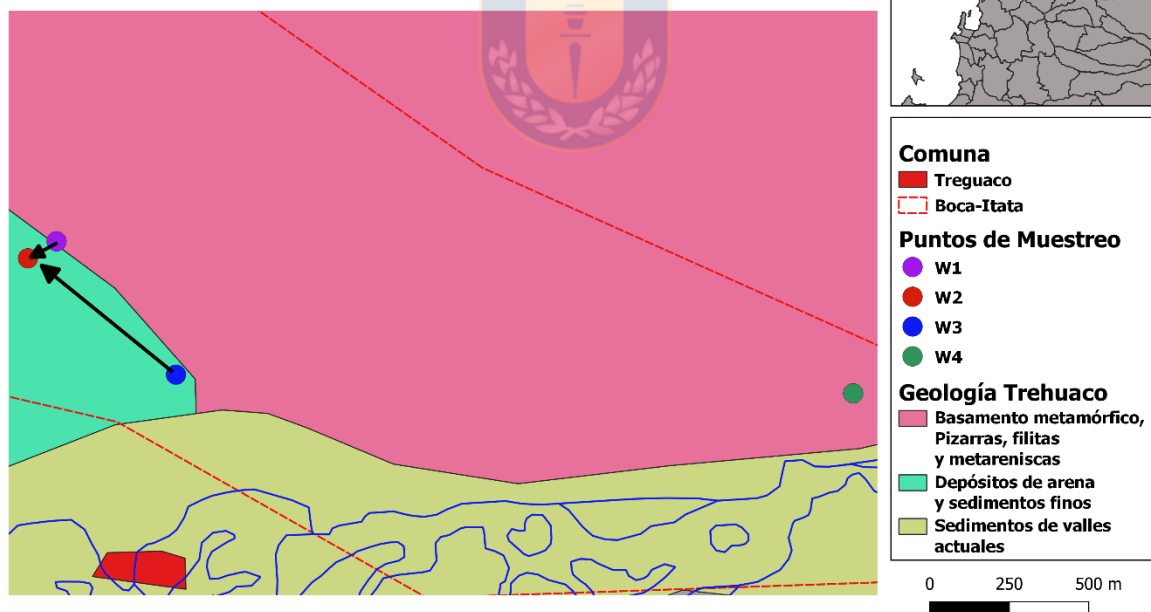


Figura 21. Mapa geológico sector Trehuaco.

En esta figura también se incluyen los puntos de muestreo W1, W2, W3, W4 y los flujos de modelación. Datos Cartográficos: Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) Huso 18 Sur, Sistema de Referencia Geodésico.

Como resultado de la modelación hidrogeoquímica inversa se obtuvo la transferencia de moles que se desarrolló entre el agua y la roca presentes en la zona de estudio. En base a ello se determina que los valores de transferencia molar, con valor positivo indicaran disolución y los valores en valor negativo, indican precipitación.

Para la ruta seleccionada entre el punto W3 y W2, PHREEQC generó cuatro modelos. En todos los modelos entregados por PHREEQC se produjo la disolución de Halita, Yeso, Calcita, Caolinita, Biotita, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, igualmente se produjo la precipitación de Clorita y moscovita. La solubilidad de Caolinita ($3,71\text{E}+01 \text{ mol L}^{-1}$) fue mayor que la de la Calcita ($2,61\text{E}-03 \text{ mmol L}^{-1}$), el yeso ($3,33\text{E}-04 \text{ mmol L}^{-1}$) y la Halita ($4,99\text{E}-04 \text{ mmol L}^{-1}$). Los demás minerales presentaron algunas diferencias entre los modelos entregados por el programa, como es el caso de los minerales como Montmorillonita, Goethita y Illita en donde se determinó que en algunos de modelos los minerales se encontraban disueltos y en otros como precipitados. En el caso de los modelos A, B y C se observa la Precipitación de Illita ($-1,32\text{E}+02/-3,31\text{E}+01 \text{ mmol L}^{-1}$) en cambio en el modelo D la Illita se encuentra disuelto ($4,70\text{E}-04 \text{ mmol L}^{-1}$), en el caso del mineral Goethita, el modelo A no cuenta con su presencia, en el modelo B se encuentra en forma disuelta y en el modelo C y D en forma precipitada. En base a lo determinado en los índices de saturación, la hidrogeoquímica descrita y el tipo de iones dominantes en el agua subterránea, el modelo que mejor explican los procesos hidrogeoquímicos que dan como resultado la composición del agua es el modelo C, debido a que presentan la sobresaturación de compuestos ferrosos, como la Goetita se encuentra en forma precipitada. También los compuestos de carbonato se encuentran disueltos en el agua lo que va en línea con la composición del agua de la zona en conjunto con la precipitación de minerales que contienen silicatos como Clorita y Illita aportando de esta forma cationes y Sílice lo cual de forma secundaria aporta a la formación de bicarbonatos y con ello a la Alcalinidad presente en la zona. (Appelo y Postma, 1993, citado por Martínez y Osterrieth, 2013).

Tabla 13. Resultados de modelo inverso, transferencias molares de los minerales presentes en Boca Itata, ruta W3-W2.

Modelos W3-W2	Halita	Yeso	Calcita	Clorita	Moscovita	Biotita	Illita	Caolinita	Gibbsita	Montmorillonita	Fe(OH) ₃	Goethita
A	4,99E-04	3,33E-04	2,61E-03	-1,67E+01	-2,06E+01	2,90E+01	-1,41E+01	3,71E+01	2,44E+01	-1,71E-02	6,78E-08	-
B	4,99E-04	3,33E-04	2,61E-03	-1,67E+01	-2,06E+01	2,90E+01	-1,41E+01	3,71E+01	2,44E+01	-1,71E-02	-	6,78E-08
C	4,99E-04	3,33E-04	2,61E-03	-4,38E+00	-2,20E+00	8,13E+00	-9,87E+00	1,50E+01	-	-1,71E-02	2,98E+01	-2,98E+01
D	4,99E-04	3,33E-04	2,61E-03	-	-2,23E-04	-	4,70E-04	3,09E-02	-2,24E-02	-1,71E-02	3,83E+01	-3,83E+01

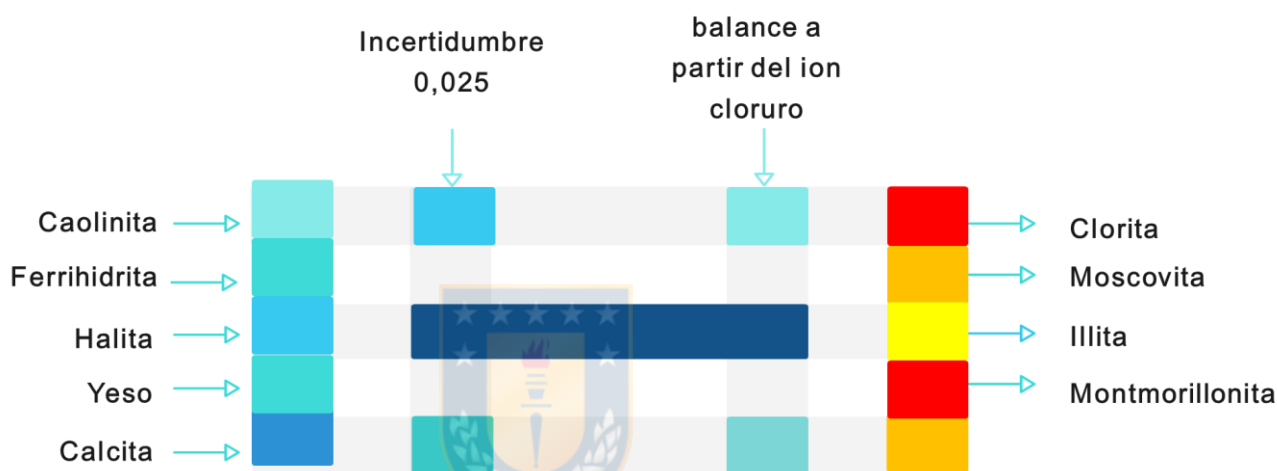


Figura 22. Resultados de modelo inverso, transferencias molares de los minerales presentes en Boca Itata, ruta W3-W2.

Para la ruta seleccionada entre el punto W1 y W2, PHREEQC se generó cinco modelos. En todos los modelos se produjo la disolución de Halita, Yeso, Goethita, Calcita y precipitación de Montmorillonita, Fe(OH)₃, Clorita y Moscovita lo cual tiene relación con lo analizado anteriormente, dado que los puntos muestreados se encuentran cercanos y siguen una trayectoria similar. La solubilidad de la Goethita (9,80E+02 mmol L⁻¹) fue mayor que la Calcita (1,26E-01 mmol L⁻¹) y el Yeso (2,49E-02 mmol L⁻¹), como se observa en la Tabla 14. Además, existieron diferencias entre los cinco modelos entregados por el programa, como es el caso de los minerales como Biotita, Halita y Illita, en donde se determinó que en algunos modelos los minerales se encontraban disueltos, en otros como precipitados o incluso algunos

modelos no contaban con estos minerales. En el caso del modelo A se observa la precipitación de Gibbsita ($-1,04E+00$ mmol L⁻¹) y no se encuentra presente Illita ni Biotita o Halita.

En el modelo B se presentó la disolución de Biotita ($7,20E+01$ mmol L⁻¹) y la precipitación de Illita ($-8,68E+01$ mmol L⁻¹), sin la presencia de Halita ni Gibbsita.

El modelo C presenta disolución de Illita ($4,48E-01$ mmol L⁻¹), Halita ($7,39E-03$ mmol L⁻¹) y Gibbsita ($2,61E-01$ mmol L⁻¹). Sin embargo, no existe presencia de Caolinita ni Biotita.

En el modelo D se determinó la disolución de minerales como Biotita ($5,16E-01$ mmol L⁻¹) y Halita ($1,48E-02$ mmol L⁻¹), sin presencia de Illita ni Gibbsita como en los demás modelos. El modelo E es similar al modelo D, solo que en este modelo hay presencia de disolución de Illita ($2,21E-01$ mmol L⁻¹); pero sin la presencia de Biotita.

Para seleccionar el modelo que es más representativo de los procesos hidrogeoquímicos que ocurren en el agua subterránea de la zona, es necesario tener en consideración los análisis la hidrogeoquímica del agua, los minerales presentes y las condiciones en que se encuentra el agua (Li et al., 2010). En base a ello los modelos siguen una buena representación de los procesos que pueden estar ocurriendo en el agua, como en el caso de la Halita, el Yeso y la Calcita que en los cinco modelos se encuentra en forma disuelta, por lo cual dentro de la ruta W1-W2 debería existir un aumento en los principales iones que forman parte de estos minerales como Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻ y Na²⁺, lo que es coincidente con los análisis hidrogeoquímicos. En relación con otros minerales importantes como Fe(OH)₃ o Goethita, que son los que se encuentran compuestos por Fe tienen mayor variación entre los modelos, en el caso de la Goethita esta se encuentra disuelta en todos los modelos entregados por el programa (A, B, C, D, E) y Fe(OH)₃ es todo lo contrario, siendo la precipitación el proceso que más se repite en los modelos lo que podría indicar que la disolución de Goethita produce la sobresaturación y posterior precipitación de Fe(OH)₃. Al hacer una comparación con la ruta W3-W2 siguen la

misma tendencia, presentando un claro aumento de los principales iones mayores presentes en el agua y el modelo que más se asimila entre las dos rutas es el modelo D. Además, este modelo presenta la mayoría de los minerales que se encuentran en el área y debido a su presencia en su mayoría en forma disuelta explican el aumento de las concentraciones de iones mayores como Fe_T , Ca^{2+} , HCO_3^- entre otros.

Tabla 14. Resultados de modelo inverso, transferencias molares de los minerales presentes en Boca Itata, ruta W1-W2.

Modelos W1-W2	Yeso	Calcita	Halita	Caolinita	Clorita	Gibbsita	Biotita	Moscovita	Illita	Goethita	Fe(OH) ₃	Montmorillonita
A	2,49E-02	1,26E-01	-	1,42	-	-1,04	-	-	-	9,80E+02	-9,80E+02	-7,75E-01
B	2,49E-02	1,26E-01	-	1,34E+02	3,89E+01		7,20E+01	-2,00E+01	8,68E+01	1,06E+03	-1,06E+03	-7,75E-01
C	1,76E-02	5,35E-02	7,39E-03	-	-2,22E-02	2,61E-01	-	-2,68E-01	4,48E-01	9,80E+02	-9,80E+02	-1,90E-01
D	2,57E-02	1,07E-01	1,48E-02	1,45	-3,08E-01	-	5,16E-01	-5,15E-01	-	5,67E+02	-5,67E+02	-5,40E-01
E	1,76E-02	5,35E-02	7,39E-03	1,76E-01	-1,09E-02	-	-	-1,32E-01	2,21E-01	9,80E+02	-9,80E+02	-1,90E-01

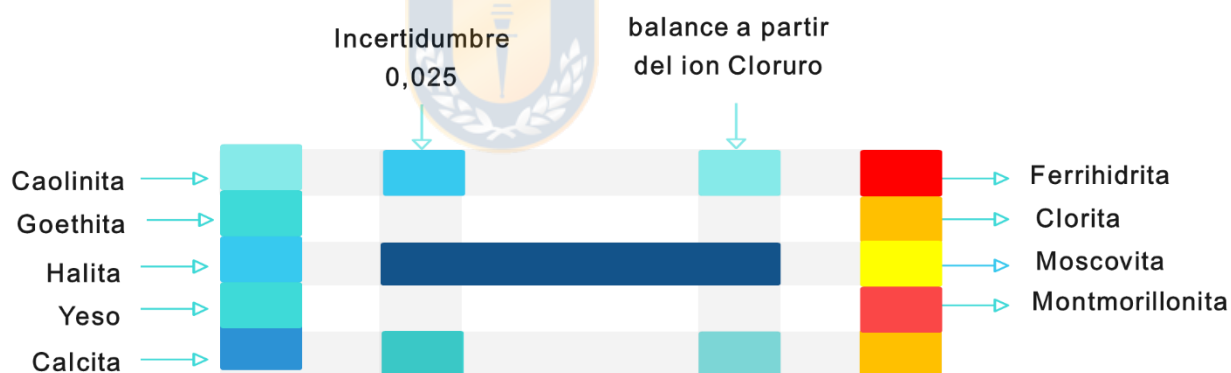


Figura 23. Resultados de modelo inverso, transferencias molares de los minerales presentes en Boca Itata, ruta W1-W2

Para poder realizar la validación se hizo una comparación entre el error del balance de masa calculado por el programa PHREEQC y el cálculo del error del balance de masas en Excel, mediante la ecuación que se encuentra en la sección de metodología, en donde se debe contar con los miliequivalentes de los cationes y aniones. También se utilizó un set de datos diferente de las mismas rutas seleccionadas como forma de validación, el cual se comportó de manera similar.

Por último, se determinó una comparación en base al comportamiento de resultados analíticos, realizando un análisis en base a la geoquímica general y mediante el comportamiento del agua en base a su clasificación mediante diagramas de Piper.

6.6 Monitoreo comunitario

Desde el año 2016 los vecinos de Boca Itata han desarrollado el monitoreo comunitario o participativo de la calidad del agua, que utilizan diariamente para consumo y riego. Esta iniciativa de monitorear la calidad del agua surge como una respuesta de la propia comunidad a la inquietud de conocer la calidad del agua que utilizan. Al no contar con sistemas de tratamiento o monitoreo produce una creciente incertidumbre entre los vecinos, sobre los riesgos que puede tener su utilización. Este estudio se clasifica dentro del enfoque colaborativo, donde los miembros de la comunidad aportan con datos relevantes para la investigación, tales como los puntos de muestreo, que permiten conocer de forma acertada la calidad de agua que utilizan, siendo un punto de partida para desarrollar el estudio. También es la misma comunidad a través de un grupo de personas y con constante apoyo científico, la que ha desarrollado el muestreo de los principales parámetros fisicoquímicos que se analizan. Esto permite que la comunidad se haga parte de la investigación, lo cual genera que los vecinos de esta zona estén informados. La participación del presidente de la Junta de Vecinos de Boca Itata Don Omar Gutiérrez ha sido fundamental en la difusión y es quien ha trabajado y dirigido activamente el monitoreo comunitario. Esta información generada se analiza y se transmite después de cada análisis desarrollado, entregando conocimiento sobre el estado químico del agua a la comunidad, mediante la visualización de los resultados, de forma sencilla y de fácil entendimiento.

La forma de organización con la que cuenta esta comunidad rural es mediante la Junta de vecinos, siendo esta la instancia más importante en la que se desarrollaron las capacitaciones previas y entrega de información sobre el diseño del estudio. Esto ha permitido que los vecinos de Boca Itata conozcan el estado químico del agua que utilizan. En este proceso siempre han sido acompañados por la Dra.

Mariela Yévenes, respecto de la realización del monitoreo de la calidad del agua proveniente de sus pozos por medio de kit portátiles para rangos de concentraciones en las que se encuentran parámetros como pH, Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Fe_T y Alcalinidad.

Los parámetros generados por los ciudadanos han sido de gran utilidad para la misma comunidad, que sirven de referencia y en base a la comparación con los análisis desarrollados en laboratorio, se ha encontrado una relación significativa entre ellos. Esta información generada es relevante para que las personas que habitan este sector rural conozcan que tipo de agua tienen, dado que ellos la utilizan periódicamente para riego incluso para consumo humano. Si bien son datos de referencia, éstos permiten tener un análisis constante de los parámetros fisicoquímicos que presenta el agua, de una forma sencilla y mucho más accesible, lo que permite aminorar la falta de datos que presentan estas comunidades rurales y generar un sistema de alerta en la población en caso de que las concentraciones de estos iones se encuentren por sobre los habituales.

Este tipo de estudio colaborativo permite generar mayor confianza entre las comunidades rurales y entidades que se encargan de este tipo de análisis, debido a que los voluntarios generan conocimiento y se encuentran informadas y lo transmiten a su comunidad. De esta manera, se presenta mayor interés en participar en este tipo de estudios y siempre con la iniciativa de desarrollar mejoras en su calidad de vida y la preocupación por el medio que los rodea.

7. CONCLUSIÓN

El estudio de monitoreo comunitario que consistió en la medición y el análisis de parámetros hidrogeoquímicos de las muestras de agua subterránea de cuatro pozos en la zona rural de Boca Itata, en la región de Ñuble, mostró que algunos parámetros como el NO_3^- se encontraban muy por sobre los límites permitidos en la normativa chilena para consumo de agua potable, superando los 50 mg L^{-1} . Este tipo de anomalía en el agua subterránea no está relacionado a la litología del lugar. No

obstante, las actividades antropogénicas que se desarrollan en la zona, como la agricultura, ganadería y la utilización de pozos sépticos, utiliza y genera niveles de amonio y nitrato que pueden quedar disponibles en el medio circundante. En ausencia de fuentes naturales de nitrógeno los valores de NO_3^- en el agua subterránea no debiesen superar los 10 mg L^{-1} . El Fe_T disuelto también registró algunas estaciones con niveles superiores permitidos por la normativa ($0,3 \text{ mg L}^{-1}$). El incremento de este parámetro trae consigo problemas de tipo estético en el agua o problemas en los sistemas de provisión de agua. Sin embargo, la alcalinidad presente en la zona proporcionó un sistema buffer que permitió equilibrar cambios bruscos en el pH del agua permitiendo de esta forma evitar incrustaciones y problemas de acidificación.

En base al diagrama de Piper este indicó que la mayoría de las muestras presentan un tipo de agua Ca (Mg) $-\text{HCO}_3$, aunque existen algunas muestras con Na-Cl y tipos de agua de mezcla las cuales fueron variando en las diferentes temporadas del año, pero los iones dominantes fueron principalmente Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} y HCO_3^- .

El análisis del agua utilizada por la comunidad rural contiene altas concentraciones de iones como NO_3^- , Fe_T y As_T en los puntos W1, W2 y W3. Por lo que al utilizar el índice de calidad del agua creado por la Dirección General de Aguas (DGA), se determinó que el agua se encuentra dentro de la categoría Regular, lo que implica que esta no puede ser utilizada como agua de consumo humano, debido a que sobrepasa las concentraciones permitidas por la organización mundial de la salud (OMS) y por la normativa chilena de agua para consumo humano, en iones que pueden afectar la salud de las personas. El agua puede seguir siendo utilizada para riego agrícola o someterla a procesos de saneamiento. Sin embargo, el punto W4 el cual se presenta como el punto que presenta mayores diferencias en las concentraciones de iones mayores, que se encuentra más alejado de los demás puntos y presenta mayor cercanía a la superficie, presentaría condiciones químicas generales óptimas para el uso de la comunidad.

Al analizar la modelación inversa se registra la influencia de la litología en la química del agua de Boca Itata, donde la disolución de minerales de carbonato juega un rol

fundamental en la composición del agua, puesto que minerales como la Calcita, Dolomita, Yeso y Halita se encontraron en la trayectoria de forma disuelta produciendo un incremento en la concentración de iones mayores. Otros factores que influyen en la composición química del agua es la precipitación de compuestos que contienen Fe^{2+} lo que intensifica los altos niveles de este ion. De acuerdo con el análisis desarrollado con la modelación inversa, en conjunto con el análisis de la geoquímica de la zona, se determinó que de todas las estaciones analizadas el punto W4, presentaría condiciones químicas generales óptimas para la implementación de un sistema de agua potable rural (APR), dado que es este punto es donde la composición del agua presenta mejores condiciones químicas y no presenta grandes cambios producto de la geología de la zona y la actividad antropogénica.

En este estudio cabe destacar la importancia que ha tenido la comunidad rural de Boca Itata, quienes debido a sus inquietudes buscaron y fueron parte del desarrollo de un proyecto de ciencia ciudadana. Para poder determinar cuál es la calidad del agua que utilizan diariamente, un recurso natural esencial para las personas y que en muchos lugares de nuestro país aún existen comunidades que no cuentan con el apoyo necesario para desarrollar estas investigaciones, debido principalmente a limitaciones presupuestarias y de conocimiento científico. Este tipo de iniciativas son un aporte a la generación de conocimiento y la participación de las personas, lo que trae consigo mayor confianza y vinculación con temas tan importantes como la calidad del agua.

Este tipo de iniciativas se puede implementar de forma sencilla mediante organizaciones sociales, juntas de vecinos o grupos interesados y puede permitir generar un sistema de vigilancia, en donde los propios participantes identifican posibles problemas en el agua y pueden alertar a la comunidad ante estos casos, para poder buscar el origen del problema y encontrar soluciones con la ayuda de investigadores, científicos u organismos del estado encargados de estos temas.

Además, este tipo de investigación permite aportar al desarrollo de objetivos de desarrollo sostenible (ODS), enfocándose principalmente en el objetivo número 6

denominado agua limpia y saneamiento, ya que existen miles de millones de personas (principalmente en áreas rurales) que aún carecen de estos servicios básicos. Desarrollar mayores estudios sobre la calidad del agua que utilizan permite disminuir la inseguridad sobre el agua que utilizan diariamente y con ello poder identificar los principales problemas que trae consigo su utilización, para de esta forma buscar alternativas y soluciones.

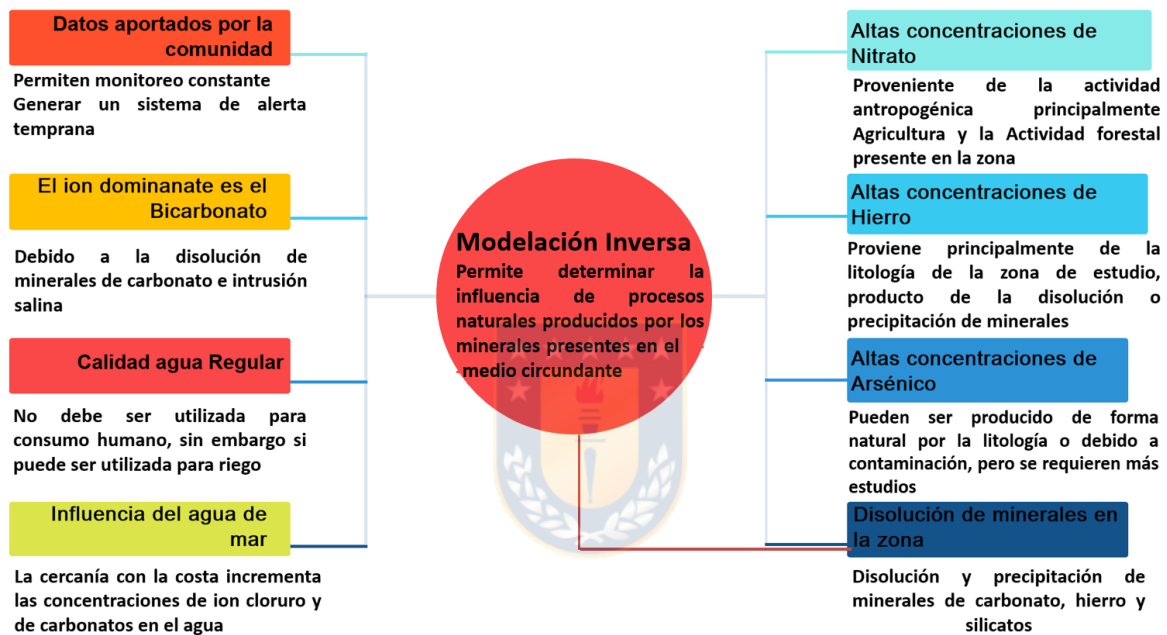


Figura 24. Principales Conclusiones.

8. SUGERENCIAS:

- Es necesario desarrollar más análisis sobre el Arsénico en su forma de Arsenito, la cual llega a ser más tóxica para la salud de las personas y estudiar a profundidad las posibles fuentes de Nitrato en el agua subterránea.
- Desarrollar mayores estudios sobre la geología de la zona de estudio, ya que este estudio solo se desarrolló en base a la revisión bibliográfica de minerales que posiblemente están en la zona de estudio.



9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (DCPRH), D. d. C. y. P. d. R. H. (2019). *Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de las regiones de Ñuble y del Biobío* (MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS, Issue).
- Abdelshafy, M., Saber, M., Abdelhaleem, A., Abdelrazek, S. M., & Seleem, E. M. (2019, 2019/11/01/). Hydrogeochemical processes and evaluation of groundwater aquifer at Sohag city, Egypt. *Scientific African*, 6, e00196.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00196>
- Abdenmour, M. A., Douaoui, A., Barrena, J., Pulido, M., Bradaï, A., Bennacer, A., Piccini, C., & Alfonso-Torreño, A. (2021, 2021/04/01). Geochemical characterization of the salinity of irrigated soils in arid regions (Biskra, SE Algeria). *Acta Geochimica*, 40(2), 234-250.
<https://doi.org/10.1007/s11631-020-00426-2>
- Aguilera, P. F. J., Vivanco, M. A., & Sancha, F. A. M. (2010). *METODOLOGÍA PARA DETERMINAR CALIDAD NATURAL EN ACUIFEROS* UNIVERSIDAD DE CHILE].
- Alves, J. d. P. H. e. a. (2021). Hydrogeochemical characterization of reservoir waters undergoing salinization processes in Northeastern Brazil. *RBRH [online]*, 26.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120210043>.
- Amadori, M., Morini, G., Piccolroaz, S., & Toffolon, M. (2020, 03/01). Involving citizens in hydrodynamic research: A combined local knowledge - numerical experiment on Lake Garda, Italy. *Science of The Total Environment*, 722, 137720.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137720>
- Amsteins, O. K. P., Díaz, R. I., & Caputo, G. L. (2013). *Monitoreo ambiental participativo y Ciencia Ciudadana en el Lago Panguipulli: análisis de caso y propuestas para su conservación, Región de Los Ríos, Chile* Universidad Austral de Chile].
- Aquaterra Ingenieros Limitada. (2011). Estudio Hidrogeológico Cuencas Biobío e Itata, tomo I informe final *Ministerio de Obras Públicas Dirección General de Agua*.
- Arumí, R. J. L., & Oyarzún, L. R. A. (2006). Las aguas subterráneas en Chile. *Boletín Geológico y Minero*, 37-45.

- Baalbaki, R., Ahmad, S. H., Kays, W., Talhouk, S. N., Saliba, N. A., & Al-Hindi, M. (2019, Feb). Citizen science in Lebanon - a case study for groundwater quality monitoring. *Royal Society Open Science*, 6(2), Article 181871. <https://doi.org/10.1098/rsos.181871>
- Baeza, E. G. (2020). *Importancia de las aguas subterráneas y experiencias chilena y extranjera sobre su gestión.*
- Barzegar, R., Asghari Moghaddam, A., Nazemi, A. H., & Adamowski, J. (2018, 2018/08/27). Evidence for the occurrence of hydrogeochemical processes in the groundwater of Khoy plain, northwestern Iran, using ionic ratios and geochemical modeling. *Environmental Earth Sciences*, 77(16), 597. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7782-y>
- Bécher, Q., Fátima Noelia, & Blarasin, M. (2015, 2015-12). Evaluación de relaciones acuífero libre - lagunas mediante modelación hidrogeoquímica e isotópica en la planicie medanosa del sur de Córdoba - Argentina. *Serie correlación geológica*, 31(2). http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1666-94792015000200002&lang=es
- Bonney, R., Cooper, C. B., Dickinson, J., Kelling, S., Phillips, T., Rosenberg, K. V., & Shirk, J. (2009). Citizen Science: A Developing Tool for Expanding Science Knowledge and Scientific Literacy. *BioScience*, 59(11), 977-984. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.11.9>
- Breuer, L., Hiery, N., Kraft, P., Bach, M., Aubert, A. H., & Frede, H.-G. (2015, 2015/11/12). HydroCrowd: a citizen science snapshot to assess the spatial control of nitrogen solutes in surface waters. *Scientific Reports*, 5(1), 16503. <https://doi.org/10.1038/srep16503>
- Brintrup, K., Amigo, C., Fernández, J., Hernández, A., Pérez, F., Félez-Bernal, J., Butturini, A., Saez-Carrillo, K., Yevenes, M. A., & Figueroa, R. (2019). Comparison of organic matter in intermittent and perennial rivers of Mediterranean Chile with the support of citizen science. *Revista chilena de historia natural*, 92. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0716-078X2019000100203&nrm=iso
- Brouwer, S., Van der Wielen, P. W. J. J., Schriks, M., Claassen, M., & Frijns, J. (2018). Public Participation in Science: The Future and Value of Citizen Science in the Drinking Water Research. *Water*, 10(3), 284. <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/3/284>
- Bustamante, I., Elizabeth Arely. (2017). *Identificación de procesos hidrogeoquímicos aplicando modelación inversa en el acuífero Soconusco, Chiapas*
- Bustos, G., F. . (2019). *Avistamientos, hábitat y coloración de élitros en Harmonia axyridis en Chile en función de la latitud y época del año, a partir de una iniciativa de ciencia ciudadana*

[Seminario de título para optar al Título de Bióloga con mención en Medio ambiente,
<http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/174853>

Buytaert, W., Zulkafli, Z., Grainger, S., Acosta, L., Alemie, T. C., Bastiaensen, J., De Bièvre, B., Bhusal, J., Clark, J., Dewulf, A., Foggin, M., Hannah, D. M., Hergarten, C., Isaeva, A., Karpouzoglou, T., Pandeya, B., Paudel, D., Sharma, K., Steenhuis, T., Tilahun, S., Van Hecken, G., & Zhumanova, M. (2014, 2014-October-22). Citizen science in hydrology and water resources: opportunities for knowledge generation, ecosystem service management, and sustainable development [Review]. *Frontiers in Earth Science*, 2(26).
<https://doi.org/10.3389/feart.2014.00026>

Campbell, K. M., & Nordstrom, D. K. (2014). Arsenic Speciation and Sorption in Natural Environments. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 79(1), 185-216.
<https://doi.org/10.2138/rmg.2014.79.3>

Chandrasekar, T., Sabarathinam, C., Nadesan, D., Rajendiran, T., Banajarani Panda, B. R., Keesari, T., Mohan Viswanathan, P., Utharapathi, V., & Alagappan, R. (2019, 2019/04/01/). Geochemical (process based) characterization of groundwater along the KT boundary of South India. *Geochemistry*, 79(1), 62-77.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoch.2018.11.005>

Charlton, S. R., & Parkhurst, D. L. (2011). Modules based on the geochemical model PHREEQC for use in scripting and programming languages. *Computers & Geosciences*, 37(10), 1653-1663. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.02.005>

Consulting regional group. (2016). *Estudio Actualización Plan Desarrollo Comunal de Trehuaco*.

Custodio, E., & Llamas, M. R. (1976). *Hidrología subterránea* (Vol. 2). Omega Barcelona.

Daniele, L., Vallejos, Á., Corbella, M., Molina, L., & Pulido-Bosch, A. (2013, 2013/02/01/). Hydrogeochemistry and geochemical simulations to assess water–rock interactions in complex carbonate aquifers: The case of Aguadulce (SE Spain). *Applied Geochemistry*, 29, 43-54. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.11.011>

DCPRH, D. d. C. y. P. d. R. H. (2020). *Seguimiento de Calidad de Agua Subterránea en pozos APR-Periodo 2019*.

Delgado, S., Verónica, Arumí, R., José Luis, & Reicher, S., Oscar. (2017). PROBLEMAS QUE PLANTEA LA REGULACIÓN DE LAS ÁREAS DE PROTECCIÓN DE LOS DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN CHILE, CUANDO SIRVEN A CAPTACIONES DE AGUA POTABLE. *Revista de derecho (Coquimbo)*, 24, 143-180.

http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-97532017000200143&nrm=iso

Dhiman, S. D., & Keshari, A. K. (2006, 2006/09/01). GIS assisted inverse geochemical modeling for plausible phase transfers in aquifers. *Environmental Geology*, 50(8), 1211-1219.

<https://doi.org/10.1007/s00254-006-0293-2>

Dickinson, J. L., Shirk, J., Bonter, D., Bonney, R., Crain, R. L., Martin, J., Phillips, T., & Purcell, K. (2012). The current state of citizen science as a tool for ecological research and public engagement. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10(6), 291-297.

Esmaeili, A., Moore, F., & Keshavarzi, B. (2014, 2014/10/01). Nitrate contamination in irrigation groundwater, Isfahan, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 72(7), 2511-2522.

<https://doi.org/10.1007/s12665-014-3159-z>

Freeze, A. R., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater* (M. A. O. G. M. Rafael Huizar Álvarez (México), Gloria Salazar Ramirez (Mexico), José Joel Carrillo Rivera Trans.).

Fuentes, A. H. A. (2013). *ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA OXIDACIÓN DE HIERRO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DE ABASTECIMIENTO A TRAVÉS DE AIREACIÓN* Universidad del Bío-Bío].

Fundacion Chile. (2018). *RADIOGRAFÍA DEL AGUA BRECHA Y RIESGO HÍDRICO EN CHILE* (978-956-8200-42-8).

Galli, M. G., Martínez, D. E., Kruse, E. E., & Lima, M. (2013). Procesos hidrogeoquímicos en las aguas subterráneas de la cuenca de la laguna Mar Chiquita, provincia de Buenos Aires. VIII Congreso Argentino de Hidrogeología y VI Seminario Latinoamericano sobre Termas Actuales de la Hidrología Subterránea (La Plata, 17 al 20 de septiembre de 2013).

González, L., Mardones, M., Silva, A., & Campos, E. (1999). Hidrogeoquímica y comportamiento del agua subterránea en la cuenca del río Claro, Región del Biobío, Chile. *Revista geológica de Chile*, 26, 145-157. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0716-02081999000200001&nrm=iso

González, L., Silva, A., & M, A. (2000, 09/11). VULNERABILIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS DE LA CUENCA DEL RIO CLARO, VIII REGION DEL BIO-BIO, CHILE. *Revista Águas Subterrâneas*, 0.

GORE Biobío , G. R. D. B. (2009). *Estudio Base para la Elaboración de una Política Pública Regional para el Manejo Integrado de Zonas Costeras de la Región del Bío-Bío*.

- Gutiérrez, F., Pincetti, G., Payacán, Í., Tristram, E., & Vela, I. (2015). *Composición Natural de Las Aguas en la Cuenca alta del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca, Santiago*. XIV Congreso Geológico Chileno.
- Haklay, M., Mazumdar, S., & Wardlaw, J. (2018). Citizen Science for Observing and Understanding the Earth. In (pp. 69-88). https://doi.org/10.1007/978-3-319-65633-5_4
- Hatch, K. G. (2018). Capitulo 7. Agua Subterránea en México, retos y pendientes para la transformación de su gestión. In.
- Herrera Apablaza, V., Gutiérrez Roa, N., Córdova Molina, S., Luque Marín, J., Idelfonso Carpanchay, M., Flores Riveras, A., & Romero A., L. (2018). Calidad del agua subterránea para el riego en el Oasis de Pica, norte de Chile. *Idesia (Arica)*, 36, 181-191. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292018000200181&nrm=iso
- Herrera, C., & Custodio, E. (2014, 05/01). Origin of waters from coast of Chile, small springs located at the northern in the vicinity of Antofagasta. *Andean geology*, 41, 314-341. <https://doi.org/10.5027/andgeoV41n2-a03>
- Herrera, C., Pueyo, J. J., Sáez, A., & Valero-Garcés, B. L. (2006). Relación de aguas superficiales y subterráneas en el área del lago Chungará y lagunas de Cotacotani, norte de Chile: un estudio isotópico. *Revista geológica de Chile*, 33, 299-325. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0716-02082006000200005&nrm=iso
- Herrera, V., Carrasco, C., Araneda, P., & Sandoval, J. M. (2019). CHEMICAL QUALITY OF URBAN AND RURAL DRINKING WATER, IN TARAPACA, NORTHERN ARID AREA OF CHILE. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 64, 4421-4427. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-97072019000204421&nrm=iso
- Ibrahim, R. G. M. (2019, 2019/04/23). Factors affecting groundwater quality in the area between Safaga and El Quseir, Eastern Desert, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(9), 285. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4411-3>
- Kuldip, S., Hundal, H. S., & Dhanwinder, S. (2011, 2011/12/01). Geochemistry and assessment of hydrogeochemical processes in groundwater in the southern part of Bathinda district of Punjab, northwest India. *Environmental Earth Sciences*, 64(7), 1823-1833. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-0989-9>
- Lecomte, K. L. (2003). VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS GEOQUÍMICOS

REALIZADOS CON UN SOFTWARE ESPECÍFICO *Problemas del Conocimiento en Ingeniería y Geología, Vol I.*

Lecomte, K. L., García, M. G., Fórmica, S. M., & Depetris, P. J. (2011). Hidroquímica de ríos de montaña (Sierras de Córdoba, Argentina): Elementos mayoritarios disueltos. *Latin American journal of sedimentology and basin analysis*, 18(1), 43-62.

Li, P.-y., Qian, H., Wu, J.-h., & Ding, J. (2010, 2010/09/01/). Geochemical modeling of groundwater in southern plain area of Pengyang County, Ningxia, China. *Water Science and Engineering*, 3(3), 282-291. <https://doi.org/https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2010.03.004>

Lillo, J. (2008, 01/01). Peligros geoquímicos: Arsénico de origen natural en las aguas.

López, M. A. S. (2016). *Ciencia ciudadana como experiencia científica y educativa en jóvenes de la comuna de Valdivia: Evaluación de sus conocimientos y actitudes entorno a los humedales* Universidad Austral de Chile].

Lozada, T. J. A. (2018). *Identificación de los procesos hidrogeoquímicos en el Sistema Lagunar Montebello, mediante la modelación inversa en PHREEQC* Universidad Nacional Autónoma de México, México]. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/438212>

Mahaqi, A., Moheghi, M. M., Mehqi, M., & Moheghi, M. A. (2018, 2018/08/06). Hydrogeochemical characteristics and groundwater quality assessment for drinking and irrigation purposes in the Mazar-i-Sharif city, North Afghanistan. *Applied Water Science*, 8(5), 133. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0768-9>

Martinez, D. E., Bocanegra, E. M., & Manzano, A., Marisol. (2000). La modelación hidrogeoquímica como herramienta en los estudios hidrogeológicos. *Boletín Geológico y Minero*, 83-97. http://www.igme.es/Boletin/2000/111_4.htm#5

Martínez, D. E., & Osterrieth, M. (2013). GEOQUIMICA DE LA SILICE DISUELTA EN EL ACUIFERO PAMPEANO EN LA VERTIENTE SUDORIENTAL DE TANDILIA. *Revista facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 66, 9-23.

Mayorga, M. P. (2013). *ARSENICO EN AGUAS SUBTERRANEAS SU TRANSFERENCIA AL SUELO Y A LA PLANTA* Universidad de Valladolid].

Meier, F., Fenner, D., Grassmann, T., Jänicke, B., Otto, M., & Scherer, D. (2015). *Challenges and benefits from crowdsourced atmospheric data for urban climate research using Berlin, Germany, as testbed.*

- Miller-Rushing, A., Primack, R., & Bonney, R. (2012). The history of public participation in ecological research. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10(6), 285-290.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1890/110278>
- Mohamed, M. (2003). *Dynamics of nitrate contamination in the groundwater system (A case study in the Kakamigahara area, Gifu Prefecture, central Japan)*. Nagoya University].
- Munizaga, F., Aguirre, L., & Herve, F. (1973, 1973/02/01/). Rb/Sr ages of rocks from the Chilean metamorphic basement. *Earth and Planetary Science Letters*, 18(1), 87-92.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0012-821X\(73\)90038-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0012-821X(73)90038-1)
- Naderi Peikam, E., & Jalali, M. (2016, 2016/04/25). Application of inverse geochemical modelling for predicting surface water chemistry in Ekbatan watershed, Hamedan, western Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 61(6), 1124-1134.
<https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1016947>
- Nerbonne, J., & Nelson, K. (2004, 10/01). Volunteer Macroinvertebrate Monitoring in the United States: Resource Mobilization and Comparative State Structures. *Society & Natural Resources - SOC NATUR RESOUR*, 17, 817-839.
<https://doi.org/10.1080/08941920490493837>
- Nissen M., J., Garay V., M., Aguilera M., A., & Valenzuela F., E. (2000, 2000-01-31). CALIDAD DE AGUAS SUBTERRANEAS DE LA DECIMA REGION DE CHILE. *Agro Sur*(1), 25-39%V 28.
<https://doi.org/10.4206/agrosur.2000.v28n1-03>
- Njue, N., Stenfert Kroese, J., Gräf, J., Jacobs, S. R., Weeser, B., Breuer, L., & Rufino, M. C. (2019, 2019/11/25/). Citizen science in hydrological monitoring and ecosystem services management: State of the art and future prospects. *Science of The Total Environment*, 693, 133531. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.337>
- Parkhurst, D., & Appelo, T. (2013). *Parkhurst DL, Appelo CAJ (2013) Description of input and examples for PHREEQC version 3—a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. US Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap A43, p 497. Available only at http://pubs.usgs.gov/tm/06/a43.*
- Parkhurst, D. L. (1995). *USER'S GUIDE TO PHREEQC A COMPUTER PROGRAM FOR SPECIATION, REACTION-PATH, ADVECTIVE-TRANSPORT, AND INVERSE GEOCHEMICAL CALCULATIONS* (Water-Resources Investigations Report, Issue.

- Parkhurst, D. L., & Appelo, C. (1999). A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. *USGS report*.
- Paul, J. D., Buytaert, W., Allen, S., Ballesteros-Cánovas, J. A., Bhusal, J., Cieslik, K., Clark, J., Dugar, S., Hannah, D. M., Stoffel, M., Dewulf, A., Dhital, M. R., Liu, W., Nayaval, J. L., Neupane, B., Schiller, A., Smith, P. J., & Supper, R. (2018). Citizen science for hydrological risk reduction and resilience building. *WIREs Water*, 5(1), e1262.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/wat2.1262>
- Perevochtchikova, M., & Sandoval-Romero, G. E. (2020). Monitoreo comunitario participativo del agua en la periferia suroeste de la Ciudad de México. *Investigaciones geográficas*.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112020000300007&nrm=iso
- Plummer, L. N., Busenberg, E., Glynn, P. D., & Blum, A. E. (1992, 1992/08/01/). Dissolution of aragonite-strontianite solid solutions in nonstoichiometric Sr (HCO₃)₂-Ca (HCO₃)₂-CO₂-H₂O solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(8), 3045-3072.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90289-U](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90289-U)
- Rabia, S., Guendouz, A., Trolard, F., Moulla, A., Hamdi-Aissa, B., & Bourrié, G. (2017, 03/21). Identification of dominant hydrogeochemical processes for groundwaters in the Algerian Sahara supported by inverse modeling of chemical and isotopic data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 1669-1691. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1669-2017>
- Rafighdoust, Y., Eckstein, Y., Harami, R. M., Gharaie, M. H. M., & Mahboubi, A. (2016, 2016/03/17). Using inverse modeling and hierarchical cluster analysis for hydrochemical characterization of springs and Talkhab River in Tang-Bijar oilfield, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(3), 241. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2129-4>
- Renaud, F., & Schuster-Wallace, C. (2017). Groundwater and Human Security.(pp. 1–20). *UN Environment on behalf of UN Water ISBN(978-92)*, 808-6082.
- Rivas, Y., Rivera, D., Gallardo, R., Lagos, E., Yevenes, M., Zambrano, F., & Mendoza, J. (2020). Water availability, quality, and use in rural communities of the Chilean Coastal Range. *Journal of Soil and Water Conservation*, 75(1), 75-90. <https://doi.org/10.2489/jswc.75.1.75>
- Rivera-Rodríguez, D. A., Beltrán-Hernández, R. I., Lucho-Constantino, C. A., Coronel-Olivares, C., Hernández-González, S., Villanueva-Ibáñez, M., Nolasco-Arizmendi, V., & Vázquez-Rodríguez, G. A. (2019, 2019/05/01). Water quality indices for groundwater impacted by geogenic background and anthropogenic pollution: case study in Hidalgo, Mexico. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(5), 2201-2214.
<https://doi.org/10.1007/s13762-018-1852-2>

Rozzi, R., Massardo, F., Anderson, C., Heidinger, K., & Silander, J. (2006, 06/01). Ten Principles for Biocultural Conservation at the Southern Tip of the Americas: the Approach of the Omora Ethnobotanical Park. *Ecology and Society*, 11. <https://doi.org/10.5751/ES-01709-110143>

Ruiz, R. E., & Martínez, S. M. (S.F). *HIDROLOGÍA APLICADA*

TEMA 6. MODELOS HIDROGEOQUÍMICOS.

https://ocw.ehu.es/pluginfile.php/47726/mod_resource/content/1/Material_Docente/Tema_6_Modelos_V2.pdf

Sánchez, F., J. (2012). *Evolución geoquímica de las aguas subterráneas* Universidad de Salamanca]. http://hidrologia.usal.es/temas/Evolucion_geoquimica.pdf

SERNAGEOMIN. (2003). *Mapa Geológico de Chile: versión digital*. . Geológica Digital, Servicio Nacional de Geología y Minería.

Shakerkhatibi, M., Mosaferi, M., Pourakbar, M., Ahmadnejad, M., Safavi, N., & Banitorab, F. (2019, 2019/04/01/). Comprehensive investigation of groundwater quality in the north-west of Iran: Physicochemical and heavy metal analysis. *Groundwater for Sustainable Development*, 8, 156-168. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.10.006>

Sharif, M. U., Davis, R. K., Steele, K. F., Kim, B., Kresse, T. M., & Fazio, J. A. (2008, 2008/02/15/). Inverse geochemical modeling of groundwater evolution with emphasis on arsenic in the Mississippi River Valley alluvial aquifer, Arkansas (USA). *Journal of Hydrology*, 350(1), 41-55. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.027>

Tejeda, I., & Medrano, F. (2018). El potencial de la ciencia ciudadana para el estudio de las aves urbanas en Chile.

Tetzlaff, D., Carey, S. K., McNamara, J. P., Laudon, H., & Soulsby, C. (2017). The essential value of long-term experimental data for hydrology and water management. *Water Resources Research*, 53(4), 2598-2604.

Tziritis, E., Skordas, K., & Kelepertsis, A. (2016, 2016/02/12). The use of hydrogeochemical analyses and multivariate statistics for the characterization of groundwater resources in a complex aquifer system. A case study in Amyros River basin, Thessaly, central Greece. *Environmental Earth Sciences*, 75(4), 339. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5204-y>

United Nations. (2018). *Sustainable Development Goal 6 Synthesis Report 2018 on Water and Sanitation*.

- Witkowski, A. J., Rubin, H., Jakóbczyk-Karpierz, S., & Rubin, K. (2018). APPLICATION OF GEOCHEMICAL MODELING FOR THE IDENTIFICATION OF MAIN PROCESSES AFFECTING CHANGES IN THE QUALITY OF GROUNDWATER IN THE ŁAZY BŁĘDOWSKIE WELL FIELD, SOUTHERN POLAND. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 18(1.2), 75-82.
- WWAP, P. M. d. E. d. I. R. H. d. I. U. (2019). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás.* .
- Yevenes, M. (2016). *Participatory water quality monitoring in rural areas of Central Chile* 1er Congreso Iberoamericano de Limnología CIL-2016, XIII Congreso Sociedad Chilena de Limnología,
- Yevenes, M. (2018). *Monitoreo comunitario de la calidad del agua en la microcuenca Boca Itata, Trehuaco, Región del Ñuble, Chile* Central Seminario internacional G-WADI - Ciencia ciudadana para el manejo del agua y la sequía, Santiago de Chile.
- Younes, S. (2012, 12/31). Geochemical Evolution of Groundwater in Meng Xu Area, Gui Ping City, Southern China. *Procedia Engineering*, 33, 340–350.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1213>

