

Hidrogeología y modelo conceptual del acuífero de Petorca en el sector alto de la cuenca homónima. Región de Valparaíso, Chile

Hydrogeology and aquifer conceptual model of Petorca's upper basin (Valparaíso, Chile)



Justinne Andrea Rybertt Goldammer  orcid.org/0000-0002-6564-2288

Universidad Andrés Bello (UNAB), Chile

 jrybertt.g@gmail.com

RESUMEN

En Chile, desde hace más de diez años, se vive un intenso proceso de sequía, siendo la zona central, donde se ubica la localidad de Petorca, una de las más afectadas. Es por esto, que el propósito del presente estudio es contribuir con información para mejorar la gestión hídrica de la cuenca, detallando el funcionamiento de la parte superior del acuífero de Petorca, el tipo de recarga que prima, la circulación del agua subterránea y los factores que afectan su composición y disponibilidad. Para lograrlo, se desarrollaron trabajos de recopilación de información y campañas de terreno, cuyos datos fueron utilizados para la formulación de mapas piezométricos, la caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas, un balance hídrico entre los años 2010-2018 y finalmente, la elaboración del modelo conceptual del acuífero de Petorca.

Los resultados de estos análisis muestran que se trataría de un acuífero libre donde su configuración geométrica está controlada por estructuras regionales de rumbo NS a NW. Además, se plantea cómo las influencias tanto de factores naturales como antrópicos han generado una disminución tanto en la calidad como en la disponibilidad de aguas subterráneas a través del tiempo, siendo el factor humano el que ha generado un mayor impacto en las características de las aguas.

PALABRAS CLAVE: acuífero de Petorca, balance hídrico, modelo conceptual.

ABSTRACT

In Chile there has been an intense drought process for more than ten years, being the central area, where Petorca is located, one of the most affected. The purpose of this study is to contribute information to improve the water management of the basin, detailing the operation of the upper part of the Petorca aquifer, the type of recharge that prevails, the circulation of groundwater and the factors that affect its composition and availability. To achieve this, information gathering work and field campaigns were developed, the data of which were used for the formulation of piezometric maps, the hydrochemical characterization of groundwater, a water balance between the years 2010-2018 and finally, the elaboration of the model concept of the Petorca aquifer.

The results of the study reveal that the Petorca aquifer is unconfined, where its geometric configuration is controlled by regional structures from NS to NW strike. In addition, it is proposed that the influence of meteorological and anthropic factors has generated a decrease in the quality, availability of groundwater over time, the anthropic factors are the one that has generated the greatest impact on the natural characteristics of Groundwater.

KEYWORDS: hydrogeology, Petorca acuífer, underground water, water balance, conceptual model.

INTRODUCCIÓN

La importancia de las aguas subterráneas en la naturaleza se ve reflejada en la contribución de estas al ciclo hidrológico, además, es un recurso natural renovable y de esencial importancia para la civilización, se utiliza para el abastecimiento de agua potable tanto en viviendas individuales como en aglomeraciones urbanas, en proyectos agropecuarios y en muchas industrias consumidoras de grandes cantidades de agua, como la minería (Vélez, 1999).

La composición química del agua subterránea es el resultado de continuos procesos de interacción entre el agua de precipitación que se infiltra en el terreno y la litología por donde circula (González-Abraham, 2012). Se debe destacar el papel que desempeña el factor antrópico en la composición química de esta, puesto que la actividad del hombre causa un deterioro progresivo de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas (Fagundo, 2010).

En la comuna de Petorca, al igual que en muchos lugares del país, hay una fuerte escasez hídrica lo que ha provocado que el río Petorca se encuentre mayormente seco. Los principales usos de agua en esta zona son la agricultura de frutícolas, seguido de la industria minera y el abastecimiento de agua potable (INE, 2007). Sin embargo, la extracción es tal, que ha dejado algunos sectores sin agua para este último uso (Depto. de Recursos Hídricos, 2016).

Si bien, se conoce la problemática que afecta al valle de Petorca, en el sector alto de la cuenca sólo se dispone de datos parcelados de las características y/o propiedades del acuífero. Por lo que, no existe claridad de cómo es el funcionamiento de este, los materiales que lo componen y sus dimensiones, así como el movimiento de las aguas subterráneas y que factores lo controlan.

Según Cica *et al.* (1979) en la cuenca del río Petorca se reconoce en los sedimentos antiguos, un acuífero pobre y posibles acuíferos confinados, mientras que en la capa de sedimentos recientes situados en los primeros 5 a 30 m, se ubica un acuífero libre de mejores características. Cade-Idepe Consultores (2004), concuerda con Cica señalando que el espesor de los depósitos recientes, donde se ubica el acuífero superior, varía entre los 8 y 25 m. Por otro lado, en el Mapa Hidrogeológico Nacional sugieren que el espesor del acuífero superior tendría no más de 10 m, además, GCF Ingenieros Ltda. (2011) plantea que no existe una diferenciación clara de acuíferos, indicando que se observan napas predominantemente libres y sólo variaciones estratigráficas locales.

Definir el modelo conceptual hidrogeológico, realizar un balance hídrico y analizar la composición de las aguas del sector contribuirá a responder estas dudas, dicha información estará disponible para la comunidad y autoridades con el fin de avanzar hacia una gestión sostenible del uso del agua.

Gran parte de los resultados del presente artículo surgen del trabajo de Rybertt (2019).

Área de estudio

La zona de estudio (**Figura 1**) se ubica en el límite noreste de la Región de Valparaíso, comprende las tres primeras subcuencas de Petorca, es decir, Río Pedernales, Río Sobrante y Río Petorca Oriente, abarcando 1.018 km². Dentro de estas se encuentra

el acuífero de Petorca, limitado a los depósitos fluvio-aluviales con un área de 80,6 km².

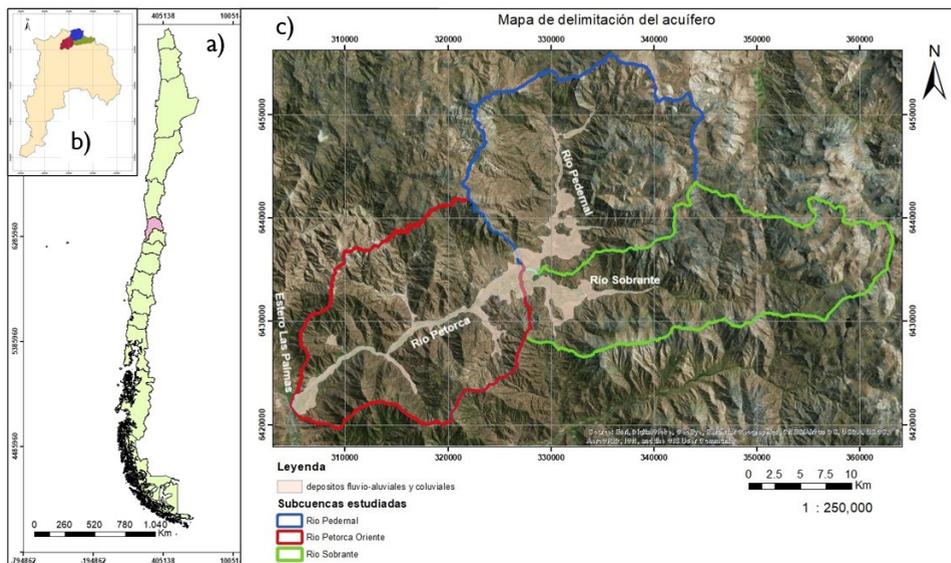


Figura 1. Localización del área de estudio, a) en rosado destaca la región de Valparaíso, b) y c) en rojo, verde y azul destacan las subcuencas estudiadas.

Geológicamente (**Figura 2**), se caracteriza por rocas estratificadas sedimentarias, volcánicas y volcanoclásticas de origen continental y unidades intrusivas, dispuestas en franjas NS con edades desde el Cretácico Inferior al Terciario Superior (Rivano, 1993). El basamento de esta cuenca es considerado prácticamente impermeable, salvo en casos particulares donde, debido al fracturamiento asociado a procesos tectónicos extensivos-compresivos u otras variables que aumenten el grado de permeabilidad del sistema, derivan en la formación de vertientes estructurales (GCF Ingenieros Ltda., 2011).

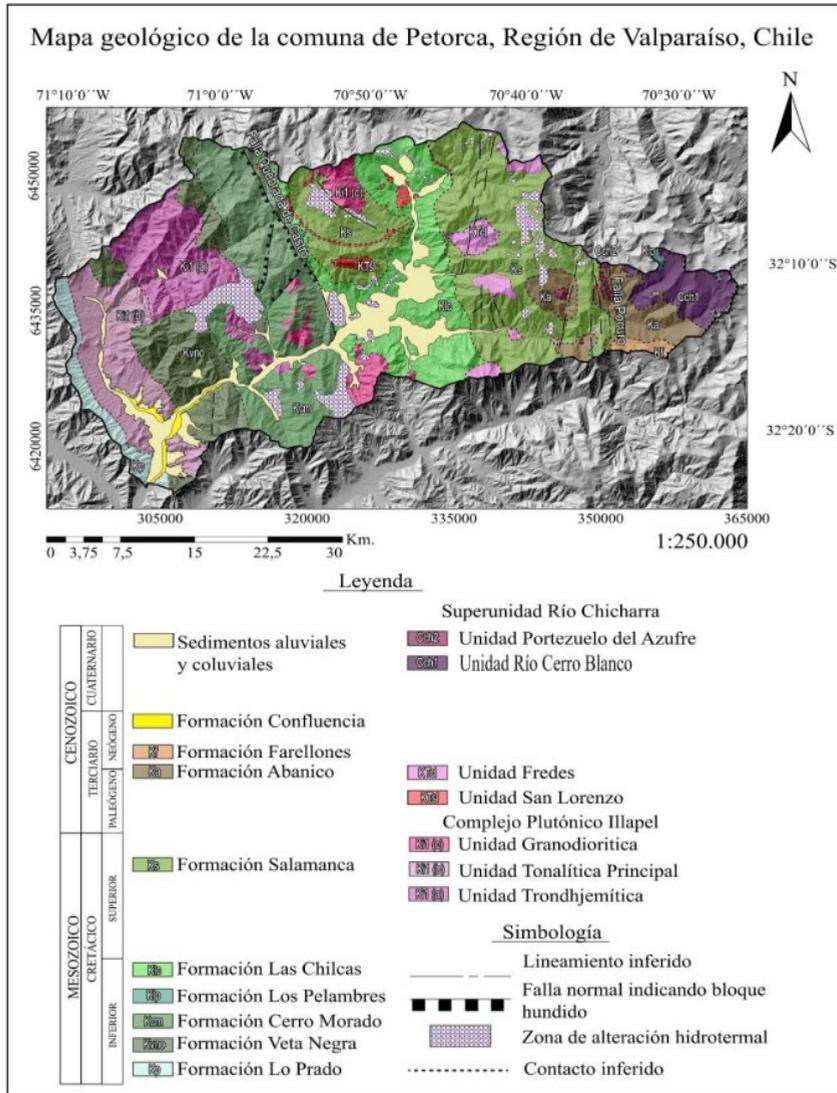


Figura 2. Mapa geológico de la comuna de Petorca (Pérez, 2018). Compilación a partir de (Rivano et al., 1993), (Camus et al., 1986), (Jara, 2013) y (Ferrando, 2014).

MATERIALES Y MÉTODOS

Las metodologías en este estudio se dividen por área de trabajo (**Figura 3**).

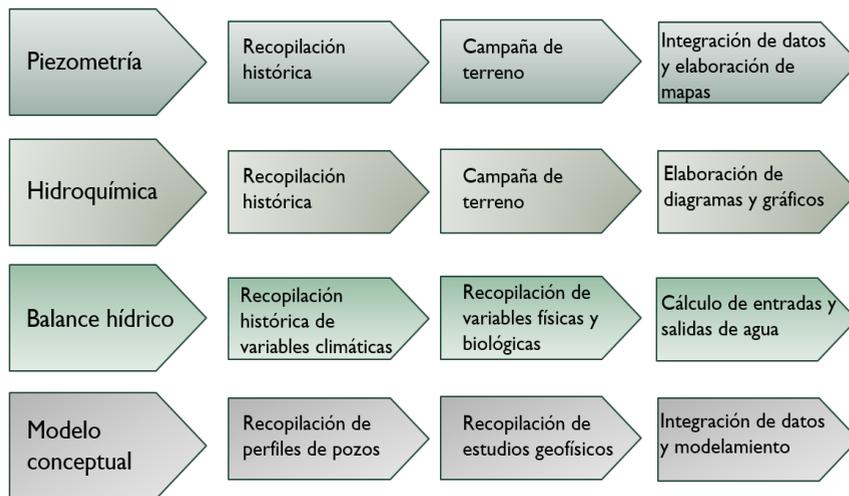


Figura 3. Fases metodológicas por área de estudio.

Piezometría

En primera instancia, se recopiló información desde 1995 a 2019 sobre niveles estáticos diarios medidos en estaciones pertenecientes a la Dirección General de Aguas (**Anexo 1**). Estos datos fueron comparados con las precipitaciones ocurridas en el mismo periodo (**Figura 7**), obtenidas desde la base de datos CAMELS-CL (Alvarez-Garreton, 2018).

Durante la campaña de terreno se midieron pozos pertenecientes a comités de *Agua Potable Rural* (APR) y privados, en cada uno se registra la ubicación y altitud utilizando un GPS Garmin eTrex 10X (GCS WGS84) y la profundidad a la que se encuentra el agua empleando un pozómetro Solinist de 50 m (**Figura 4**). Con estos datos se realizan mapas piezométricos (**Figuras 5 y 6**) utilizando la herramienta de ponderación de distancia inversa (IDW, por sus siglas en inglés) de ArcGIS Desktop 10.8.1 interpolando los niveles piezométricos, se corrigen según interpretación propia.



Figura 4. Materiales utilizados en campañas de terreno. En a) se observa multiparámetro, pozómetro y bailer, en b) se muestra proceso de medición de parámetros fisicoquímicos.

Hidroquímica

Para estudiar la evolución hidroquímica del agua se recopilan datos a través de la estadística en línea de la Dirección General de Aguas (DGA) en tres estaciones de monitoreo de parámetros fisicoquímicos (**Anexo 1**). La información de iones mayoritarios comprende entre 1984 y 2006, momento en que se dejó de medir Bicarbonatos en todas ellas. No obstante, existen informes de seguimiento de calidad del agua subterránea en pozos de la APR Valle los Olmos realizado los años 2015, 2016 y 2017 utilizados para analizar la situación más actual de las aguas. Los datos son procesados en el programa gratuito Diagrammes 5.4 (SIMLER, 2018) donde se calcula el error analítico, la matriz de correlación de Pearson (**Anexo 2**) y se generan diagramas de Piper (**Figura 9**), Stiff (**Figura 11**) y binarios (**Figura 10**) para clasificar los tipos de agua presente.

Durante la campaña de terreno se toman muestras de agua desde los pozos a través de un Bailer o utilizando la bomba de extracción instalada. Dicha muestra es analizada con un multiparámetro Hanna HI 9828 (**Figura 4**), midiendo su pH, Conductividad eléctrica (CE), Total de Sólidos Disueltos (TSD), Temperatura, Potencial de Óxido Reducción (ORP) y Oxígeno disuelto (OD).

Balance hidrometeorológico 2010-2018

Se recopila información disponible sobre las unidades acuíferas presentes en el sector a partir de estudios anteriores y de expedientes de pozos provistos por la DGA obteniendo parámetros hidráulicos como permeabilidad y transmisividad.

Para la recopilación de datos meteorológicos, en el caso de las precipitaciones, se utiliza la red de estaciones DGA vía web de las que se extraen datos de precipitación diarios para los años establecidos y se calcula el promedio. Por otro lado, para la temperatura se combinan datos desde el 2010 hasta el 2016 a partir de CAMELS-CL y para los periodos 2017 y 2018 se utilizan los datos de la estación *Chincolco Liceo Agrícola* perteneciente a Dirección Meteorológica de Chile y la estación *Salamanca* ubicada fuera del área de estudio, elegida por presentar el mismo bioclima que el Valle de Petorca (Luebert, 2012). De las estaciones mencionadas (**Anexo 1**) se obtienen también datos de velocidad del viento, horas de sol, radiación y humedad relativa, los cuales son utilizados para el cálculo de la evapotranspiración (ETP).

En cuanto a la información agraria, para calcular el espesor radicular promedio de los cultivos presentes en el sector se consideran los paltos, nogales y cítricos como principales cultivos (Richard, 1998), para calcular la dotación de riego requerida en el total de los cultivos se valora la proporción de estos según el CIREN (2017).

El área de plantaciones varía considerablemente durante los años que abarca el balance hidrometeorológico, debido a esto y con el fin de comprobar la cantidad de hectáreas plantadas por año se realiza una clasificación de cultivos a través de un análisis de imágenes satelitales en el programa ENVI 5.6.1 En primer lugar, se descargaron imágenes de la plataforma USGS, luego se les realiza corrección atmosférica y una calibración radiométrica con el módulo matemática de bandas, hecho esto se ejecutaron distintas combinaciones de bandas para distinguir plantaciones agrícolas de la vegetación natural con tal de llevar a cabo una clasificación supervisada para lograr contabilizar el área de cultivos agrícolas presentes para cada año. Debido a que no distingue entre tipo de árbol, se utiliza la proporción de cultivos obtenido de la encuesta del CIREN 2017, donde paltos representan un 64.56%, cítricos un 22.64% y nogales un 11.30% sumando en total un 98.5% del área total cultivada. Finalmente, esta información se cruza con los requerimientos hídricos mensuales de paltos (Ovalle J. M, 2012), de cítricos (Castillo, 2008) y de nogales (Lobos G, 2017).

A partir del balance hidrometeorológico se estima el caudal de agua proveniente de la precipitación y del retorno de riego que se recarga efectivamente por año en el sistema. Para su cálculo se ha utilizado el programa gratuito EASYBAL (Vazquez & Serrano, 2013) registrando los datos diarios antes mencionados. Además, se deben ingresar los valores de capacidad de campo, punto de marchitez y laminación los cuales se estimaron según el tipo de suelo realizando una clasificación textural (Schroeder 1994). El programa entrega valores anuales de recarga efectiva en [mm/año] sin considerar el área de estudio, para incluirla se debe multiplicar la recarga por la cantidad de hectáreas, utilizando la superficie de las tres subcuencas (101.857 ha) suponiendo que las precipitaciones en toda la hoya orográfica escurrirían hacia los depósitos del valle.

Balance hídrico 2010-2018

Para efectos del Balance Hídrico se asume que las laderas son impermeables de manera que se descartan entradas de agua laterales. Además, al estar el río en su mayor parte seco, se omite una relación río-acuífero. Por otro lado, para poder hacer una comparación entre los caudales de entrada y de salida en la zona de estudio se utilizan datos de estaciones fluviométricas pertenecientes a la DGA. Los parámetros considerados para este Balance Hídrico serán:

Entradas: Recarga obtenida a partir del balance hidrometeorológico; pérdidas por abastecimiento y alcantarillado.

Salidas: Extracciones (bombeos); salidas de agua subterránea por el límite suroeste de la zona de estudio.

Para calcular las pérdidas por abastecimiento y alcantarillado, se obtiene la cantidad de habitantes en el área de estudio (Censo, 2017) y considerando que según la Superintendencia de Servicios Sanitarios (2008) el requerimiento de agua para una persona es de 150 L/día, se calcula la cantidad de agua requerida anualmente por los habitantes del sector. Finalmente, se realiza el cálculo total considerando que las pérdidas que ocurren a partir de esta dotación han sido fijadas en un 15% por abastecimiento y de un 5% por alcantarillado (Girardi & Recio, 2015).

Las extracciones se obtuvieron a partir de los Derechos de Agua otorgados en la zona de estudio disponibles en la Dirección General de Aguas. El valor de extracciones para

los años que considera el balance hídrico se calcula sumando los caudales promedio anual de cada propietario en [hm³/año].

El cálculo de la salida de agua subterránea por el límite suroeste implica utilizar la fórmula del caudal en una sección de paso (Custodio & Llamas, 1996):

$$Q = K * i * b * L \quad (1)$$

Siendo: K, la conductividad hidráulica

i, el gradiente hidráulico

b, el espesor saturado

L, la longitud transversal conformada por los depósitos fluvio-aluviales.

En el presente trabajo, los valores K y b tienen orígenes bibliográficos, mientras que i es calculado con datos obtenidos en terreno y L fue medido remotamente a partir de ArcGis.

Modelo Conceptual

A partir de la recopilación y unificación de datos geofísicos (perfiles gravimétricos), estratigráficos (columnas de pozos), estructurales e hidrogeológicos se genera un modelo conceptual que incorpora las distintas variables tratando de acercarse a la geometría y dinámica real del acuífero de Petorca en el sector de estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Piezometría

El flujo del agua subterránea es paralelo a la línea de río (**Figura 5**) debido a que las laderas de los cerros adyacentes fueron consideradas impermeables.

Las aguas superficiales se ubican principalmente en las partes más altas del acuífero en los ríos Pedernal y Sobrante, esto puede deberse a que los depósitos fluvio-

aluviales en estas zonas poseen un espesor mucho menor al promedio, además, hay menos captaciones de agua ya que vive menos gente y no hay grandes plantaciones. Entre La Ñipa y Hierro Viejo es el único lugar aguas abajo donde se encontró agua superficial, lo que indicaría un comportamiento local efluente por parte del río en este sector.

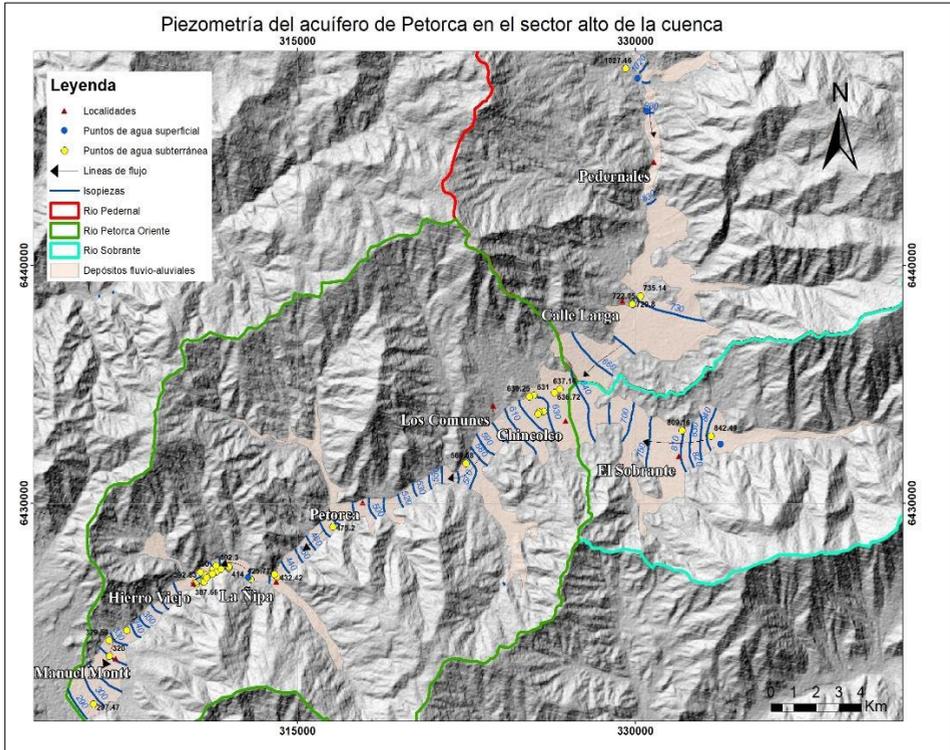


Figura 5. Mapa de isopiezas del sector alto del acuífero de Petorca en base a imagen satelital DEM.

En el área de Hierro Viejo, se obtuvo mayor detalle en cuanto a la piezometría, en la **Figura 6** es posible notar un aumento del gradiente hidráulico, además, se aprecia una vertiente subterránea en el borde sur de los depósitos fluvio-aluviales, esto podría deberse a estructuras internas del cerro como fracturamiento de las rocas que generen reservorios de agua. Estudiar estos sistemas puede ser de gran ayuda

en el futuro, como lo hizo Taucare et al (2021) en la zona central de Chile y los distintos trabajos impulsados por Linda Daniele recientemente.

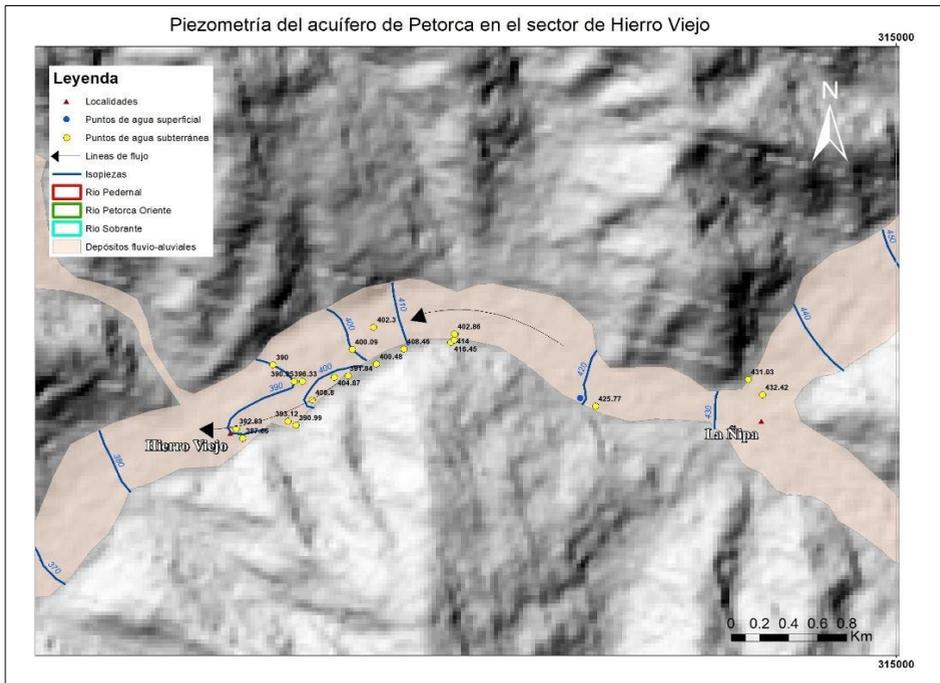


Figura 6. Mapa de isopiezas en el sector de Hierro Viejo en base a imagen satelital DEM.

Al comparar las precipitaciones anuales con los niveles estáticos de los pozos en el sector de Petorca Oriente (**Figura 7**), se puede notar que existe una correlación entre los niveles en los pozos y la cantidad de precipitaciones, aumentando considerablemente en años lluviosos y disminuyendo cuando las precipitaciones van a la baja. Sin embargo, hay ciertas variaciones que son difícilmente asociables a precipitaciones y que podrían estar relacionadas a grandes bombeos cercanos al pozo de monitoreo, como podría ser el caso de la estación de Agua Potable Polcura en el año 2017.

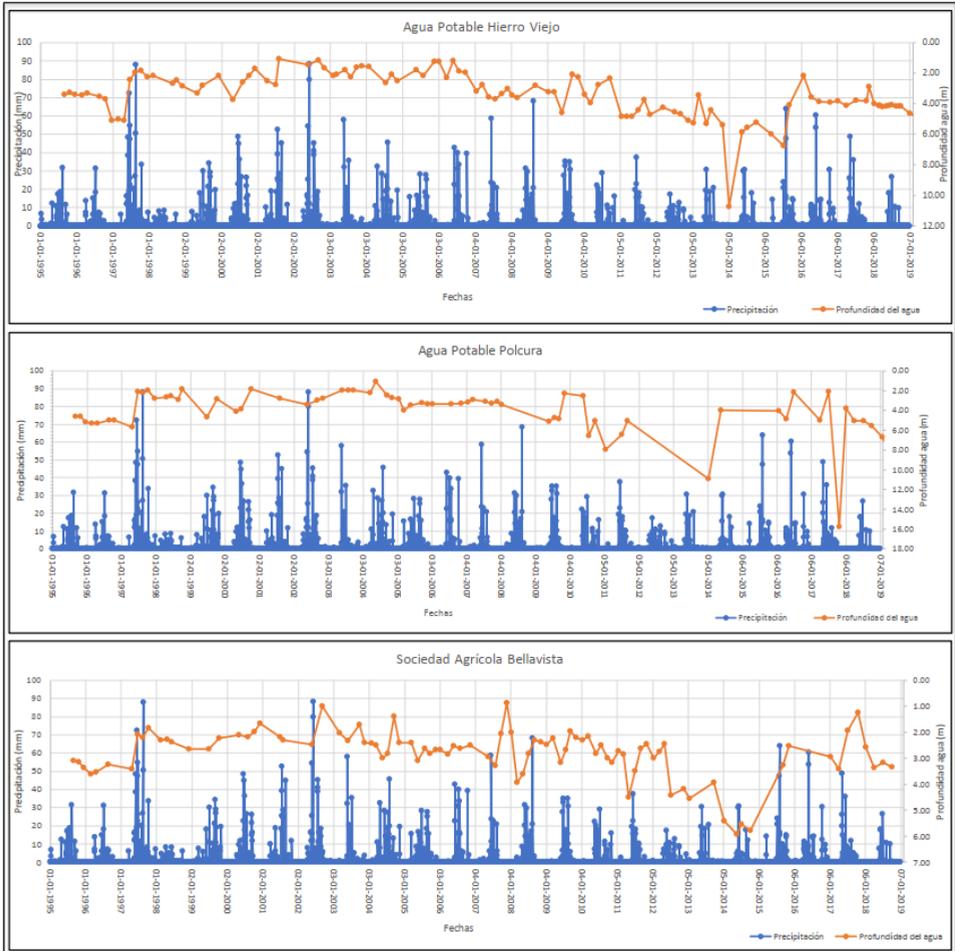


Figura 7. Comparación cronológica entre precipitaciones (azul) y niveles estáticos (naranja) de las estaciones comprendidas en la subcuenca Río Petorca Oriente.

En el sector de Pedernal (**Figura 8**), específicamente en Los Olmos Chalaco se puede observar claramente una ciclicidad estacional, donde, en periodos secos la piezometría baja y en periodos de lluvia y derretimiento de la nieve acumulada el nivel del agua subterránea aumenta. Al igual que en A.P. Polcura en 2017, en Escuela Chalaco en octubre de 1999 hay una disminución del nivel estático que no es asociable a una baja de precipitaciones.

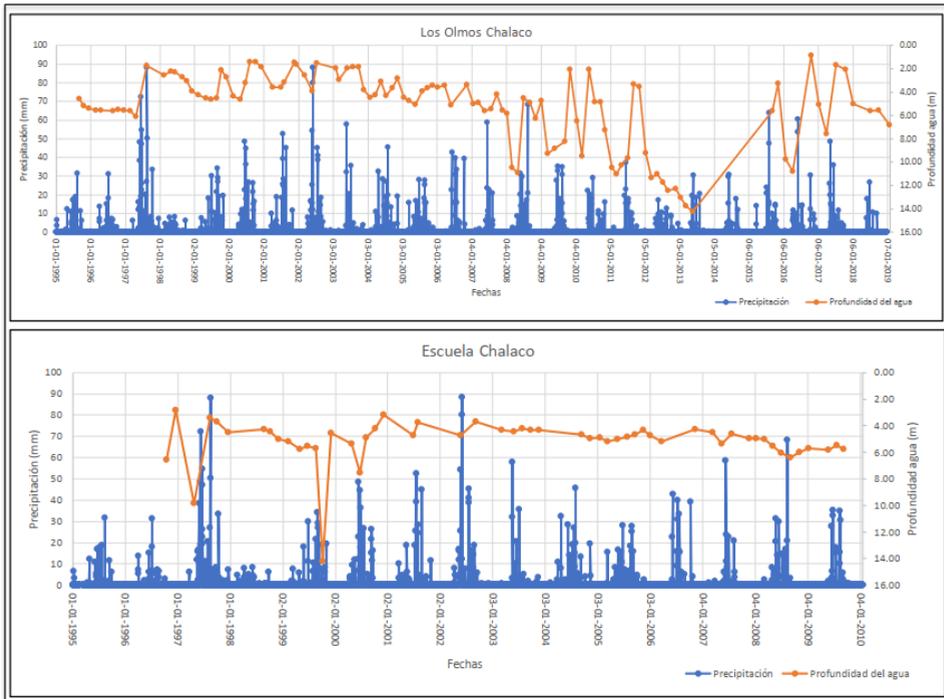


Figura 8. Comparación cronológica entre precipitaciones (azul) y niveles estáticos (naranja) de las estaciones comprendidas en la subcuenca Río Pedernal.

En el caso de Sobrante, no es posible hacer un buen análisis debido a la baja cantidad de datos.

En cuanto a la variación de almacenamiento, al observar sólo los últimos 5 años en los pozos de monitoreo se tiene que el nivel piezométrico ha aumentado, mostrando una variación positiva, sin embargo, esto es un aumento relativo ya que si consideramos desde el año 1995 hasta la actualidad la variación es negativa, es decir, la cantidad de agua almacenada ha disminuido.

Hidroquímica

La **temperatura** varía entre 16.86 y 21.54 °C siendo los pozos más superficiales los que poseen aguas con temperaturas más elevadas. El **pH** varía entre 7.02 y 7.72 con una distribución bastante homogénea dentro de la zona de estudio. El potencial oxido-reductor (**ORP**), tiene en promedio 203.74 mV, siendo Hierro viejo el sector que presenta valores más bajos con 187 mV, mientras que en el Valle de Pedernal los valores alcanzan los 293 mV, al ser todas las mediciones positivas podría indicar un ambiente oxidante. La conductividad eléctrica (**CE**), presenta un mínimo de 239 uS/cm en el sector de Pedegua y un máximo de 770 uS/cm en la localidad de Hierro Viejo, a partir de la junta de los ríos Pedernal y Sobrante los valores de CE aumentan considerablemente, esto puede deberse a la mayor área de plantaciones, las cuales al ocupar fertilizantes y pesticidas constituyen una gran fuente de sales minerales, o bien, por la actividad minera que se mantiene activa en la zona pudiendo aportar otro tipo de elementos.

Los valores de **sólidos totales disueltos (SDT)**, fluctúan entre 132 y 496 ppm siendo el sector de Sobrante el que posee menores valores y Calle Larga los mayores. Finalmente, el oxígeno disuelto (**OD**) va desde 1.03 a 6.91 ppm, disminuyendo a medida que se avanza por el acuífero, el oxígeno se consume con facilidad si existen sustancias oxidantes tales como materia orgánica, Fe^{+2} , NH_4^+ , NO_2^- , de manera que se infiere que la disminución en este parámetro puede deberse a mayores concentraciones urbanas y plantaciones agrícolas que aportan en sustancias oxidantes que consuman el oxígeno en diferentes reacciones.

Por otro lado, a partir de los iones mayoritarios, se elabora un diagrama de Piper (**Figura 9**), donde se reconocen aguas principalmente Bicarbonatadas Cállicas en río Sobrante, aguas bicarbonatadas-sulfatadas cálcicas en río Pedernal y, por último, aguas Bicarbonatadas calcio-magnésicas en río Petorca. Estas clasificaciones concuerdan con la geología del sector, compuesta principalmente por rocas volcano-sedimentarias y por cuerpos intrusivos graníticos de composición intermedia, además las aguas bicarbonatadas son representativas de zonas de recarga por precipitación.

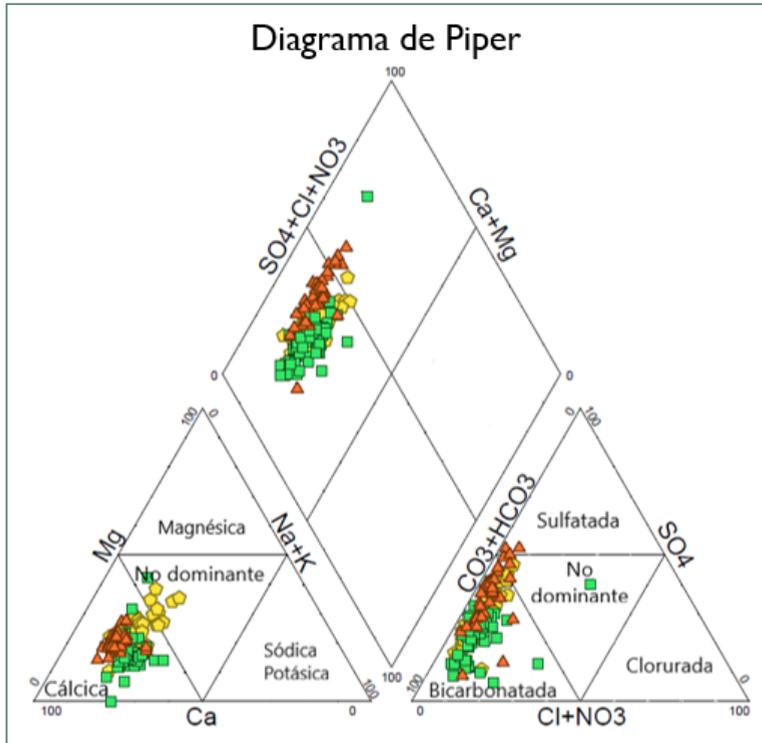


Figura 9. Diagrama de Piper con datos obtenidos a partir de la DGA. En triángulos naranjos se representa Río Pedernal en Tejada, en cuadrados verdes Río Sobrante en Piñadero, en pentágonos amarillos Río Petorca en Petorca.

De acuerdo con la relación rCl^-/HCO_3^- (**Figura 10a**), el gráfico indica la presencia de aguas poco evolucionadas, ubicándose las más jóvenes en los sectores de Sobrante y Pedernales, mientras que las del río Petorca tienen valores más altos indicando aguas más evolucionadas, esto concuerda con la geografía ya que las dos primeras son afluentes del río Petorca. Por otra parte, los resultados de la relación rNa^+/Cl^- (**Figura 10b**) y la matriz de correlación de Pearson (**Anexo 2**) sugieren que los procesos hidrogeoquímicos dominantes en la zona de estudio son el resultado de la meteorización de silicatos y feldespatos lo cual coincide con la geología del sector, ya que los materiales que conforman el acuífero se constituyen de las rocas

adyacentes, compuestas en su mayoría por rocas volcánicas e intrusivos de composiciones intermedias, es decir, que poseen una considerable proporción de los minerales mencionados.

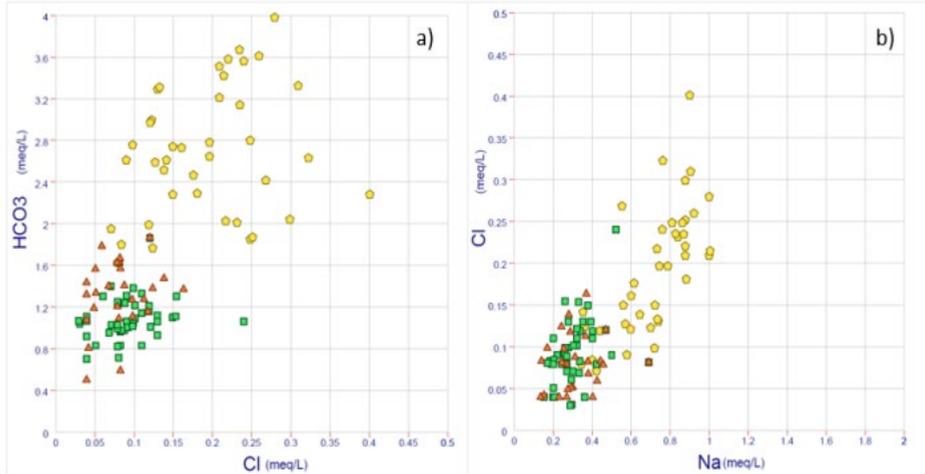


Figura 10. Gráficos binarios de concentraciones en a) Cl/HCO₃ y b) Na/Cl. En triángulos naranjos se representa Rio Pedernal en Tejada, en cuadrados verdes Rio Sobrante en Piñadero, en pentágonos amarillos Rio Petorca en Petorca.

La baja correlación del ion NO₃⁻ con la gran mayoría de los elementos analizados en la matriz de Pearson, sugiere que la fuente de origen de esta sustancia no sería el medio geológico, más bien podría estar relacionada al uso de fertilizantes que contienen nitrógeno en su composición y a la descomposición de materia orgánica proveniente de aguas residuales domésticas tanto por fosas sépticas como por fugas en el sistema de alcantarillado y/o plantas de tratamiento (Custodio & Llamas, 1996, v2).

El análisis de los diagramas de Stiff en los tres sectores del acuífero (**Figura 11**) muestra que los afluentes Pedernal y Sobrante tienen menores concentraciones de iones mayoritarios respecto a la estación Petorca, en la cual, los valores especialmente de calcio y bicarbonatos presentan un valor considerable, esto puede ser asociado a un mayor tiempo de circulación de las aguas en contacto con las

litologías de los depósitos fluvio-aluviales, sin embargo, debido a su alta concentración es posible que también haya influencia de factores antrópicos que generan el aumento de dichas concentraciones pudiendo tener relación a la actividad agrícola que aporta sales a través del uso de pesticidas y fertilizantes, y a descomposición de materia orgánica proveniente de aguas residuales tanto de vertederos como domésticas (FCIHS, 2009).

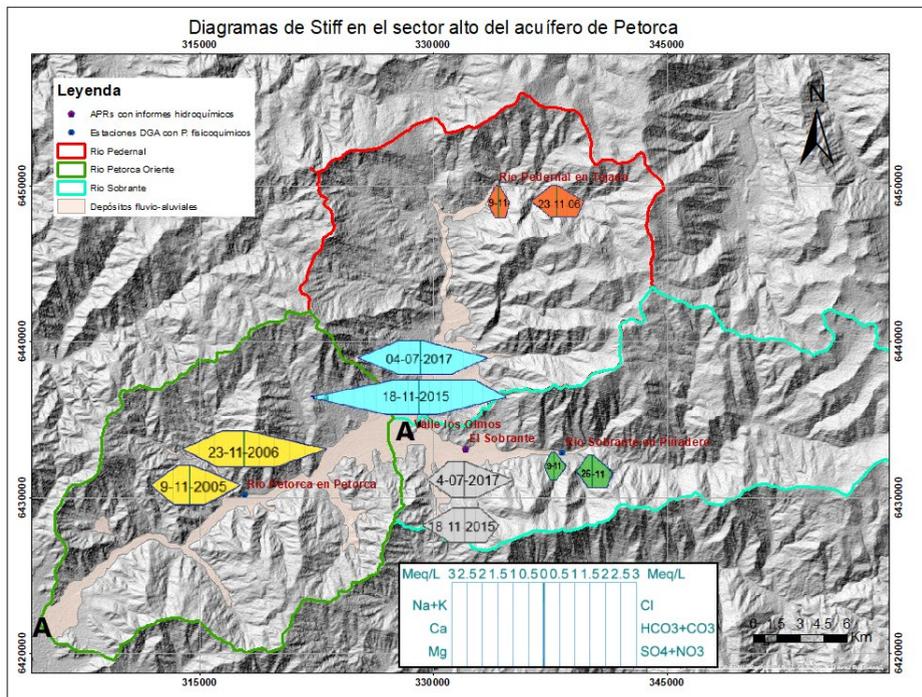


Figura 11. Distribuciones de los diagramas de Stiff en el sector alto del acuífero de Petorca. Las fechas de los diagramas verdes y naranja corresponden al 9-11-2005 y 26-11-2006. Las letras A-A' indican la traza del modelo conceptual.

Modelo Conceptual

El modelo conceptual de funcionamiento del sistema acuífero (**Figura 12**) considera los siguientes factores:

- Entradas: infiltración por precipitaciones y por retorno de riego, recarga por pérdida en redes de suministro y alcantarillado. Aunque se observó una vertiente proveniente de una ladera en el sector de Hierro Viejo esta no será considerada debido a que no ha podido ser cuantificada.
- Salidas: extracciones por bombeo y salida por el límite oeste de la zona de estudio.

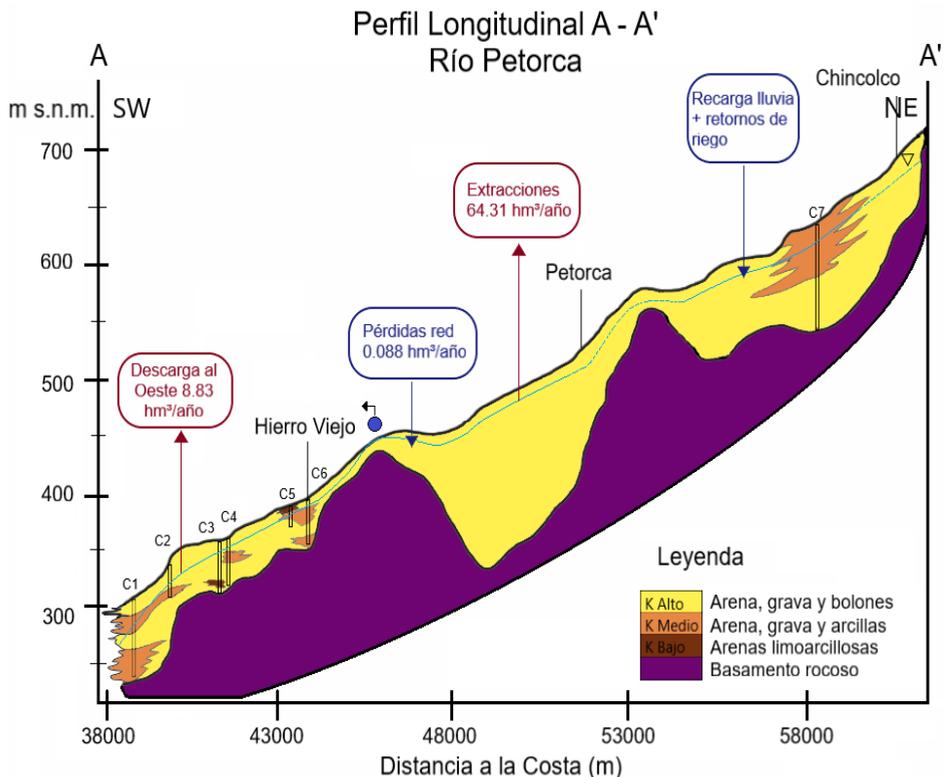


Figura 12. Modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico del acuífero fluvio-aluvial de Petorca entre Chincolco y Manuel Montt. Periodo considerado: enero 2010 – diciembre 2018.

El modelo conceptual se realizó hasta la localidad de Chincolco debido a que para los sectores de Pedernal y Sobrante los datos son insuficientes.

En cuanto a las unidades hidrogeológicas se pudo diferenciar principalmente tres tipos de composiciones: la más abundante, con tamaños muy variados, está conformada por arenas, gravas y bolones con una conductividad hidráulica de entre 1 a 100 [m/d] y una porosidad eficaz media de un 25%. La segunda unidad estaría conformada por arenas, gravas y arcillas con una conductividad hidráulica entre 0.01 a 1 [m/d], debido principalmente al contenido de arcillas este tipo de depósitos son considerados como acuíferos. La última unidad corresponde a lentes de arenas limo-arcillosas con conductividades hidráulicas entre 10^{-2} a 10^{-4} [m/d] siendo considerados acuitardos, sectores de muy baja permeabilidad que forman barreras hidráulicas.

La geometría del acuífero presenta una gran variabilidad en el espesor de los depósitos fluvio-aluviales, alcanzando su máximo entre los sectores de La Ñipa y Petorca con 135 metros, el mínimo se ubica entre los sectores de Hierro Viejo y La Ñipa con aproximadamente 1 metro de espesor (afloramiento de agua). Además, de este a oeste el espesor tiende a aumentar para luego disminuir drásticamente en dos oportunidades. Acudiendo a la geología, se advierte que la zona de estudio está controlada por estructuras regionales de rumbo NS a NW (**Figura 13**). Al este se ubica el sistema de fallas Quebrada Castro con un rumbo de N22°W y que comprende una serie de fallas subparalelas dextrales con menor componente transpresivo, donde el bloque occidental desciende (Camus et al, 1991); al oeste se encuentra un sistema de fallas subparalelas, con orientación promedio N20°W y sin información cinemática (Vicencio V. et al., 2017), cabe destacar también que entre las localidades de La Ñipa y Hierro Viejo es posible notar como el lecho del río se encuentra dislocado (**Figura 5**) un indicador clave de control estructural. Los sectores por donde cruzan estas fallas son justamente donde los espesores de los depósitos fluvio-aluviales son menores, es más, al oeste del sistema de fallas Quebrada Castro es donde se presenta el mayor de los espesores y justamente, según Camus (1991), este bloque desciende.

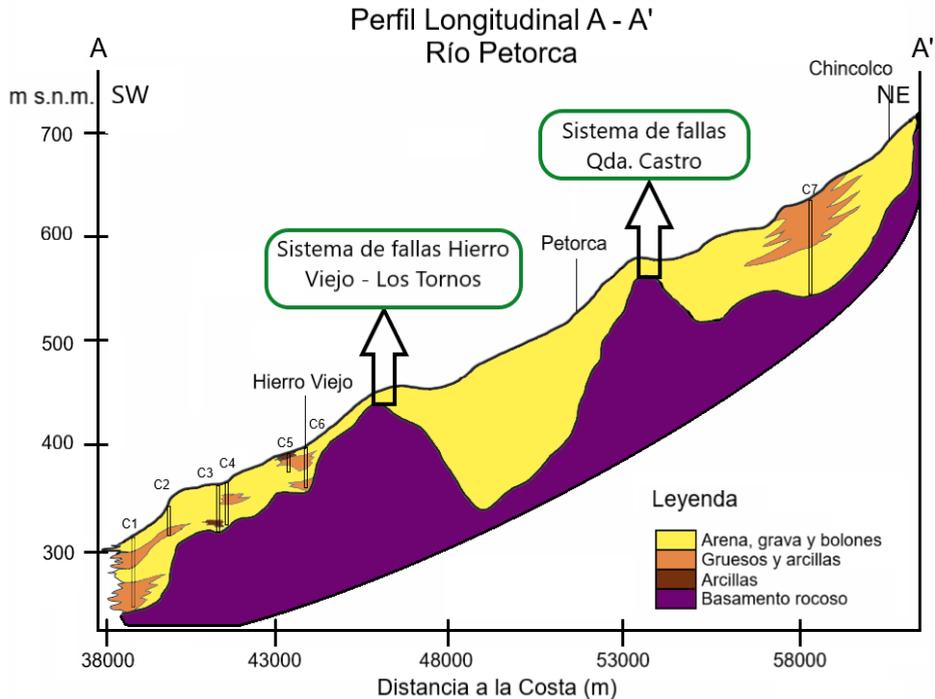


Figura 13. Perfil del acuífero con la ubicación de las estructuras que controlarían su geometría.

Dichas estructuras podrían estar relacionadas a sistemas de fallas direccionales con componentes de cizalla simple. De esta manera podría explicarse el relieve que presenta el basamento rocoso, con sus drásticos cambios de pendiente y de profundidad, así como también, la curvatura que presenta el río. Sin embargo, para afirmar esta proposición es necesario realizar un levantamiento de información estructural detallado.

Balance Hídrico 2010 – 2018

Los datos de las estaciones de aforo más próximas a la entrada y salida del acuífero en la zona de estudio corresponden al año 2017, estos muestran que el caudal promedio de entrada (entre los sectores de Sobrante y Pedernales) es muy similar al de salida (sector Hierro Viejo), de aproximadamente 0.73 m³/s lo que implica que las pérdidas y ganancias del río se equilibran a lo largo de su recorrido por la zona en estudio.

El balance hidrometeorológico (**Tabla 1**) entrega como promedio anual de las recargas un valor de 38.39 hm³/año. Mientras que la entrada por pérdidas por abastecimiento y alcantarillado tiene como resultado total 0.088 hm³/año.

	Precipitación + Riego	ETP Penman	Recarga	Recarga
Año	mm/año	mm/año	mm/año	hm ³ /año
2010	540.86	876.44	0.14	0.14
2011	427.64	887.59	33.43	34.05
2012	328.32	924.42	0.00	0.00
2013	278.70	915.70	9.66	9.84
2014	250.17	908.54	24.62	25.08
2015	347.78	918.32	109.75	111.79
2016	479.92	922.25	96.39	98.18
2017	333.44	974.67	65.20	66.41
2018	181.75	970.72	0.00	0.00
Promedio	352.06	922.07	37.69	38.39

Tabla 2. Resultados obtenidos del balance meteorológico realizado en el programa EASY BAL.

Las extracciones promedio correspondientes a los derechos de agua otorgados se estimaron en 64.31 hm³/año. Mientras que, en el límite oeste de la zona de estudio, se considera una salida de 8.83 hm³/año.

Finalmente, se calcula el balance hídrico suponiendo una relación río-acuífero nula obteniéndose el siguiente cálculo:

Entradas – Salidas = Variación de almacenamiento

$$38.48 \text{ hm}^3/\text{a} - 73.14 \text{ hm}^3/\text{a} = -34.66 \text{ hm}^3/\text{a}.$$

En estudios anteriores los balances se realizan desde la cabecera hasta la desembocadura en el mar, en GCF Ingenieros Ltda. (2013) el balance realizado entre los años 1950 - 2010 entrega entradas de 683 l/s (21.46 hm³/año) y salidas de 684 l/s (21.49 hm³/año) mientras que el realizado entre 2000 – 2004 tiene entradas de 571.7 l/s (18.05 hm³/año) y 570.8 l/s (18.02 hm³/año) de salida. Por otro lado, el más similar a la presente investigación, Álvarez *et al.* (2015) realiza un balance entre los años 1981- 2010 estimando una entrada de 56,510,604 MMm³ (56.51 hm³/año) y una salida de 70,810,334 MMm³ (70.81 hm³/año).

Al comparar los resultados de los distintos balances hídricos se advierte un comportamiento similar, siendo las salidas mayores que las entradas. Sin embargo, en el presente, la variación de almacenamiento es mucho mayor que en los casos anteriores. Esto puede deberse a que la cantidad de derechos de agua inscritos no implica que estos sean extraídos efectivamente (así como también hay extracción ilegal), lo que genera que el valor de las extracciones sea muy difícil de calcular.

CONCLUSIONES

- La geometría del acuífero, al igual que la geología de la zona están controlados principalmente por estructuras tipo fallas de carácter regional con rumbo preferencial NS a NW.
- El acuífero de Petorca se interpreta como un acuífero libre con tres unidades hidrogeológicas asociadas a los depósitos fluvio-aluviales diferenciándose entre sí por el contenido de arcillas presentes en cada una.
- La piezometría del sector tiene pendiente de 1 y 2% y el agua se encuentra en general a unos 6 m de profundidad hasta el sector de Hierro Viejo, luego se llega los casi 30 m en el sector de Pedegua, esto implica una fuerte y progresiva profundización del nivel piezométrico.

- Las aguas del acuífero son bicarbonatadas cálcicas en el sector de Sobrante, bicarbonatadas-sulfatadas cálcicas en el área de Pedernal y bicarbonatadas calcio magnésicas en el sector de Petorca. Sus diferentes composiciones tienen relación con el tipo de recarga que recibe y de las actividades que priman en cada sector.
- La calidad de las aguas se ve afectada tanto por un factor natural (geología), como por factores antrópicos como ocurre con el aumento de nitratos y sulfatos observado en Petorca Oriente.
- De acuerdo con las variaciones hidroquímicas observadas, si continúa disminuyendo el volumen almacenado también empeorará la calidad de las aguas, lo que podría llegar a originar aguas no aptas para el consumo humano.
- La disponibilidad de agua se ve afectada tanto por factores naturales como el cambio climático y el nivel de fracturamiento de las rocas, como por factores antrópicos como el cambio de uso de suelo y la sobreexplotación de las aguas subterráneas, siendo principalmente utilizadas en el área agrícola. De continuar el mismo régimen extractivista y de no cambiar las prioridades de los usos del agua, es muy probable que habitar el sector se vuelva insostenible y se destruya por completo el ecosistema original.

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, P., Reyes, H., Cortés, M., & Córdova, A. M. (2015). *Lineamientos estratégicos para la sustentabilidad hídrica de la cuenca de Petorca*. Universidad de La Serena.

Alvarez-Garreton, C. M.-B. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 5817-5846.

ArcGIS Desktop 10.8.1 Educational Academic Departmental Medium Single Use Term License. Tools: ArcGIS Desktop Advanced, ArcGIS 3D Analyst for Pro, ArcGIS Geostatistical Analyst for Pro, ArcGIS Network Analyst for Pro, ArcGIS Publisher for Pro, ArcGIS Spatial Analyst for Pro, ArcGIS Geostatistical Analyst Desktop, ArcGIS Network Analyst for Desktop, ArcGIS Spatial Analyst for Desktop, ArcGIS 3D Analyst for Desktop.

Cade-Idepe Consultores. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad*. Vol. 5. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago.

- Camus, F., Boric, R., Skewes, M., Castelli, C., Reichhard, E., & Mestre, A. (1991). Geologic, structural, and fluid inclusion studies of El Bronce epithermal vein system, Petorca, central Chile. *Economic Geology* 86(6), 1317-1345.
- Castillo, F. (2008). *Necesidad de agua en las plantaciones de naranjo en Andalucía*. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, Consejería de Agricultura y Pesca.
- Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIREN). (2017). *Catastro Frutícola, Región de Valparaíso*.
- Cica; Binnie & Partners; Hunting Technical Service Ltda. (1979). *Estudio integral de riego de los valles de Aconcagua, Putaendo, Ligua y Petorca*. Santiago: Comisión de riego.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1996). Hidrología Subterránea, Vol. 1. Barcelona: Omega.
- Departamento de Recursos Hídricos; Universidad de Concepción. (2016). *Estudio básico diagnóstico para desarrollar plan de riego en las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca*. Concepción.
- DGA. (2018). *Seguimiento de la calidad del agua subterránea - Pozos APR región de Valparaíso*. Santiago.
- ENVI 5.6.1 ENVI Mini Lab Concurrent Process.
- Fagundo, J. M. (2010). *Patrones hidrogeoquímicos y origen de la composición química de aguas subterráneas que drenan carbonatos*. Ciudad de la Habana.
- FCIHS, C. d. (2009). *Hidrogeología. Conceptos básicos de Hidrología subterránea*. Publicado por Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea.
- GCF Ingenieros Ltda. (2013). *Mejoramiento de agua subterránea para riego Ligua y Petorca*. Santiago.
- GCF Ingenieros Ltda. (2011). *Diagnóstico de los recursos subterráneos en el sistema hídrico Ligua y Petorca*. Comisión Nacional de Riego.
- Girardi, C., & Recio, J. (2015). *Estudio Hidrogeológico del Baix Ter*. (Baix Empordá, Girona. doi: <https://doi.org/15004>
- González-Abraham, Antalia, Fagundo-Castillo, Juan Reynerio, Carrillo-Rivera, José Joel, & Rodríguez-Estrella, Ricardo. (2012). Geoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en rocas sedimentarias y rocas volcánicas de Loreto, BCS, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(3), 319-333. Recuperado en 17 de noviembre de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222012000300005&lng=es&tlng=es.
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2007). *VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal*.
- Instituto Nacional de Estadísticas, (2017). *Encuesta de Superficie Sembrada de Cultivos Anuales*.
- Lobos G., V. A. (2017). *Manejo hídrico en frutales bajo condiciones edafoclimáticas de Limarí y Choapa*. INIA.

Luebert, F. &. (2012). Variabilidad climática y bioclimas de la Región de Valparaíso, Chile. *Investigaciones Geográficas*, 41-56.

Ovalle, M. J. (2012). *Estimación de la huella hídrica de cultivos con potencial bioenergético en la provincia de Limarí, región de Coquimbo, Chile*. Santiago de Chile.

Pérez, R. (2018). Patrimonio geológico de la comuna de Petorca (32°s – 32°24's): análisis de lugares de interés geológico y su contextualización en un modelo de evolución paleogeográfico. *Memoria para optar al título de geólogo*. Santiago: Universidad de Chile.

Richard G. Allen, L. S. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. Roma: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Simler, R. (2018). *Logiciel d'hydrochimie - Water Software Quality Hydrochemistry diagrams. Version 6.59*. France: Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon.

Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2008). *Consumo de agua potable 2007- 2008*.

Vazquez-Suñe, E., & Serrano-Juan, A. (2013). *EASY_BAL v10.7*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.

Vélez, M. V. (1999). *Hidráulica de aguas subterráneas*. Medellín, Colombia: Segunda edición, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.

Vicencio V., D. I. (2017). *Informe Geológico de la Comuna de Petorca. Primera etapa de Exploración de la Geodiversidad de la Comuna de Petorca*. Programa de Prácticas Profesionales. Geoparque Valle de Petorca.

ANEXOS

Estación	Parámetro medido	UTM Norte	UTM Este	Primer dato	Último dato
Agua Potable Hierro Viejo	Nivel estático	6426647	310475	30-08-1995	23-05-2019
Agua Potable Polcura	Nivel estático	6432125	323775	30-08-1995	01-04-2019
Agua Potable Valle Los Olmos	Nivel estático	6433979	328524	14-12-1995	07-03-2014
Escuela Chalaco	Nivel estático	6437391	329906	15-10-1996	10-09-2009
Los Olmos-Chalaco	Nivel estático	6436276	329181	30-08-1995	01-04-2019
Sociedad Agrícola Bellavista	Nivel estático	6429798	319024	30-08-1995	08-10-2018
Rio Pedernal en Tejada	Hidroquímica - caudal	334042	6449855	22-02-1984	23-11-2006
Rio Sobrante en Piñadero	Hidroquímica - caudal	338253	6432848	22-02-1984	22-11-2006
Rio Petorca en Petorca	Hidroquímica - caudal	317861	6430159	03-12-1981	23-11-2006
Chalaco	Precipitación	6438332	331485	01-01-2009	30-11-2018
Sobrante en Hacienda	Precipitación	6432712	330879	01-01-2009	31-12-2018
Trapiche	Precipitación	6432849	336274	01-01-2009	30-11-2018
Hierro Viejo	Precipitación	6426657	313833	01-01-2009	31-12-2018
Pedernal en Hacienda	Precipitación	6447868	330256	01-01-2009	31-12-2018
Petorca en Peñon	Precipitación	6426939	312690	01-01-2009	31-12-2018
Sobrante en Piñadero	Precipitación	6432848	338253	01-12-2012	31-12-2018
Chincolco iceo Agrícola	Temperatura	70831666	3222499	01-01-2017	31-12-2018
Salamanca	Temperatura	70714	318856	01-01-2017	31-12-2018

Anexo 1. Ubicación e información obtenida desde diferentes estaciones de medición.

	TDS	T°C	pH	c25°C	cCAL	cCa%	Bal-c	Bal-d	relate	Catón	Anion	Ca	Mg	Na	K	Fer	Fe(II)	Mn	Sr	Li+	Al	NH4	H3O	HCO3	CO3	Cl	SO4	PO4	NO3	NO2	HS-	S2-	OH-			
TDS	1	0.44	0.34	0	1.00	0	0.97	-0.21	0.29	0	1.00	1.00	0.98	0.95	0.92	0.43	0	0	0	0	0	0	-0.26	0.97	0	0.73	0.90	0	0.04	0	0	0	0.11			
T°C	0.44	1	0.19	0	0.43	0	0.47	-0.04	0.11	0	0.43	0.43	0.42	0.41	0.44	0.17	0	0	0	0	0	0	-0.18	0.47	0	0.26	0.33	0	-0.02	0	0	0	0.03			
pH	0.34	0.19	1	0	0.35	0	0.34	-0.03	0.10	0	0.34	0.34	0.36	0.28	0.28	0.19	0	0	0	0	0	0	-0.68	0.34	0	0.22	0.28	0	0.05	0	0	0	0.70			
c25°C	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
cCAL	1.00	0.43	0.35	0	1	0	0.95	-0.24	0.32	0	1.00	1.00	0.97	0.96	0.93	0.45	0	0	0	0	0	0	-0.26	0.96	0	0.75	0.92	0	0.03	0	0	0	0.12			
cCa%	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Bal-c	0.97	0.47	0.34	0	0.95	0	1	-0.33	0.39	0	0.97	0.96	0.96	0.91	0.88	0.42	0	0	0	0	0	0	-0.25	0.98	0	0.69	0.78	0	-0.03	0	0	0	0.10			
Bal-d	-0.21	-0.04	-0.03	0	-0.24	0	-0.33	1	-0.96	0	-0.28	-0.19	-0.27	-0.28	-0.27	-0.36	0	0	0	0	0	0	-0.01	-0.18	0	-0.31	-0.22	0	0.60	0	0	0	-0.01			
Balance	0.29	0.11	0.10	0	0.32	0	0.39	-0.96	1	0	0.36	0.27	0.34	0.36	0.35	0.36	0	0	0	0	0	0	-0.04	0.25	0	0.35	0.31	0	-0.59	0	0	0	0.05			
relate	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Catón(m)	1.00	0.43	0.34	0	1.00	0	0.97	-0.28	0.36	0	2.67	0.99	0.98	0.96	0.93	0.46	0	0	0	0	0	0	-0.26	0.96	0	0.76	0.91	0	0.00	0	0	0	0.11			
Anion(m)	1.00	0.43	0.34	0	1.00	0	0.96	-0.19	0.27	0	0.99	2.72	0.97	0.95	0.92	0.42	0	0	0	0	0	0	-0.26	0.97	0	0.74	0.91	0	0.04	0	0	0	0.11			
Ca	0.98	0.42	0.36	0	0.97	0	0.96	-0.27	0.34	0	0.98	0.97	60.9%	0.88	0.84	0.37	0	0	0	0	0	0	-0.26	0.96	0	0.67	0.87	0	0.00	0	0	0	0.15			
Mg	0.95	0.41	0.28	0	0.96	0	0.91	-0.28	0.36	0	0.96	0.95	0.88	21.2%	0.93	0.47	0	0	0	0	0	0	-0.23	0.89	0	0.78	0.90	0	0.00	0	0	0	0.07			
Na	0.92	0.44	0.28	0	0.93	0	0.88	-0.27	0.35	0	0.93	0.92	0.84	0.93	17.1%	0.52	0	0	0	0	0	0	-0.23	0.88	0	0.79	0.86	0	0.03	0	0	0	0.04			
K	0.43	0.17	0.19	0	0.45	0	0.42	-0.36	0.36	0	0.46	0.42	0.37	0.47	0.52	0.8%	0	0	0	0	0	0	-0.15	0.37	0	0.63	0.41	0	0.01	0	0	0	0.02			
Fer	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Fe(II)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Fe(III)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Mn	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Sr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Li+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Al	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
NH4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
H3O+	-0.26	-0.18	-0.68	0	-0.26	0	-0.25	-0.01	0.04	0	-0.26	-0.26	-0.23	-0.23	-0.15	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	-0.26	0	-0.16	-0.22	0	-0.08	0	0	0	0	-0.19		
HCO3	0.97	0.47	0.34	0	0.96	0	0.96	-0.18	0.25	0	0.96	0.97	0.96	0.89	0.88	0.37	0	0	0	0	0	0	-0.26	63.4%	0	0.66	0.78	0	0.04	0	0	0	0	0.09		
CO3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Cl	0.73	0.26	0.22	0	0.75	0	0.69	-0.31	0.35	0	0.76	0.74	0.67	0.78	0.79	0.63	0	0	0	0	0	0	-0.16	0.66	0	4.6%	0.71	0	-0.05	0	0	0	0	0.01		
SO4	0.90	0.33	0.28	0	0.92	0	0.78	-0.22	0.31	0	0.91	0.91	0.87	0.90	0.86	0.41	0	0	0	0	0	0	-0.22	0.78	0	0.71	30.9%	0	-0.05	0	0	0	0	0.12		
PO4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
NO3	0.04	-0.02	0.05	0	0.03	0	-0.03	0.69	-0.59	0	0.00	0.04	0.00	0.00	-0.03	0.01	0	0	0	0	0	0	-0.06	0.04	0	-0.05	-0.05	0	1.0%	0	0	0	-0.03			
NO2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
HS-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	0	
S2-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	0
OH-	0.11	0.03	0.70	0	0.12	0	0.10	-0.01	0.05	0	0.11	0.11	0.15	0.07	0.04	0.02	0	0	0	0	0	0	-0.19	0.09	0	0.01	0.12	0	-0.03	0	0	0	0	0.1%		

Anexo 2. Matriz de correlación de Pearson correspondiente a los datos del presente trabajo.

LA AUTORA

Justinne Rybertt Goldammer es Geóloga de la Universidad Andrés Bello. Ha desarrollado sus estudios de pregrado en temáticas hidrogeológicas, específicamente en la cuenca del río Petorca. Cuenta con experiencia ligada al área académica en ramas de la geología como: Hidrogeología y Geología Estructural. Actualmente se desempeña como profesional en el Centro de Acción Climática de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso contribuyendo en la generación de planes de adaptación al cambio climático, además, forma parte del Laboratorio de Territorios Hidrosociales y Cambio Climático perteneciente a la misma universidad y al Laboratorio de Análisis Isotópicos de la Universidad Andrés Bello.