



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**GEOLOGÍA**



# **EVALUACIÓN DEL SELLADO DE POZO COMO MÉTODO PARA LA REDUCCIÓN DEL CONTENIDO DE FE Y MN EN AGUAS SUBTERRÁNEAS, UNIHUE, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE**

**Memoria para optar al Título de Geóloga**

**Valentina Rayén Vives Gómez**

Profesora Guía: Dra. Verónica Laura Oliveros Clavijo  
Profesor Co-Guía: Sr. Ignacio Paolo Bernard Barriga  
Profesor Comisión: Dra. Fernanda Carolina Álvarez Amado

**Concepción, 2024**

*Para ti, papá.*

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a mi profesional guía, Ignacio Bernard, director de la empresa MHT SpA, por el financiamiento de esta investigación. Agradezco sinceramente la oportunidad de trabajar junto a él, así como su invaluable ayuda, disposición, enseñanzas y conocimientos compartidos durante todo el proceso. Asimismo, agradezco a Danitza Campos, compañera de clases y parte del equipo de la empresa MHT, por su amabilidad y colaboración en la realización de esta memoria.

También agradecer a mis profesoras Verónica Oliveros y Fernanda Álvarez por su gestión y participación en esta memoria, y a todas las personas del Departamento Ciencias de la Tierra que formaron parte de estos seis años de carrera, cada uno aportó con recuerdos y momentos en esta travesía universitaria.

Agradecer a mi mamá, por su amor, apoyo y aliento en este proceso de tanta incertidumbre, por estar orgullosa de mis logros, por siempre confiar y creer en mí. Agradecer a mi abuelita Tato y a mi abuelo Tulio por tenerme presente en sus oraciones cada día, quizás no entienda del todo sus creencias, pero no pongo en duda que lo que hacen es de los gestos de amor más grandes que existen.

Agradezco también a mis amigas que conocí en esta etapa, a mis niñas, que han sido una red de apoyo fundamental. Gracias por su ayuda, por la amistad, por el cariño, por las risas y recuerdos creados. Definitivamente nada hubiera sido lo mismo sin ustedes. Se han ganado mi corazón para siempre.

A mis hermanos Claudia y Daniel, a mi sobrino Tomás, y a mis amigos de siempre, gracias por la contención brindada en los momentos difíciles, gracias también por las conversaciones profundas, momentos de relax y felicidad. Gracias por enseñarme a disfrutar las cosas simples de la vida.

Por último y sin querer sonar arrogante, agradecerme a mí por ponerle empeño y seguir adelante hasta cuando todo parecía perdido, por buscar soluciones en vez de quejarse de los problemas, por querer mejorar cada día y no rendirse jamás. Gracias Valentina. Ya verás que todo habrá valido la pena.

Gracias totales.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	viii
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivo general .....	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	2
1.2 Ubicación y accesos.....	3
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	4
2.1 Hidrografía.....	4
2.2 Hidrología.....	6
<b>3. MARCO GEOLÓGICO</b> .....	8
3.1 Unidades morfoestructurales .....	8
3.2 Unidades geológicas .....	9
<b>4. METODOLOGÍA</b> .....	13
4.1 Recopilación de antecedentes.....	13
4.1.1 Estratigrafía .....	13
4.1.2 Mediciones hidrológicas.....	14
4.1.3 Análisis químico del agua.....	15
4.2 Sellado del pozo .....	16
<b>5. RESULTADOS</b> .....	17
5.1 Previo al sellado .....	17
5.2 Posterior al sellado .....	19
5.3 Resumen de variables .....	21
<b>6. DISCUSIÓN</b> .....	22
6.1 Origen del hierro y manganeso.....	22
6.2 Efectos de la contaminación.....	22
6.3 Extensión de la contaminación.....	23
6.4 Tecnología para remoción de hierro y manganeso .....	26
6.5 Efectividad a corto y largo plazo.....	28
<b>7. CONCLUSIÓN</b> .....	29
<b>REFERENCIAS</b> .....	30
<b>ANEXOS</b> .....	33

## TABLA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de ubicación y acceso al área de estudio en Unihue, comuna de Hualqui, región del Biobío, Chile.....	3
<b>Figura 2.</b> Mapa de cuencas hidrográficas de la región del Biobío. ....	4
<b>Figura 3.</b> Mapa hidrográfico de la región del Biobío. ....	5
<b>Figura 4.</b> Unidades geomorfológicas de la región del Biobío (Borgel, 1983). ....	8
<b>Figura 5.</b> Geología de la zona de estudio, dentro de la provincia de Concepción (Modificado de DGA, 2012). ....	10
<b>Figura 6.</b> Estratigrafía de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	13
<b>Figura 7.</b> Piezómetro utilizado en las pruebas de bombeo y recuperación. ....	14
<b>Figura 8.</b> Materiales utilizados en el análisis de agua. A: Medidor portátil. B-C: Toma de muestras y su cambio de color posterior a los reactivos utilizados. D: Aplicación de los reactivos. E: Reactivo utilizado para la medición de Mn. F: Reactivo utilizado para la medición de Fe. ....	15
<b>Figura 9.</b> Método de sellado. A: retiro de tuberías y bomba hidráulica. B: instalación de tuberías para la inyección de cemento. C: preparación e inyección de la mezcla dentro del pozo.....	16
<b>Figura 10.</b> Descenso del nivel dinámico [m] respecto al tiempo [min] en la prueba de bombeo a caudal constante 2,8 [L/s], previo al sellado. ....	17
<b>Figura 11.</b> Ascenso del nivel dinámico [m] respecto al tiempo [min] en la prueba de recuperación previo al sellado.....	18
<b>Figura 12.</b> Resultados de análisis de agua antes del sellado. A: Concentración de Fe. B: Concentración de Mn.....	18
<b>Figura 13.</b> Descenso del nivel dinámico [m] respecto al tiempo [min] en la prueba de bombeo a caudal constante de 2,13 [L/s], posterior al sellado.....	19
<b>Figura 14.</b> Ascenso del nivel dinámico [m] respecto del tiempo [min] en la prueba de recuperación, posterior al sellado.....	20
<b>Figura 15.</b> Resultados del análisis químico posterior al sellado. A: Concentración de Fe. B: Concentración de Mn.....	20
<b>Figura 16.</b> Recopilación de resultados obtenidos.....	21
<b>Figura 17.</b> Mapa hidrogeoquímico de Chile, con énfasis en las concentraciones de Fe y Mn que estén fuera de norma (Modificado de DGA, 2019).....	24

<b>Figura 18.</b> Afloramiento del Batolito Costero (Cpg) y la Serie Oriental del Basamento Metamórfico (Pz4b).....	25
<b>Figura 19.</b> Precio de filtros VALDIAQUA SpA. (Extraído de <a href="https://ventadefiltrosdeagua.cl/">https://ventadefiltrosdeagua.cl/</a> ).	27
<b>Figura 20.</b> Gastos implicados en la realización del sellado de cemento (precios referenciales extraídos de <a href="https://www.easy.cl/">https://www.easy.cl/</a> ).	27

## TABLA DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Tabla de tiempo [min] v/s nivel dinámico [m] en la prueba de bombeo a caudal constante de 2,8 [L/s], previo al método de sellado. ....	33
<b>Anexo 2.</b> Tabla de tiempo [min] v/s nivel dinámico [m] en la prueba de recuperación, previo al método de sellado. ....	34
<b>Anexo 3.</b> Tabla de tiempo [min] v/s nivel dinámico [m] en prueba de bombeo posterior al sellado. ....	35
<b>Anexo 4.</b> Tabla de tiempo [min] v/s nivel dinámico [m] en prueba de recuperación posterior al sellado. ....	36

## **RESUMEN**

El área de estudio comprende un pozo localizado en la región del Biobío, específicamente en el sector de Unihue, dentro de la comuna de Hualqui, el cual suministrará agua al Fundo “Los Peumos”. En respuesta a la solicitud del cliente, se lleva a cabo un análisis químico del agua subterránea, indicando concentraciones de hierro y manganeso que exceden los límites máximos establecidos por la normativa chilena de aguas (NCh409/1. Of2005). Además, el estudio estratigráfico realizado revela la presencia de arenas de tamaño medio y grueso que se encuentran sobre un estrato rocoso. Se presume que este último es la fuente del contenido metálico que contamina el acuífero.

Para evitar la infiltración de hierro y manganeso en el agua subterránea, se implementa una técnica de sellado parcial del pozo utilizando cemento, con tal de limitar el contacto que este tiene con la roca circundante. La estratigrafía de la zona es lo que permite que el procedimiento sea apto, ya que la granulometría de las arenas permite que no se altere significativamente el caudal del pozo. El análisis químico realizado posterior al sellado revela concentraciones de dichos metales menores a los iniciales, estando dentro de los rangos permitidos por la norma chilena de aguas. Por otra parte, la evaluación del potencial hidráulico comprueba que no hay alteración significativa en el caudal del pozo, por lo que el sellado no afecta su funcionalidad.

Por el contexto geológico del país, la contaminación de aguas subterráneas por hierro y manganeso es común en Chile. Esto es un problema especialmente cuando dichos metales se encuentran en altas concentraciones, ya que afecta tanto a la salud pública como al sistema de suministro de agua. Por tanto, además, esta investigación sugiere que la aplicación del método de sellado en áreas estratigráficamente similares al lugar de estudio representa una solución rápida y económica en comparación con los sistemas de filtrado de agua, abordando así un problema de alcance nacional.

## 1. INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es un recurso principal para el planeta, considerando que representa más del 97% del agua dulce accesible y desempeña un papel crucial en la salud pública y economía de muchas áreas urbanas. Sin embargo, el acceso al agua potable aún no es una realidad para el 26% de la población mundial (OMS, 2023), esto debido principalmente a la contaminación, entre otros factores. Esto conlleva riesgos directos para la salud humana, así como también, problemas en los sistemas de suministro de aguas.

Las aguas de pozos contienen mayores concentraciones de hierro (Fe) y manganeso (Mn) que las aguas superficiales, debido al bajo pH, a la alta concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y al escaso contenido de oxígeno disuelto (Avendaño, 2002). Se ha comprobado que estos metales al presentar valores fuera de normas ocasionan daños morfológicos y fisiológicos en los organismos (Ávila et al., 2021).

Un consumo de aguas con alto contenido de manganeso (sobre los 0,024 [mg/kg/día]) por un tiempo prolongado puede afectar al sistema nervioso, con problemáticas asociadas al tiempo de reacción visual y deficiencia en la firmeza de las manos (García-García et al., 2012). Por su parte, una ingesta de agua con elevada concentración de hierro (por encima de 0,3 [mg/L]) se asocia a un mayor riesgo de enfermedades coronarias e infartos; a supresión del sistema inmunológico; tintes color bronce o grisáceo en la piel; aparición de trastornos como cefalea, fatiga, desordenes gastrointestinales como estreñimiento y náuseas; y a incremento en el riesgo de cirrosis hepática, fibrosis del páncreas y diabetes (Roy & Andrews, 2001), además otros estudios (Arezzini et al., 2003) demuestran una asociación a cáncer, principalmente de esófago y de vejiga, así como a tumores fibroides, presión arterial elevada, hipertrofia de próstata y artritis.

Además de los problemas de salud que trae consigo la ingesta de estos metales, la presencia de estos en aguas subterráneas conlleva a un aspecto turbio, con cambios en la coloración, olor y sabor, lo que puede ser motivo de rechazo en el consumidor. A su vez, la acumulación de hierro y manganeso reducen la capacidad de las tuberías ocasionando así, pérdidas de la presión de la red de distribución, traduciéndose como problemáticas de carácter técnico y financiero (Guillen-Rivas et al., 2021).

Bajo este contexto, se destaca la importancia de abordar la contaminación de los acuíferos para garantizar la calidad del agua potable y proteger la salud pública. Esta investigación se centra en el estudio de un pozo ubicado en Unihue, perteneciente a la comuna de Hualqui, en la región del Biobío, Chile, el cual es parte de un sistema colectivo de agua potable del Fundo “Los Peumos”, un loteo de 60 sitios que será habitado por 270 personas aproximadamente. En él, se detectaron niveles elevados de hierro y manganeso, superando los límites establecidos por la normativa chilena de agua (NCh409/1. Of2005) para el consumo humano, por lo que se plantea la necesidad de implementar soluciones efectivas, de bajo costo y fácil operación, como el sellado con un tapón de cemento, para garantizar el suministro de agua potable sin alterar de forma significativa el caudal del pozo.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo general**

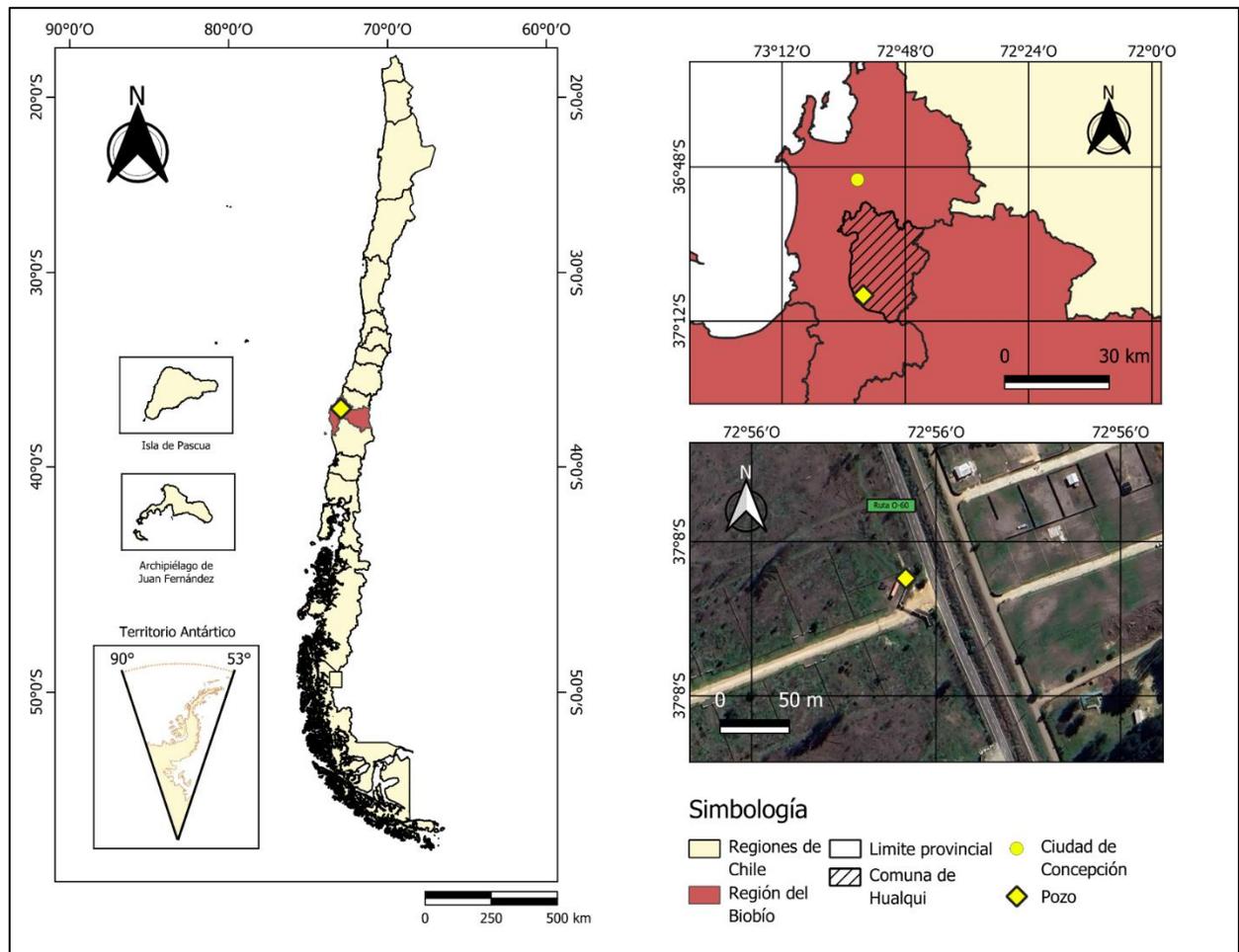
- Comprobar la eficacia del método de sellado aplicado en el pozo del Fundo “Los Peumos”, mediante análisis químicos y estudio del potencial hidráulico, y evaluar su implementación en otras zonas del país.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Evaluar la variación de la calidad del agua en base a concentraciones de Fe y Mn.
- Determinar la variación del potencial hidráulico antes y después del sellado.
- Evaluar beneficios del método de sellado frente a método convencional de filtrado.

## 1.2 Ubicación y accesos

El pozo que se analiza se sitúa en el Fundo “Los Peumos”, ubicado en la comuna de Hualqui, en la Región del Biobío, Chile, específicamente en el sector de Unihue ( $37^{\circ}08'00.7''$  S,  $72^{\circ}56'11.5''$  O). Desde Concepción, se puede llegar al lugar mediante la ruta O-60, al recorrer aproximadamente 46 [km] (ver Figura 1).



**Figura 1.** Mapa de ubicación y acceso al área de estudio en Unihue, comuna de Hualqui, región del Biobío, Chile.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Hidrografía

La región del Biobío cuenta con nueve cuencas hidrográficas (ver Figura 2). La zona de estudio pertenece específicamente a la cuenca del río Biobío, la cual se ubica entre los paralelos 36°42' – 38°49' S y 71°- 73°20' O, perteneciendo tanto al territorio de la región del Biobío como al de la región de Ñuble y Araucanía. Su área equivale al 65% del área total de la región del Biobío, convirtiéndola en una de las más grandes del país (DGA, 2019).

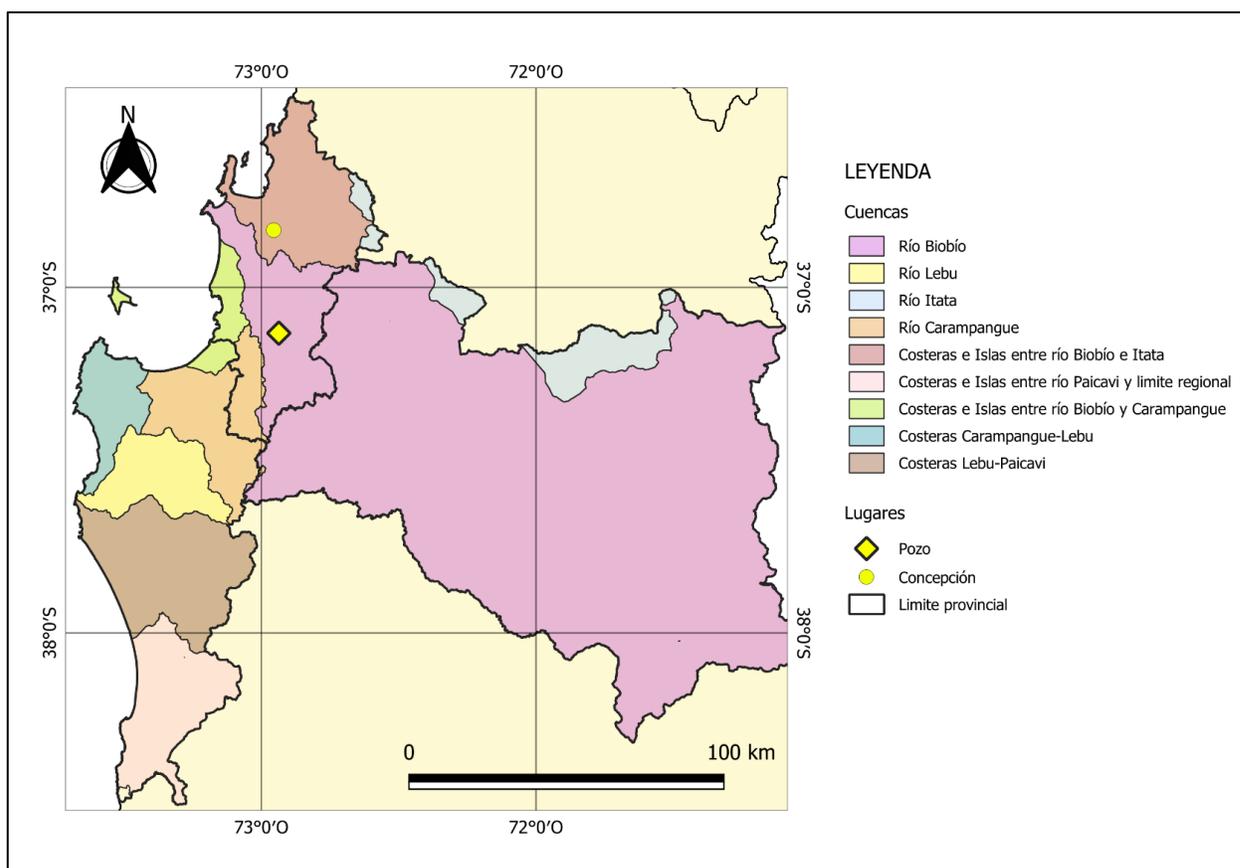


Figura 2. Mapa de cuencas hidrográficas de la región del Biobío.

El sistema fluvial del río Biobío se forma a partir de tres cuerpos de agua de origen glaciar en la Cordillera de los Andes: los lagos Galletué e Icalma, que son fuentes directas del río Biobío, y la laguna del Laja, la cual da origen al río Laja, su principal afluente (ver Figura 3).

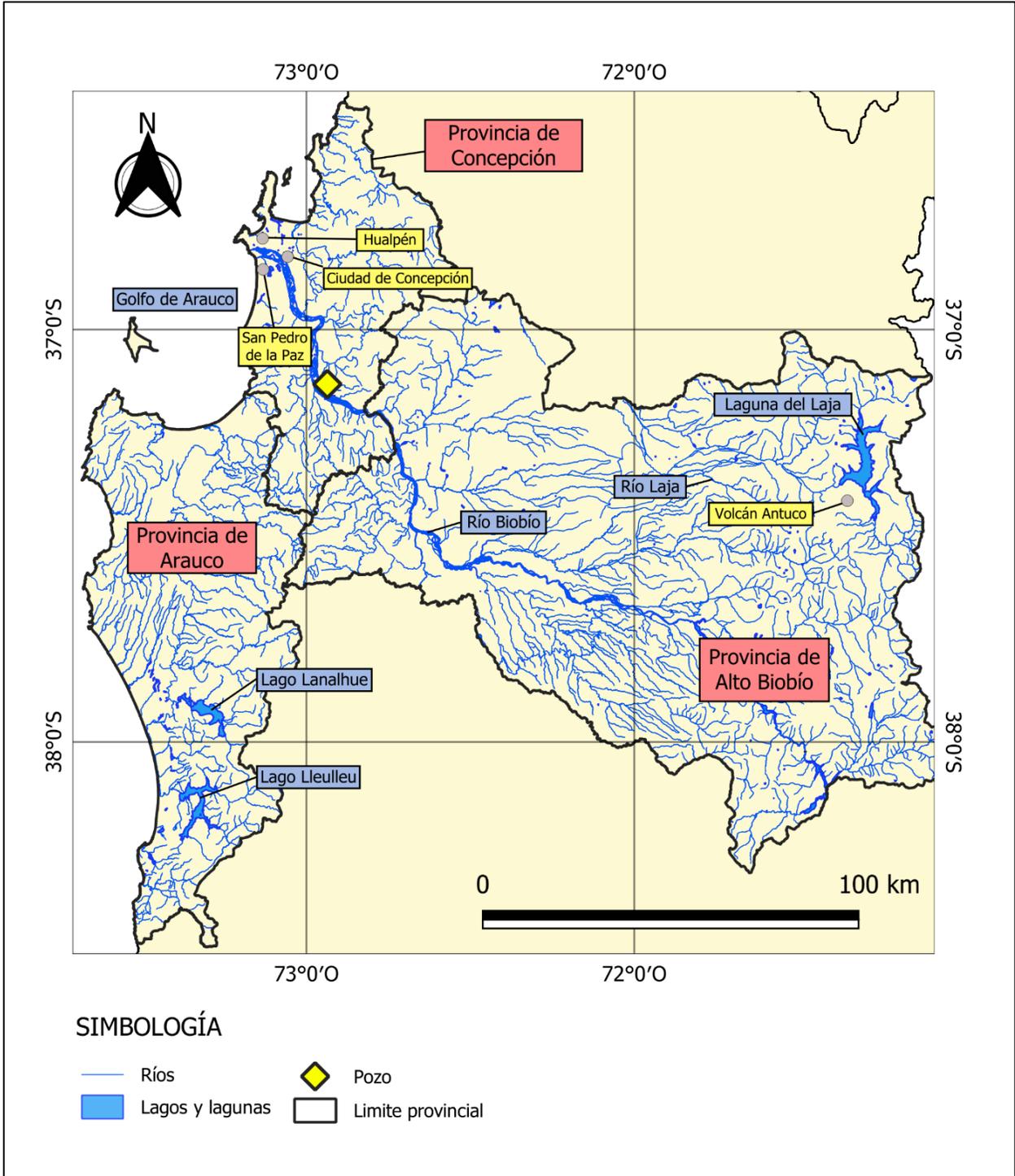


Figura 3. Mapa hidrográfico de la región del Biobío.

En su curso superior, este río atraviesa un valle intermontano de origen glacial, creando numerosos meandros a través de un paisaje estepario caracterizado por la presencia abundante de coironales y matorrales bajos (DGA, 2019).

En su curso medio, cerca de la localidad de Nacimiento, el río Biobío es alimentado por el Vergara, su afluente más significativo al sur, nacido unos pocos kilómetros al norte de Angol mediante la unión de los ríos Malleco y Rahue. El río Vergara, a su vez, recibe su principal aporte del río Renaico, que se une a él poco después de pasar por la ciudad del mismo nombre (DGA, 2019).

En el curso inferior del río Biobío, cerca de San Pedro de la Paz, el lecho se ensancha considerablemente, llegando a superar los dos kilómetros de ancho. Este ensanchamiento provoca la acumulación de arena gruesa, formando una barra en su desembocadura que dificulta la navegación incluso para embarcaciones pequeñas procedentes del océano (DGA, 2019).

## 2.2 Hidrología

El río Biobío tiene un caudal promedio de 30 [m<sup>3</sup>/s] en su nacimiento. Después de recorrer 380 [km], desemboca en el mar al sur de los cerros de Hualpén. En su desembocadura, el caudal medio anual varía entre 300 y 900 [m<sup>3</sup>/s], con crecidas habituales de hasta 8.000 [m<sup>3</sup>/s]. Ocasionalmente, se pueden registrar crecidas excepcionales de más de 17.000 [m<sup>3</sup>/s], aproximadamente una vez cada cien años (Valdovinos & Parra, 2006).

La hidrología del río principal y sus afluentes exhibe comportamientos distintos debido a las diferentes unidades morfológicas presentes en la cuenca, que influyen en la distribución de la precipitación nival y/o pluvial a lo largo de toda su extensión. Además, las formaciones geológicas ejercen una influencia diversa en los aportes de aguas subterráneas a los cauces superficiales (Valdovinos & Parra, 2006).

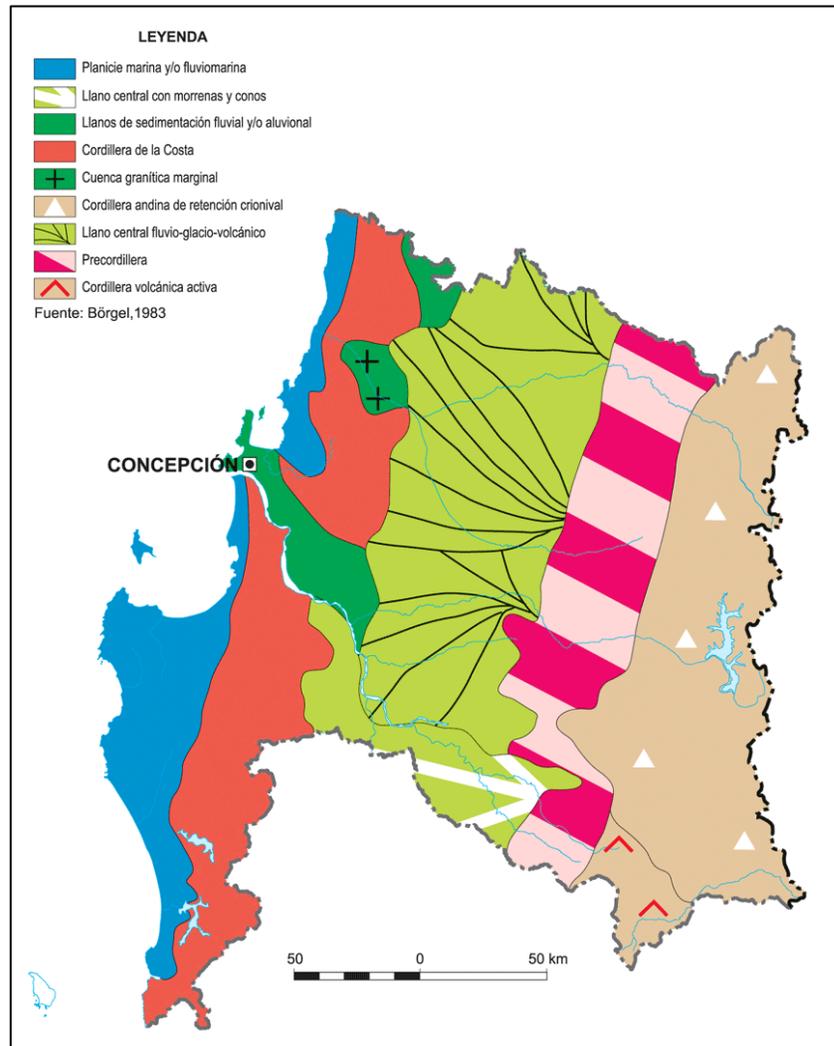
Al observar los caudales medios mensuales medidos en la estación “Biobío en Desembocadura”, perteneciente a la Dirección General de Aguas (DGA), se puede notar que el río sigue un régimen pluvio-nival. El caudal máximo medio mensual alcanza aproximadamente 2.200 [m<sup>3</sup>/s] en los meses de junio-julio, mientras que el caudal mínimo se registra en marzo-abril, con valores cercanos a los 180 a 220 [m<sup>3</sup>/s], antes de que comiencen las precipitaciones, gracias a aportes nivales remanentes y a los acuíferos (Valdovinos & Parra, 2006).

Por otro lado, el río Laja en Tucapel, con una cuenca de 2.680 [km<sup>2</sup>], presenta caudales medios anuales de 170 [m<sup>3</sup>/s]. Existe una alta correlación entre los caudales del río Laja y el río Biobío en el Alto Biobío, proporcionalmente a sus áreas, ya que ambas cuencas exhiben un régimen pluvio-nival debido a que sus cabeceras corresponden a zonas cordilleranas. Las precipitaciones en las áreas de origen de estos ríos son bastante similares. Aunque la alta meseta de Lonquimay, donde nace el Biobío, registra precipitaciones inferiores a 2.000 [mm], el resto de su curso alto experimenta un aumento progresivo en las precipitaciones, llegando a superar los 4.000 [mm] anuales en algunos sectores. En el caso del río Laja, las fuentes de origen recogen aguas de escorrentía de áreas con precipitaciones que exceden los 4.000 [mm] anuales (Valdovinos & Parra, 2006).

### 3. MARCO GEOLÓGICO

#### 3.1 Unidades morfoestructurales

La región del Biobío comprende cinco unidades morfológicas mayores, ordenadas de este a oeste son las siguientes: Cordillera Andina, Precordillera, Llano central fluvio-glacio-volcánico, Cordillera de la Costa y Planicie Litoral y/o fluvio-marina. El área de estudio pertenece a la Planicie Litoral (Borgel, 1983) (ver Figura 4).



**Figura 4.** Unidades geomorfológicas de la región del Biobío (Borgel, 1983).

Las planicies litorales se distribuyen en forma discontinua de norte a sur, con una altura variable entre 10 y 50 ms.n.m. Las planicies de mayor desarrollo están en el sector meridional, en el sector costero de la ciudad de Concepción y en las localidades de San Pedro y Escudrón (DGA, 2019).

Los llanos de sedimentación fluvial y/o aluvional se distribuyen aledaños al curso distal del río Biobío, cercano a su desembocadura y corresponde a llanos de sedimentación fluvial de arenas negras provenientes de la actividad del volcán Antuco que se depositan finalmente en las playas norte del río por deriva litoral. Al sur de la desembocadura del río las arenas son blancas por la alteración del intrusivo granítico de la costa (DGA, 2019).

### **3.2 Unidades geológicas**

Estratigráficamente, las rocas más antiguas reconocidas en la cuenca del Biobío corresponden a rocas metamórficas paleozoicas, que se distribuyen principalmente en el sector occidental de la Cordillera de Nahuelbuta y conforman las series oriental y occidental según Hervé (1977), depositadas probablemente en el Paleozoico (DGA, 2012).

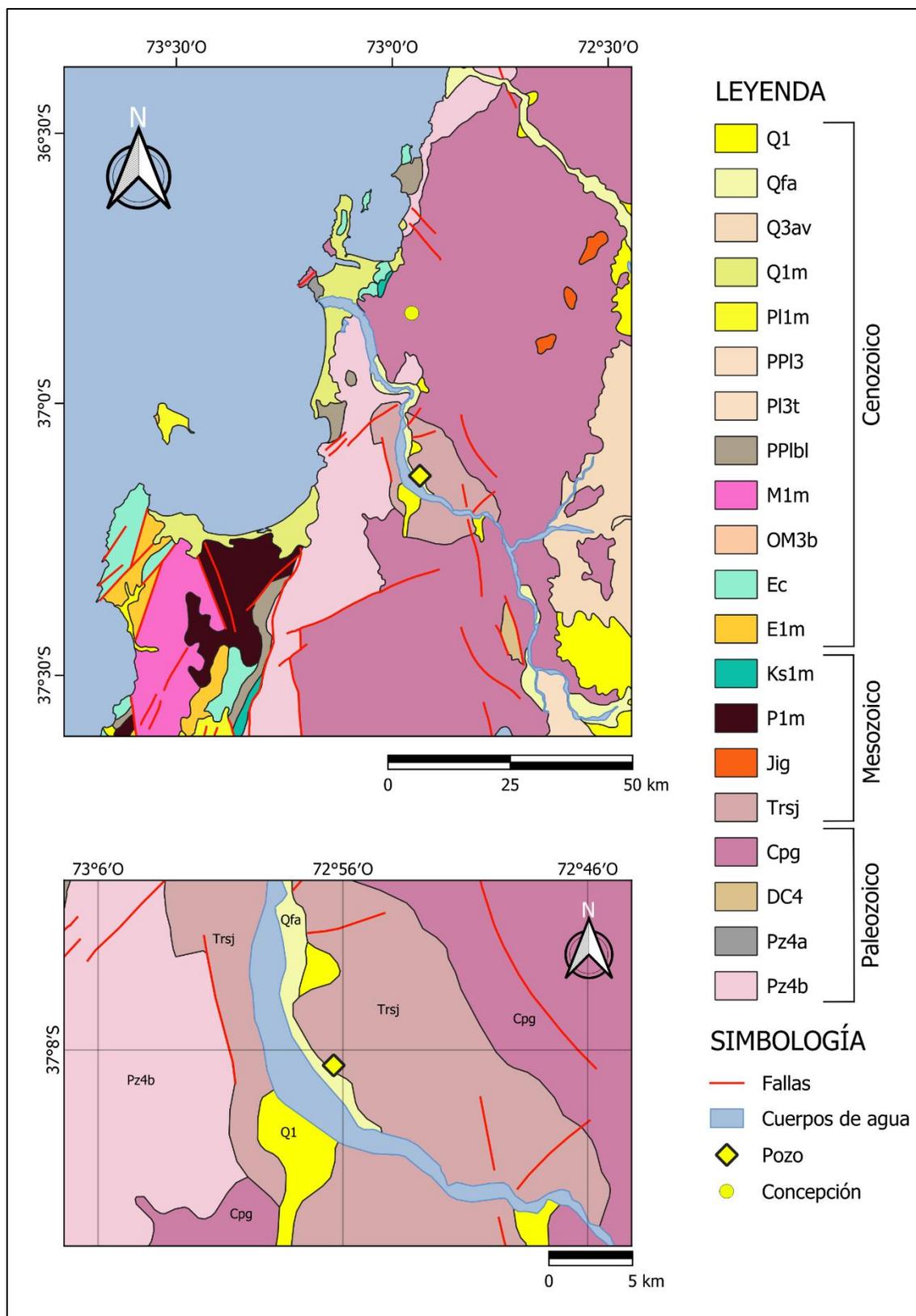
Discordantemente sobre ellas se exponen los Estratos de Pocillas-Coronel de Maule-Quirihue y rocas de la Formación Santa Juana, asignadas al Triásico y que incluyen sedimentitas clásticas y volcanitas, expuestas en el sector de Pocillas-Coronel de Maule-Quirihue, y sedimentitas marinas y continentales, en el extremo noroccidental de la cuenca del Biobío (DGA, 2012).

Durante el Pleistoceno-Holoceno, las glaciaciones afectaron el área con la acumulación de potentes secuencias sedimentarias glacio-lacustres y morrénicos en la Depresión Central y Cordillera Andina (dando forma a la Precordillera) (DGA, 2012).

Finalmente, procesos eólicos, fluviales, volcánicos modernos y de erosión determinaron la acumulación y movimiento de materiales hasta alcanzar la morfología actual. Además de lo anterior, en la zona costera existen depósitos de terrazas marinas desarrollados probablemente durante el Pleistoceno y Holoceno. También la mano del hombre ha conseguido variar, en parte, estos procesos, con el aumento de la erosión debido a la explotación de los bosques y la agricultura (DGA, 2012).

Las rocas intrusivas expuestas en superficie se han agrupado en cuatro fases magmáticas, desarrolladas entre el Carbonífero-Pérmico, el Jurásico, el Cretácico y el Terciario (DGA, 2012).

A continuación, se describen en detalle las formaciones geológicas presentes en el área de estudio (ver Figura 5).



**Figura 5.** Geología de la zona de estudio, dentro de la provincia de Concepción (Modificado de DGA, 2012).

### **Serie Oriental Basamento Metamórfico (Pz4b) – Silúrico-Carbonífero**

Esta serie se dispone como una franja continua y sub-paralela a la Serie Occidental. Consiste principalmente a metaturbiditas polifásicamente deformadas, con estructuras primarias reconocibles y lentes de rocas calcosilicatadas, probablemente depositadas en una cuenca de antearco. Se reconocen principalmente esquistos, filitas, gneises y metareniscas, cuyo grado de metamorfismo varía entre las facies de esquistos verdes y granulitas. Contiene mineralización de biotita, andalucita y sillimanita (Hervé, 1977), además de granate, clorita, epidota y óxidos de hierro (Palape, 2014). El metamorfismo aumenta su intensidad hacia el este, hacia el Batolito Costero (Cpg), y se desarrolló bajo relativamente bajas razones de presión/temperatura, alcanzando localmente la transición entre las facies anfibolita-granulita (Hervé et al., 1984). Esta unidad es intruída por un batolito de edad Carbonífero tardío – Pérmico temprano y le sobre-yacen discordantemente depósitos Triásicos tardíos (Rodríguez et al., 1999) (DGA, 2019).

### **Intrusivos Carboníferos-Pérmicos tonalitas y granodioritas indiferenciadas (Cpg)**

Se distribuyen como una franja continua de dirección general NNE-SSO, al oeste de las rocas del Basamento Metamórfico, conformando gran parte de la Cordillera de la Costa. Está conformado por un complejo plutónico cuya composición petrográfica varía entre tonalita y granodiorita, con sectores menos extensos de diorita cuarcífera y granito. Este complejo plutónico fue definido por Gonzalez-Bonorino (1970) y Hervé et al. (1976), como el Batolito de la Costa. Cuenta con mineralización principal de plagioclasa, hornblenda, y biotita, junto con minerales accesorios de titanita, apatito y minerales de hierro (Hervé, 1976). Tiene una relación de contacto intrusivo con las rocas del basamento metamórfico y subyace, con discordancia de erosión, a las series sedimentarias y sedimentario-volcánicas del Triásico (DGA, 2019).

### **Formación Santa Juana (Trsj) – Triásico Superior**

Corresponde a secuencias continentales y marinas, reconocidas en el curso inferior del río Biobío. Sobreyace, en discordancia de erosión, al basamento granítico. Además, se encuentra en contacto por falla sobre la Serie Oriental del Basamento Metamórfico y, parcialmente, también lo sobreyace. Se divide en cuatro miembros dispuestos concordantemente. Las litologías principales corresponden, de base a techo, a: (1) conglomerados de cuarzo y arcosas continentales; (2) areniscas conglomerádicas, areniscas finas y lutitas, incluye, además, pequeños niveles de carbón

y restos fósiles vegetales y de invertebrados de agua dulce; (3) areniscas gruesas y arcillolitas de origen marino; y (4) lutitas negras, carbonosas, areniscas con intercalaciones conglomerádicas y brechas de origen continental. Contiene restos fósiles de vegetales e invertebrados de agua dulce (DGA, 2019).

### **Sedimentos de terrazas fluviales (Q1t) – Holoceno**

Esta unidad corresponde a los depósitos de gravas y arenas en niveles de terrazas, que se ubican en los ríos principales del área. Están compuestos por gravas y ripios, con clastos redondeados a subredondeados de andesitas y granitos de diámetro promedio entre 8 y 30 [cm], con fracciones variables de arenas y limos. Sus espesores máximos alcanzan a 20 [m]. Conforme a la descripción que entregan los autores que han levantado la geología del área, es posible estimar para estos rellenos aterrizados, una permeabilidad promedio entre  $10^{-3}$  [cm/s] (DGA, 2019).

### **Depósitos fluvio-aluviales antiguos (Q1fa) – Pleistoceno-Holoceno**

Corresponden a materiales no consolidados, representados por gravas, ripios y arenas, que constituyen el relleno de los cauces de los ríos y esteros. Se diferencian de los depósitos actuales al ser estos últimos asociados al cauce actual, mientras que los descritos corresponden a los depósitos generados en los paleocauces. Estos rellenos subactuales probablemente presenten permeabilidades entre  $5 \times 10^{-3}$  y  $10^{-3}$  [cm/s] (DGA, 2019).

### **Depósitos fluvio-aluviales actuales (Q1) – Pleistoceno-Holoceno**

En el cauce actual de los ríos y esteros se encuentran depósitos fluviales, torrenciales, donde se mezclan bloques, gravas, arenas y arcillas. Estos depósitos, aunque tienen buen desarrollo solo en los ríos principales, se encuentran también en cada uno de los cauces menores. Es frecuente observar, en la desembocadura de un cauce menor en otro mayor, abanicos fluviales donde se depositan importantes espesores de arenas y gravas. Estos rellenos actuales deberían tener permeabilidades entre  $10^{-2}$  y  $10^{-3}$  [cm/s] (DGA, 2019).

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 Recopilación de antecedentes

#### 4.1.1 Estratigrafía

La estratigrafía se realizó en base a la descripción de muestras del material extraído durante la perforación del pozo en estudio, la cual se compone principalmente de arenas de distinta granulometría y espesor, las cuales sobreyacen a la roca fracturada. Al no presentar tramos de sedimentos finos de gran espesor, se asume que no existen capas confinantes y por ende se trata de un acuífero libre. A continuación, se muestra un esquema en el que se describe tanto la habilitación como la estratigrafía del acuífero en la captación (ver Figura 6).

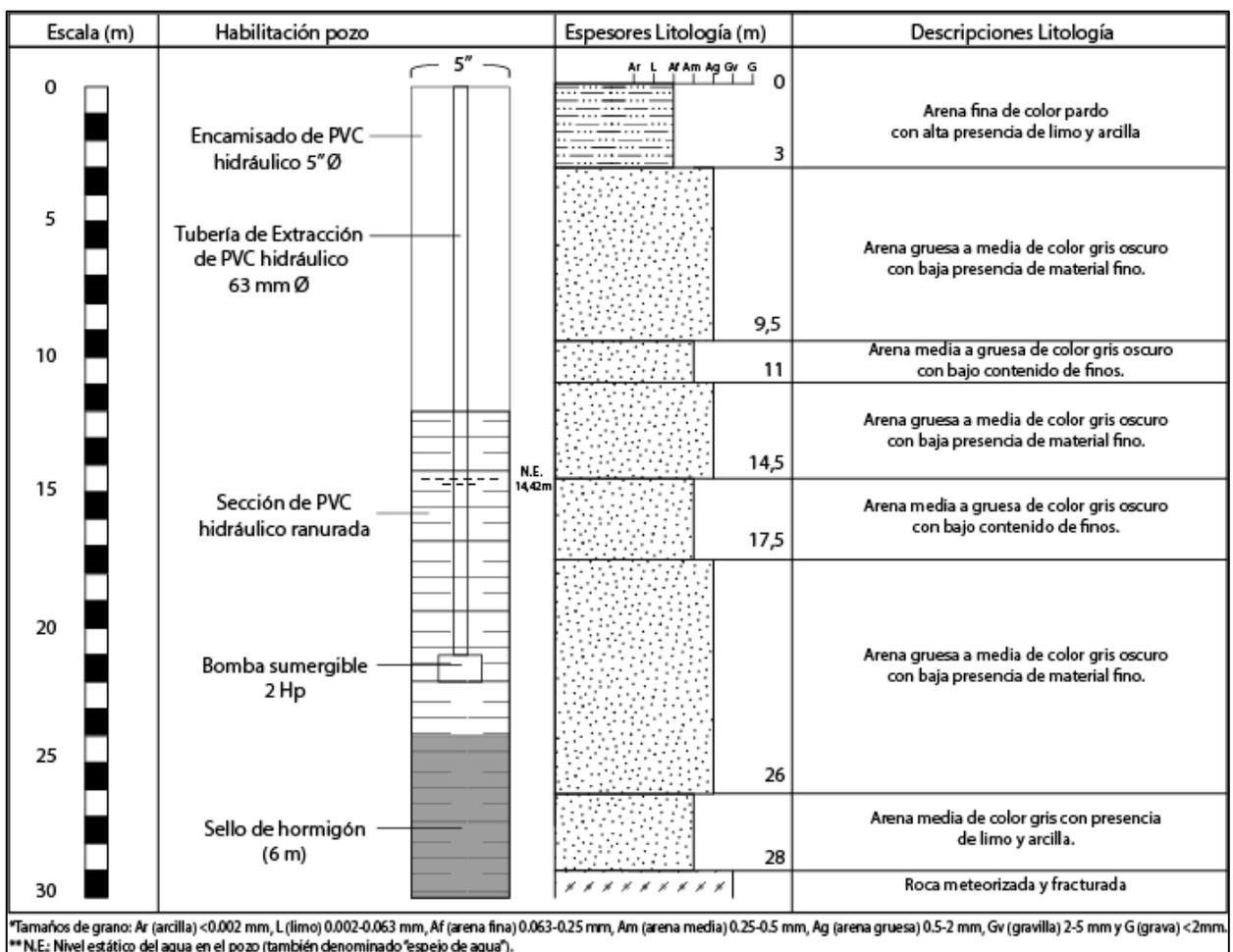


Figura 6. Estratigrafía de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2 Mediciones hidrológicas

Se realiza un estudio en la zona que pueda aportar información sobre las características físicas del acuífero del cual se extrae el agua subterránea, mediante una prueba de bombeo a caudal constante y una prueba de recuperación. Para ambas mediciones se utiliza un piezómetro encargado de medir el nivel dinámico del agua subterránea (ver Figura 7).



Figura 7. Piezómetro utilizado en las pruebas de bombeo y recuperación.

También se midió el caudal del pozo, utilizando un barril graduado el cual se llenó con agua, mientras se registraba el tiempo de llenado.

A su vez, para obtener los parámetros del acuífero se utilizó el software *Aquifer Test II Pro* para un acuífero libre en base a la estratigrafía y el comportamiento del acuífero en el bombeo, obteniendo así la transmisibilidad promedio del acuífero. Además, se obtiene que la permeabilidad, utilizando la formula:

$$K = T/b \left[ \frac{m}{\text{día}} \right]$$

Donde:

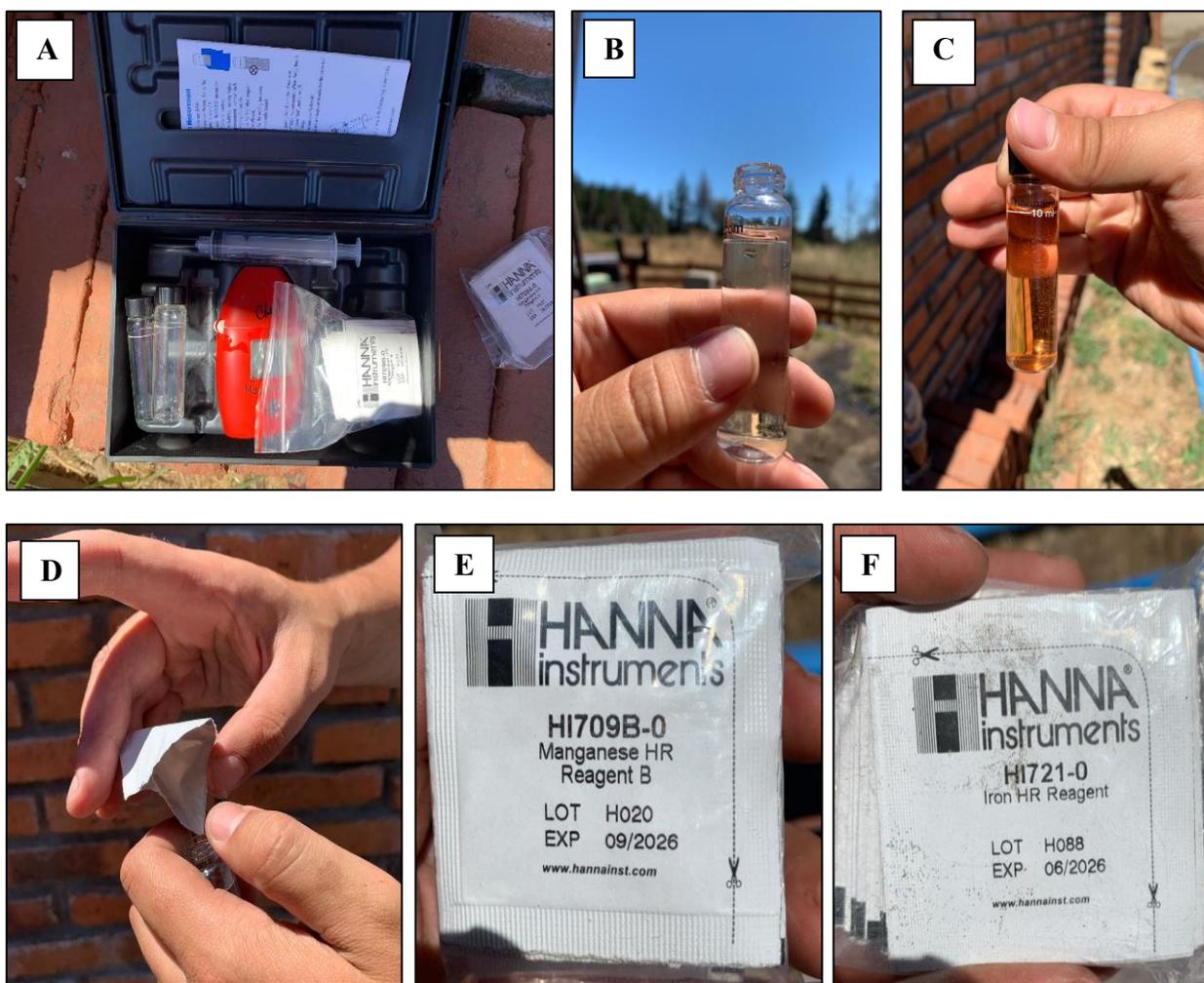
K: permeabilidad [m/día]

T: transmisibilidad [m<sup>2</sup>/día]

b: columna de agua [m] (resta desde el fondo del pozo al nivel estático).

### 4.1.3 Análisis químico del agua

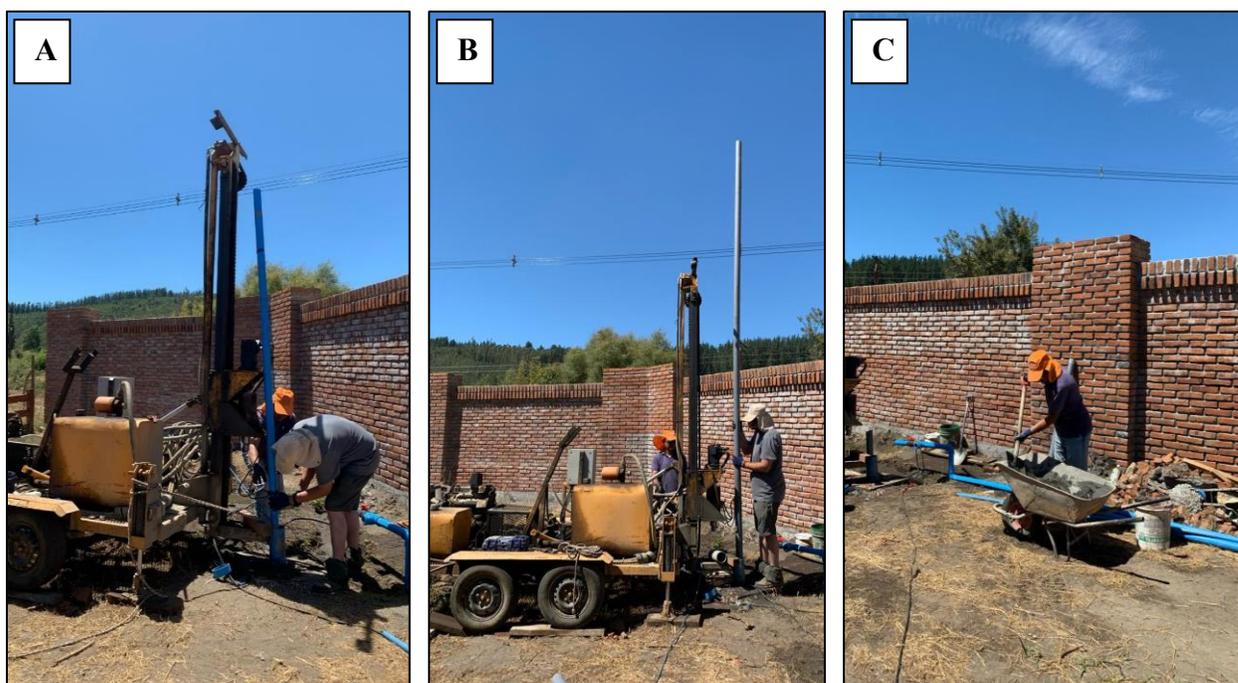
En conjunto a los procesos anteriores, se realiza un análisis químico del agua con un medidor portátil de hierro y manganeso de la marca Hanna. El instrumento tiene incorporado una fuente de luz tipo LED de longitud de onda fija, de 575 [nm] para el medidor de hierro y 525 [nm] para el medidor de manganeso, y un detector de fotos de silicio, lo que determina con precisión la concentración de iones. El medidor de hierro tiene una precisión de  $\pm 0.05$  [mg/L], mientras que el de manganeso tiene una precisión de  $\pm 0.01$  [mg/L] (Hanna Instruments, 2024). El hierro se hace reaccionar con compuestos de sodio, mientras que el Mn reacciona con derivados del potasio (ver Figura 8).



**Figura 8.** Materiales utilizados en el análisis de agua. **A:** Medidor portátil. **B-C:** Toma de muestras y su cambio de color posterior a los reactivos utilizados. **D:** Aplicación de los reactivos. **E:** Reactivo utilizado para la medición de Mn. **F:** Reactivo utilizado para la medición de Fe.

## 4.2 Sellado del pozo

Previo al sellado, se proceden a retirar los tubos junto a la bomba hidráulica que permiten el funcionamiento del pozo. Luego se realiza la mezcla de cemento, con un aditivo acelerador de fraguado, el cual actuará como una especie de tapón en el método de sellado. Una vez preparada la mezcla, se inyectó en el pozo a través de nuevas tuberías de PVC sanitario instaladas previamente desde la superficie hasta el fondo del pozo (ver Figura 9). Después de la inyección, el cemento se dejó fraguar durante 3 días. De los 30 [m] de profundidad del pozo, se sellaron solo 6 [m].



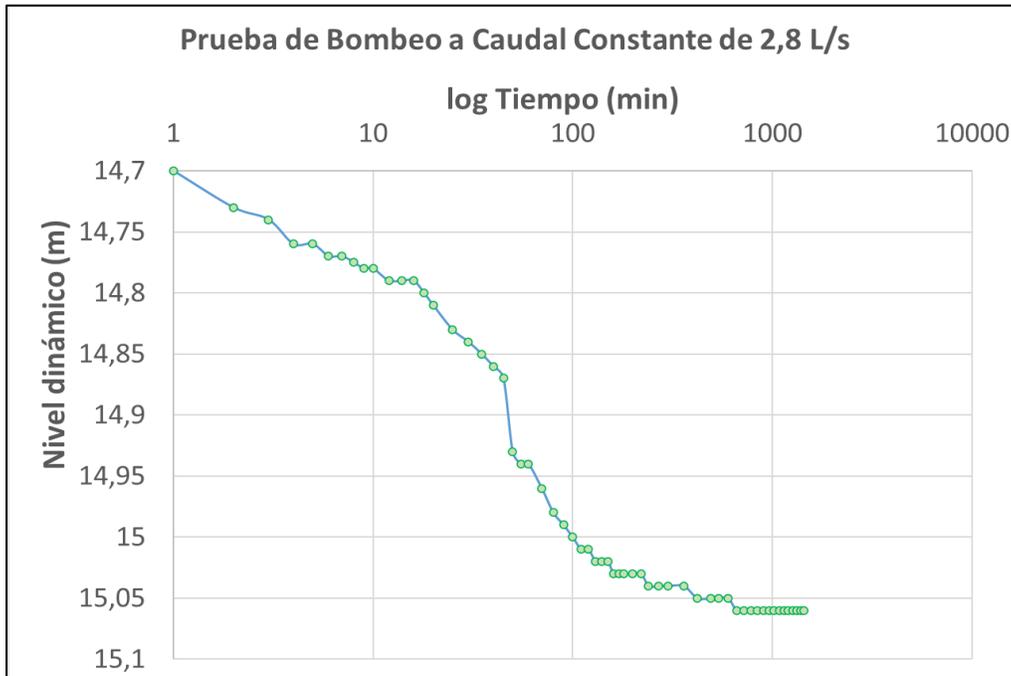
**Figura 9.** Método de sellado. **A:** retiro de tuberías y bomba hidráulica. **B:** instalación de tuberías para la inyección de cemento. **C:** preparación e inyección de la mezcla dentro del pozo.

Posterior a los 3 días, se realizan nuevamente las pruebas de bombeo y recuperación, medición de caudal y análisis químico, con tal de evaluar variaciones y efectos del sellado del pozo.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Previo al sellado

La medición inicial del caudal registró un flujo de 2,8 [L/s]. La prueba de bombeo se realizó a caudal constante durante 24 horas (1440 [min]), la cual se inicia con un nivel estático del pozo a 14,13 [m] de profundidad, estabilizándose en su nivel dinámico 15,06 [m] (ver Figura 10, ver Anexo 1).



**Figura 10.** Descenso del nivel dinámico [m] respecto al tiempo [min] en la prueba de bombeo a caudal constante 2,8 [L/s], previo al sellado.

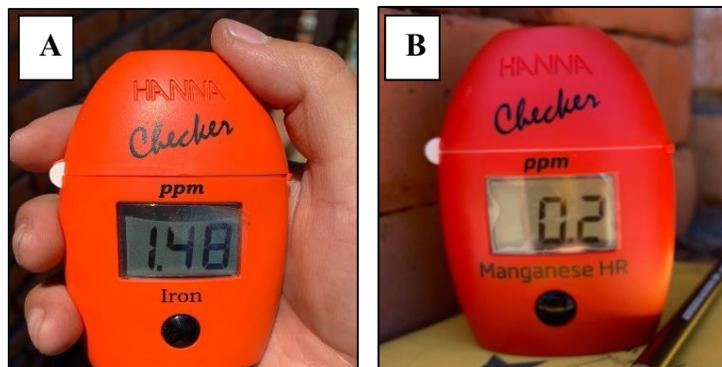
La prueba de recuperación se inició con el pozo en su nivel dinámico de 15,06 [m] de profundidad, observándose que en aproximadamente 25 [min] se recupera prácticamente toda la columna de agua que se perdió en la prueba de bombeo, llegando a su nivel estático 14,13 [m] (ver Figura 11, ver Anexo 2).



**Figura 11.** Ascenso del nivel dinámico [m] respecto al tiempo [min] en la prueba de recuperación previo al sellado.

Con estos datos, mediante el software *Aquifer Test II Pro*, se obtuvo una transmisibilidad promedio del acuífero de  $337 \text{ m}^2/\text{día}$ . Además, con una columna de agua de  $15,87 \text{ [m]}$ , se obtuvo una permeabilidad de  $23,85 \text{ [m/día]}$ .

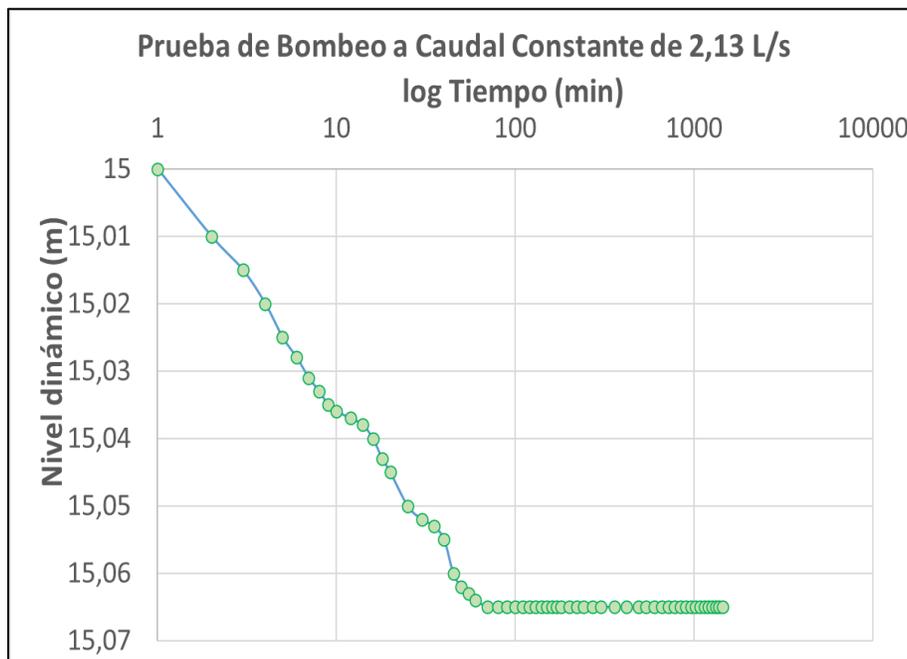
Las mediciones de hierro y manganeso arrojan un resultado de  $1,48 \text{ [mg/L]}$  y  $0,2 \text{ [mg/L]}$  respectivamente en una muestra de  $10 \text{ [ml]}$  de agua (ver Figura 12), no estando dentro de la normativa vigente de agua potable ( $0,3 \text{ [mg/L]}$  para el Fe y  $0,1 \text{ [mg/L]}$  para Mn; NCh409/1. Of2005).



**Figura 12.** Resultados de análisis de agua antes del sellado. A: Concentración de Fe. B: Concentración de Mn.

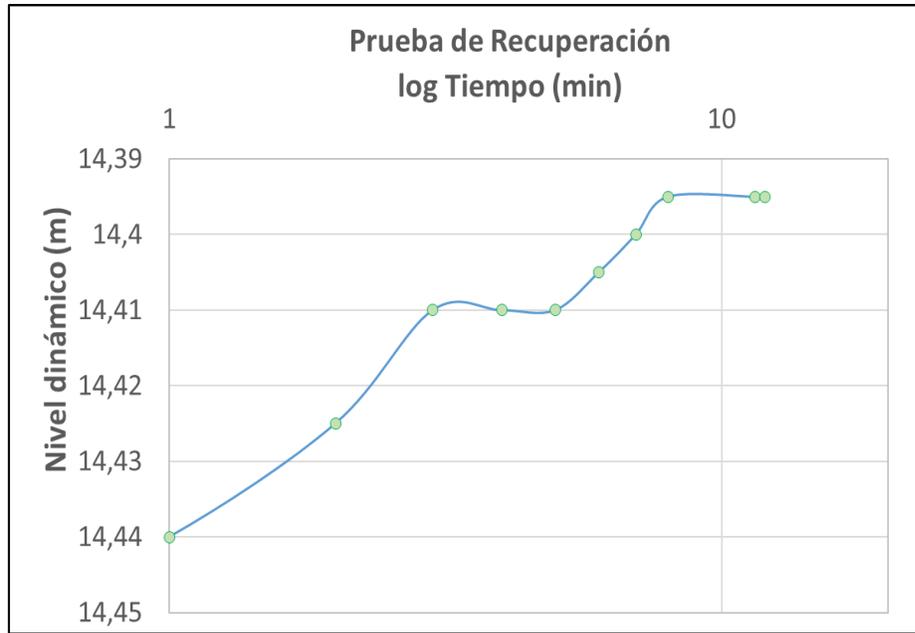
## 5.2 Posterior al sellado

Tras completar el sellado del pozo, la medición de caudal mostró un ligero descenso, arrojando un valor de 2,13 [L/s]. La prueba de bombeo se realizó a caudal constante durante 24 horas (1440 [min]), la cual se inicia con un nivel estático del pozo a 14,42 [m] de profundidad, estabilizándose en su nivel dinámico 15,065 [m] (ver Figura 13, ver Anexo 3).



**Figura 13.** Descenso del nivel dinámico [m] respecto al tiempo [min] en la prueba de bombeo a caudal constante de 2,13 [L/s], posterior al sellado.

La prueba de recuperación se inició con el pozo en su nivel dinámico de 15,065 [m] de profundidad, observándose que en aproximadamente 8 [min] se recupera prácticamente toda la columna de agua que se perdió en la prueba de bombeo, llegando a su nivel estático 14,395 [m] (ver Figura 14, ver Anexo 4).



**Figura 14.** Ascenso del nivel dinámico [m] respecto del tiempo [min] en la prueba de recuperación, posterior al sellado.

Con estos datos, mediante el software *Aquífer Test II Pro*, se obtuvo una transmisibilidad promedio del acuífero de 271 m<sup>2</sup>/día. Además, con una columna de agua de 15,58 [m], se obtuvo una permeabilidad de 17,39 [m/día].

Las mediciones de hierro y manganeso arrojan un resultado considerablemente menor, de 0,13 [mg/L] y 0,1 [mg/L] respectivamente en una muestra de 10 [ml] de agua (ver Figura 15), estando dentro de la normativa vigente de agua potable (0,3 [mg/L] para el Fe y 0,1 [mg/L] para Mn; NCh409/1. Of2005).



**Figura 15.** Resultados del análisis químico posterior al sellado. **A:** Concentración de Fe. **B:** Concentración de Mn.

### 5.3 Resumen de variables

La tabla adjunta (ver Figura 16) proporciona una recopilación de los resultados químicos y parámetros hidráulicos obtenidos, incluyendo la permeabilidad y transmisibilidad, que son esenciales para comprender la capacidad de flujo del acuífero.

	Antes	Después
Fe (mg/L)	1,48	0,13
Mn (mg/L)	0,2	0,1
Caudal Constante [L/s]	2,8	2,13
Transmisibilidad [m <sup>2</sup> /día]	337	271
Nivel Estático [m]	14,13	14,42
Columna de agua [m]	15,87	15,58
Permeabilidad [m/día]	23,85	17,39

**Figura 16.** Recopilación de resultados obtenidos.

En resumen, el sellado con cemento cumplió con el objetivo de reducir los contenidos de hierro y manganeso a concentraciones aceptadas por la normativa de aguas vigente (NCh409/1 Of2005), la cual especifica una concentración máxima de 0,3 [mg/L] para el Fe y 0.1 [mg/L] para el Mn.

Sin embargo, el sellado ha reducido tanto la capacidad de extracción de agua del pozo (caudal) como la capacidad de transmisión y la facilidad de flujo de agua a través de las rocas circundantes (transmisibilidad y permeabilidad, respectivamente).

Pese a eso, al calcular el rendimiento del pozo en base a la transmisibilidad, utilizando una regla de tres, obtenemos que su eficiencia actual corresponde a un 80%. Si bien los resultados reflejan una reducción en el potencial hidráulico, el pozo sigue en óptimas condiciones de rendimiento, cumpliendo con su rol inicial de abastecer con agua potable al Fundo “Los Peumos”.

## **6. DISCUSIÓN**

### **6.1 Origen del hierro y manganeso**

La litología presente en la zona de estudio juega un rol clave en el origen del hierro y manganeso detectado, ya que corresponden principalmente a depósitos fluvio-aluviales (Q1), los cuales se encuentran en contacto con el Batolito de la Costa (Cpg) y la Serie Oriental del Basamento Metamórfico (Pz4b).

La lixiviación de los minerales presentes en estas rocas contribuye a la adición de hierro y manganeso a las corrientes de agua, con una mayor concentración en las aguas subterráneas que en las superficiales debido al prolongado tiempo de residencia y la mayor superficie de contacto (DGA, 2004). Esta situación se ve influenciada por el bajo pH, la alta concentración de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el escaso contenido de oxígeno disuelto (Avendaño, 2002). Se atribuye la disolución de minerales que contienen estos metales a la acción del  $\text{CO}_2$ , generado presumiblemente por la descomposición bacteriana de la materia orgánica que se filtra por el suelo en condiciones anaeróbicas, produciendo formas de  $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Mn}^{+2}$  (Fair et al., 1894). La conversión a sustancias insolubles ocurre cuando el agua subterránea es extraída de los pozos y alcanza la superficie, donde se expone al aire, lo que crea un ambiente de oxidación, lo que hace que eventualmente se generen precipitados de estos metales (Fair et al., 1984).

### **6.2 Efectos de la contaminación**

La presencia de hierro puede afectar el sabor del agua, producir manchas sobre los artefactos sanitarios y la ropa blanca, así como también puede formar depósitos en las redes de distribución y causar obstrucciones, alteraciones en la turbiedad y el color del agua (Sobsey, 2002). Cuando no existe un sistema de tratamiento para la contaminación por hierro, es común que actúen procesos biológicos, lo cual favorece el crecimiento de ferrobacterias (Marín, 2011).

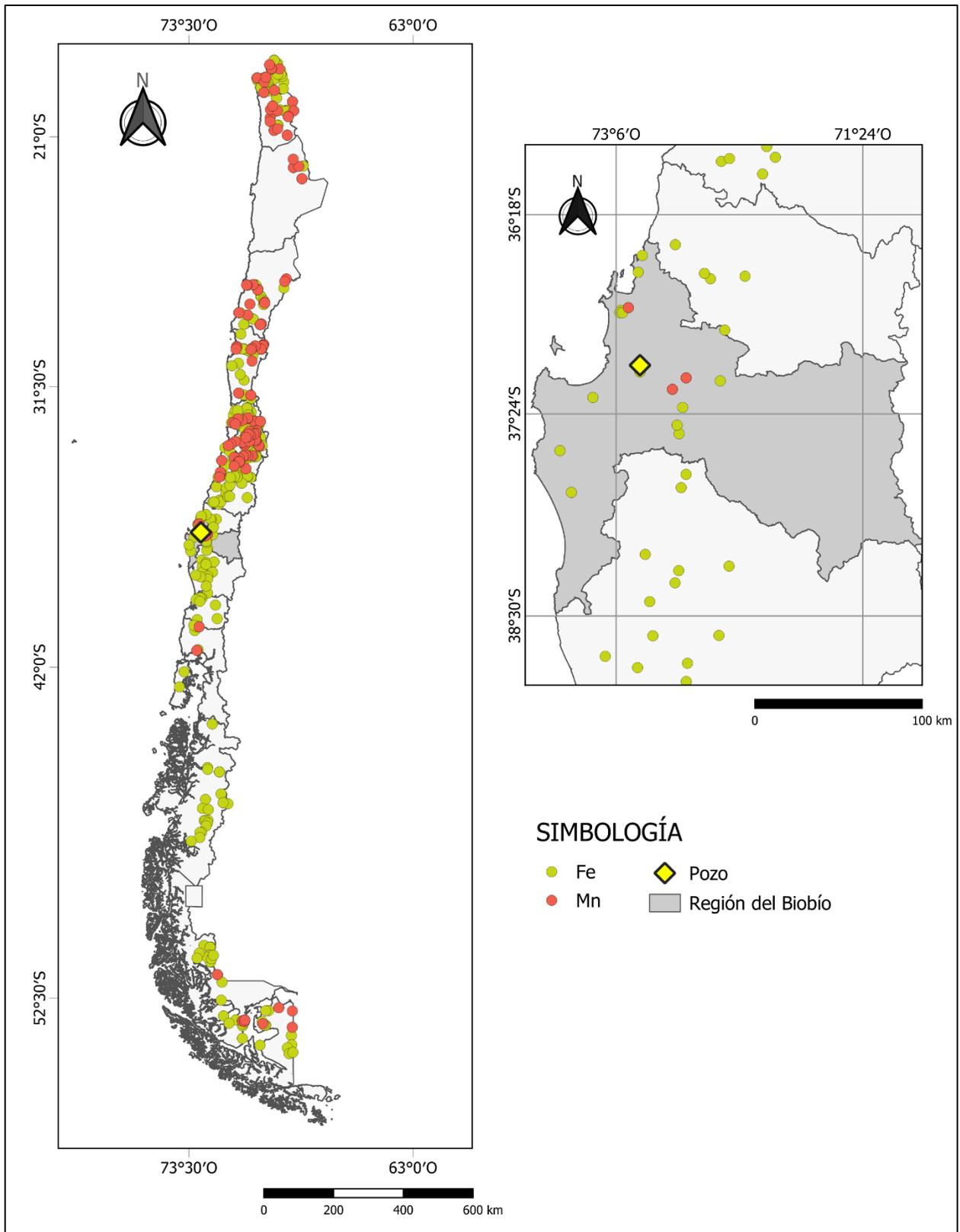
Por su parte, la oxidación de  $\text{Mn}^{+2}$  es sensible al pH, siendo más rápida a pH alto. El manganeso en el agua puede estar disuelto, como coloide o asociado a materias orgánicas que lo estabilizan fuertemente, dificultando su eliminación (Marín, 2011).

El consumo prolongado de aguas contaminadas con estos metales está asociado a múltiples problemas de salud, como lo son afectaciones al sistema nervioso, enfermedades coronarias e infartos, supresión del sistema inmunológico, cefalea, desordenes gastrointestinales, cirrosis

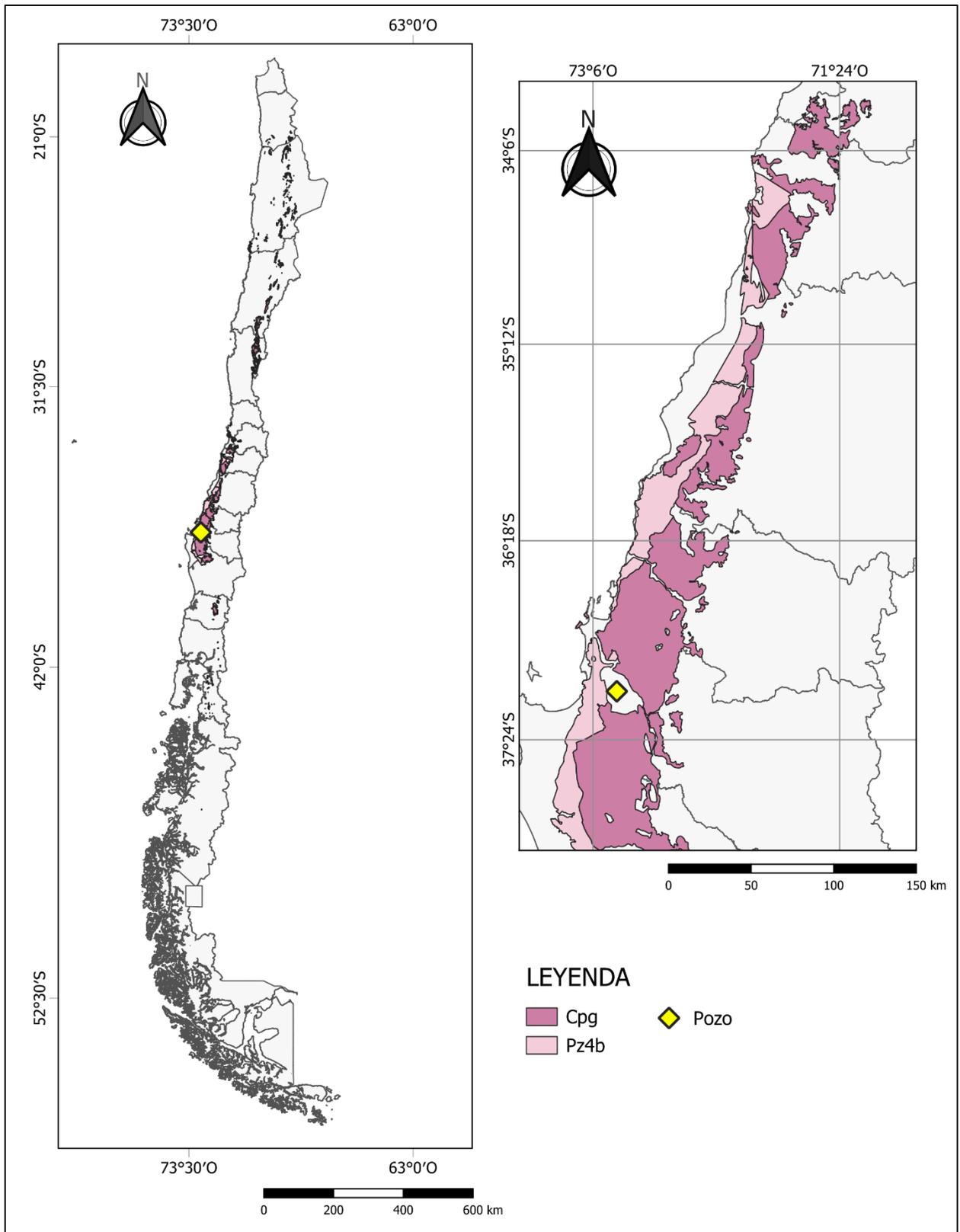
hepática, fibrosis del páncreas, diabetes, cáncer de esófago y vejiga, tumores fibroides, presión arterial elevada, hipertrofia de próstata y artritis (García-García et al., 2012; Roy & Andrews, 2001; Arezzini et al., 2003).

### **6.3 Extensión de la contaminación**

El problema que implica las altas concentraciones de hierro y manganeso no se acota únicamente al pozo que se está estudiando en el sector de Unihue. Según el mapa hidrogeoquímico de Chile (DGA, 2019), este problema tiene alcance tanto regional como nacional (ver Figura 17). Además, de acuerdo a la geología, el afloramiento del Batolito Costero (Cpg) y la Serie Oriental del Basamento Metamórfico (Pz4b) se extiende por al menos trece regiones (ver Figura 18), lo que respalda la idea de que este fenómeno es de alcance nacional debido a la presencia de hierro y manganeso en la mineralización de dichas formaciones.



**Figura 17.** Mapa hidrogeoquímico de Chile, con énfasis en las concentraciones de Fe y Mn que estén fuera de norma (Modificado de DGA, 2019).



**Figura 18.** Afloramiento del Batolito Costero (Cpg) y la Serie Oriental del Basamento Metamórfico (Pz4b).

#### 6.4 Tecnología para remoción de hierro y manganeso

Hoy en día, se han desarrollado métodos altamente avanzados para la eliminación de metales como el hierro y el manganeso del agua, entre los cuales se destaca el tratamiento por filtración. Este método, que utiliza filtros para mejorar la calidad del agua, se basa en un proceso de oxidación que convierte el hierro y el manganeso solubles en partículas sólidas, seguidos por un proceso de filtración que retiene estas partículas (Khatri et al., 2017), ofreciendo así una solución efectiva para la eliminación de estos metales. Los oxidantes empleados generalmente incluyen permanganato de potasio, peróxido de hidrógeno, cloro, ozono, dióxido de cloro, entre otros, de los que es necesario determinar la dosis óptima de acuerdo a las características del proceso (Vigneswaran & Visvanathan, 1995). Sin embargo, es importante destacar que este proceso puede resultar costoso y muchas veces inaccesible para cientos de personas.

Para una mejor dimensión de los costos que implica un tratamiento de aguas, se realizó una comparación entre los gastos de la realización del sellado de cemento aplicado en esta investigación y una planificación de un sistema de filtrado realizado con los productos de la empresa VALDIAQUA SpA.

Las concentraciones iniciales del pozo de Fe eran de 1,48 [mg/L] y de Mn de 0,2 [mg/L], además tenía un caudal de 2,8 [L/s], que por conversión equivale a 10,08 [m<sup>3</sup>/hr]. Una planificación para un sistema de filtrado se sobredimensiona para sobrepasar el caudal del pozo en aproximadamente entre un 20 y 50%, por lo que se debe buscar un filtro, o una combinación de ellos, con un flujo de servicio de al menos 12,09 [m<sup>3</sup>/hr]. Considerando esta información, se tienen las siguientes alternativas (ver Figura 19):

Variables	Modelos		
	RX2472/A	RX3072/A	RX3672/A
Flujo de servicio nominal [m3/hr]	3,21	5,015	7,22
Flujo de servicio máximo [m3/hr]	4,96	7,75	11,16
Concentración de Fe que soporta [mg/L]	10	10	10
Concentración de Mn que soporta [mg/L]	5	5	5
Precio	\$6.361.740	desde \$8.434.125 hasta \$13.999.000	\$8.999.000
Cantidad requerida	4	3	2
Total	\$25.446.960	desde =\$25.302.375 hasta \$41.997.000	\$17.998.000

**Figura 19.** Precio de filtros VALDIAQUA SpA. (Extraído de <https://ventadefiltrosdeagua.cl/>).

Por otra parte, para la realización del sellado se hizo la siguiente inversión (ver Figura 20):

Materiales/Mano de obra/Extras	Gastos
[30 m] Tubería sanitaria 75 [mm]	\$34.450
[2] Saco de cemento	\$6.460
Acelerador de fraguado	\$3.990
Áridos	\$35.000
Fitting sanitario	\$25.000
Flete	\$40.000
Bencina y alimentación	\$60.000
Mano de obra	\$220.000
<b>Total</b>	<b>\$424.900</b>

**Figura 20.** Gastos implicados en la realización del sellado de cemento (precios referenciales extraídos de <https://www.easy.cl/>).

Es importante destacar que la inversión realizada en el sellado con cemento es considerablemente menor en comparación con la implementación de un sistema de filtrado. Además, es crucial mencionar que el sellado se presenta como una solución libre de mantenimiento, mientras que en contraste, para un sistema convencional, además del costo inicial de los filtros, se deben afrontar los gastos de traslado, almacenamiento, mantención y mano de obra del operador, lo que incrementa aún más los costos.

### **6.5 Efectividad a corto y largo plazo**

La efectividad del sistema de filtrado convencional, utilizando como agente oxidante permanganato de potasio ( $\text{KMnO}_4$ ), es de un 100% para la remoción de hierro y de 90% para el manganeso (Elsheikh et al., 2018). La vida útil de los filtros se estima entre 3 a 5 años, y está estrechamente relacionada con la cantidad de metales que se deben eliminar del agua. Esta relación condiciona la cantidad de residuos dejados por el tratamiento, como precipitados de óxidos de hierro y manganeso, así como residuos del agente oxidante que no reacciona completamente con estos metales. Dicho esto, dada la limitación temporal que implica el uso de filtros, es que se debe considerar una reinversión periódicamente para así mantener la efectividad del sistema de filtrado.

Por su parte, no hay estudios aún que revelen la eficiencia a largo plazo del uso de cemento como método de remoción de hierro y manganeso. Sin embargo, su eficiencia a corto plazo se registra con un 95% para la remoción de hierro y 86% para manganeso (Aziz et al., 2001; Wang et al., 2016). Cabe mencionar que la interacción entre el agua y el cemento puede generar precipitados como carbonatos e hidróxidos de hierro y manganeso dependiendo del pH del sistema (Wang et al., 2016). Sin embargo, estas reacciones químicas se minimizan en este estudio, ya que el cemento se encuentra contenido en un tubo sanitario, el cual deja pasar el agua por ranuras de 0,8 [mm], por lo que la superficie de contacto entre el acuífero y el cemento es despreciable.

## 7. CONCLUSIÓN

En el área de estudio fue posible reconocer principalmente depósitos fluvio-aluviales (Q1), descritas como arenas finas a gruesas, a partir de las muestras recolectadas en la perforación del pozo. Estos depósitos están en contacto con las formaciones geológicas del Batolito Costero (Cpg) y la Serie del Basamento Metamórfico (Pz4b). Las altas concentraciones de hierro y manganeso presentes en el acuífero que alimenta al pozo son atribuibles al contacto con estas formaciones debido a la mineralización que estas presentan, incluyendo minerales de epidota, biotita, clorita, granate, anfíboles, y óxidos, los cuales contienen hierro y manganeso en su estructura cristalina. La estratigrafía de la zona fue el punto clave para pensar en la aplicación de este método de sellado, ya que, al no presentar capas de sedimento fino, permite sellar el pozo sin alterar significativamente el caudal ni su funcionalidad.

Los efectos negativos por el consumo prologado de aguas contaminadas por hierro y manganeso son diversos. Las consecuencias en la salud de las personas van desde daños fisiológicos hasta enfermedades terminales, mientras que, por otra parte, los sedimentos de estos metales ocasionan una reducción de la capacidad de flujo, producto de la sedimentación, en las redes de suministro de agua, acarreando problemas técnicos y financieros para entidades públicas como privadas.

Es importante resaltar que el problema asociado con la presencia de estos metales en el agua no se limita únicamente al área de estudio, sino que, dado el contexto geológico del país, puede considerarse como un desafío a nivel nacional.

Es por esto, que este estudio propone el método de sellado con cemento como una estrategia efectiva, rápida y de bajo costo para abordar la problemática de la contaminación por metales en el suministro de agua, recalando que su replicación debe considerar a pozos que presenten características estratigráficas e hidrológicas similares.

## REFERENCIAS

- AREZZINI, B., LUNGHI, B. & LUNGARELLA, G. (2003). Iron overload enhances the development of experimental liver cirrosis in mice. *Int Biochem Cell Biol.* Vol. 35. 486-495 pp.
- AVENDAÑO, N. (2002). Remoción de Hierro y Manganeso. *Unidad de Vigilancia de la Salud y Ambiente, México.* 1-4 pp.
- AVILA, P., RODRIGUEZ, M., RIVERÓN, A. & BASSAS, P. (2021). Evaluación del contenido de metales pesados en las aguas del Río Yamanigüey. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas.* Vol. 24 (48). 315-321 pp.
- AZIZ, H.A., OTHMAN, N., YUSSUF, M.S., BASRI, D.R.H, ASHAARI, F.A.H., ADLAN, M.N., OTHMAN, F., JOHARI, M. & PERWIRA, M. (2001). Removal of copper from wáter using limestone flitration technique: Determination of mechanism of removal. *Environment International.* Vol. 26 (5). 395-399 pp.
- BORA, A.J., MOHAN, R. & DUTTA, R. (2018). Simultaneous removal of arsenic, iron and manganese from groundwater by oxidation-coagulation-adsorption at optimazed pH. *Water Science & Technology: Water Supply.* Vol. 18 (1). 60-70 pp.
- BORGEL, R. (1983). Capítulo 3: Geomorfología, Geografía de Chile, Santiago: Instituto Geográfico Militar (IGM).
- Dirección General de Aguas (DGA). (2004). Cuenca del Río Biobío.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2012). Estudio Hidrogeológico cuenca Bío Bío.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2018). Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la región del maule.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2019). Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de las regiones de Ñuble y del Biobío.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2019). Mapa hidrogeoquímico de Chile, SIT N°448, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Conservación de Recursos Hídricos, Santiago, Chile, Realizado por DICTUC S.A.
- ELSHEIKH, M., GUIRGUIS, H. & FATHY, A. (2018). Removal of iron and manganese from groundwater: a study of using potassium permanganate and sedimentation. *MATEC Web of Conferences.* Vol. 162.
- FAIR, G.M., GEYER, J. & OKUN, D. (1984). Water and Waste Water Engineering. *Editorail J. Wiley.* Vol. 2
- GARCÍA-GARCÍA, N., PEDRAZA-GARCIGA, J., MONTALVO, J.F., MARTINEZ, M. & LEYVA, J. (2012). Evaluación preliminar de riesgos para la salud humana por metales pesados en las bahías de Buenavista y San Juan de los Remedios, Villa Clara, Cuba. *Revista cubana de química.* Vol. 24 (2): 126-135 pp.

- GUILLEN-RIVAS, J.; JARAMILLO-CEDENO, A.; BAQUERIZO-CRESPO, R. & CORDOVA-MOSQUERA, R. (2021). Estudio de los procesos de remoción de hierro y manganeso en aguas subterráneas: una revisión. *Polo del Conocimiento*. Vol. 6 (9): 1384-1407 pp.
- GONZÁLEZ-BONORINO, F. (1970). Metamorphism of the Crystalline Basement of Central Chile. *Journal of Petrology*. Vol. 12 (1). 149-175 pp.
- HANNA INSTRUMENTS. (2024). General Catalog. Vol. 38.
- HERVÉ, F. (1977). Petrology of the Crystalline Basement of the Nahuelbuta Mountains, Southcentral Chile. Comparative studies on the geology of the Circum Pacific Orogenic Belt in Japan and Chile. *Japan Society for the Promotion of Science, Japan Society for the Advancement of Science*. Tokyo. 1-51 pp.
- HERVÉ, F., KAWASHITA, K., MUNIZAGA, F. & BASSEI, M. (1984). Rb-Sr isotopic ages from late Paleozoic metamorphic rocks of Central Chile. *Journal of the Geological Society London*. Vol. 141. 877-884 pp.
- HERVÉ, F., MUNIZAGA, F., MANTOVANI, M. & HERVÉ, M. (1976). Edades R/Sr Neopaleozoico del basamento cristalino de la Cordillera de Nahuelbuta. *I Congreso Geológico Chileno*. Vol. 1. 19-26 pp.
- KATHRI, N., TYAGI, S., & RAWTANI, D. (2017). Recent strategies for the removal of iron from water: A review. *Journal of Water Process Engineering*. Vol. 19. 291-304 pp.
- KWAKYE-AWUAH, B.; SEFA-NTIRI, B.; VON-KITI, E.; NKRUMAH, I. & WILLIAMS, C. (2019). Adsorptive Removal of Iron and Manganese from Groundwater Samples in Ghana by Zeolite Y Synthesized from Bauxite and Kaolin. *Water*, Vol. 11 (9).
- MARÍN, L. (2011). Remoción de hierro y manganeso por oxidación con cloro y filtración en grave (Trabajo de grado presentado para acceder al título de Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental). Universidad del Valle. Colombia.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2023). Nuestra oportunidad de por vida para permitir el agua, el saneamiento y la higiene para todos.
- PALAPE, C. (2014). Deformación del Basamento Metamórfico Paleozoico en la transecta Tanumé-Pichilemu, entre los 34,2° y 34,5°, Cordillera de la Costa de Chile Central (Memoria para optar al título de geólogo). Universidad de Chile. Chile.
- RODRÍGUEZ, C., PÉREZ, Y., MORENO, H., CLAYTON, J., ANTINAO, J., DUHART, P. & MARTIN, M. (1999). Área de Panguipulli-Riñihue, Región de Los Lagos, Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Mapas Geológicos 10, 1:100.000.
- ROY, C. & ANDREWS, N. (2001). Recent advances in disorders of iron metabolism: mutations, mechanisms and modifiers. *Human Molecular Genetics*. Vol. 10 (20). 2181-2186 pp.
- SOBSEY, M. (2002). Managing water in the home: accelerated health gains from improved water supply. Geneva. 69 p.

VALDOVINOS & PARRA. (2006). La cuenca del Río Biobío: Historia Natural de un Ecosistema de Uso Múltiple. *Publicaciones Centro EULA*.

VIGNESWARAN, S. & VISVANATHAN, C. (1995). *Water Treatment Processes: Simple Options*. CRC Press.

WANG, Y., PLEASANT, S., JAIN, P., POWELL, J. & TOWNSEND, T. (2016). Calcium carbonated-based permeable reactive barriers for iron and manganese groundwater remediation at landfills. *Waste Management*. Vol. 53. 128-135 pp.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (2012). Global costs and benefits of drinking-water supply and sanitation interventions to reach the MDG target and universal coverage.

## ANEXOS

**Anexo 1.** Tabla de tiempo [min] v/s nivel dinámico [m] en la prueba de bombeo a caudal constante de 2,8 [L/s], previo al método de sellado.

Tiempo (min)	Nivel dinámico (m)		Tiempo (min)	Nivel dinámico (m)
1	14,7		140	15,02
2	14,73		150	15,02
3	14,74		160	15,03
4	14,76		170	15,03
5	14,76		180	15,03
6	14,77		200	15,03
7	14,77		220	15,03
8	14,775		240	15,04
9	14,78		270	15,04
10	14,78		300	15,04
12	14,79		360	15,04
14	14,79		420	15,05
16	14,79		490	15,05
18	14,8		540	15,05
20	14,81		600	15,05
25	14,83		660	15,06
30	14,84		720	15,06
35	14,85		780	15,06
40	14,86		840	15,06
45	14,87		900	15,06
50	14,93		960	15,06
55	14,94		1020	15,06
60	14,94		1080	15,06
70	14,96		1140	15,06
80	14,98		1200	15,06
90	14,99		1260	15,06
100	15		1320	15,06
110	15,01		1380	15,06
120	15,01		1440	15,06
130	15,02			

**Anexo 2.** Tabla de tiempo [min] v/s nivel dinámico [m] en la prueba de recuperación, previo al método de sellado.

Tiempo (min)	Nivel dinámico (m)		Tiempo (min)	Nivel dinámico (m)
1	14,23		16	14,155
2	14,22		18	14,145
3	14,21		20	14,135
4	14,21		25	14,13
5	14,205		30	14,13
6	14,205		35	14,13
7	14,2		40	14,13
8	14,195		45	14,13
9	14,19		50	14,13
10	14,185		55	14,13
12	14,175		60	14,13
14	14,165			

**Anexo 3.** Tabla de tiempo [min] v/s nivel dinámico [m] en prueba de bombeo posterior al sellado.

Tiempo (min)	Nivel dinámico (m)		Tiempo (min)	Nivel dinámico (m)
1	15		140	15,065
2	15,01		150	15,065
3	15,015		160	15,065
4	15,02		170	15,065
5	15,025		180	15,065
6	15,028		200	15,065
7	15,031		220	15,065
8	15,033		240	15,065
9	15,035		270	15,065
10	15,036		300	15,065
12	15,037		360	15,065
14	15,038		420	15,065
16	15,04		490	15,065
18	15,043		540	15,065
20	15,045		600	15,065
25	15,05		660	15,065
30	15,052		720	15,065
35	15,053		780	15,065
40	15,055		840	15,065
45	15,06		900	15,065
50	15,062		960	15,065
55	15,063		1020	15,065
60	15,064		1080	15,065
70	15,065		1140	15,065
80	15,065		1200	15,065
90	15,065		1260	15,065
100	15,065		1320	15,065
110	15,065		1380	15,065
120	15,065		1440	15,065
130	15,065			

**Anexo 4.** Tabla de tiempo [min] v/s nivel dinámico [m] en prueba de recuperación posterior al sellado.

Tiempo (min)	Corrección nivel dinámico (m)
0,5	14,45
1	14,44
2	14,425
3	14,41
4	14,41
5	14,41
6	14,405
7	14,4
8	14,395
11,5	14,395
12	14,395