Anexo 2 - Actualización del PAS 158

EIA “Continuidad del Proceso de Lixiviación y Adecuaciones al Proyecto Minero División Radomiro Tomic”

Codelco Chile

Elaborado por:

SLR Consulting Chile

Edificio Titanium La Portada, piso 27, Isidora Goyenechea 2800, 7550647 Las Condes, Región Metropolitana, Chile

16-11-2026

Revisión: 0

Registro de revisión

Tabla de contenidos

Tabla de contenidos ..... **ii**

Acrónimos y abreviaturas ..... **vii**

1.0 PERMISO ARTÍCULO 158 ..... **1**

1.1 Introducción 1

1.2 Autoridad competente 1

1.3 Pertinencia 1

1.4 Requisitos para su otorgamiento 2

2.0 Antecedentes para el otorgamiento del permiso **3**

2.1 Descripción del tipo y disposición de las obras de recarga artificial 3

2.1.1 Descripción del lugar de emplazamiento de la obra 3

2.1.2 Detalle del tipo de obra de recarga, características constructivas básicas, principales dimensiones, procedimientos de operación y mantención. 10

2.1.3 Descripción de las fases de la obra (construcción, operación y cierre, si corresponde) 12

2.1.4 Estimación de los plazos y periodos de construcción de la obra 15

2.1.5 Planos a escala del proyecto; se deberá considerar al menos los siguientes planos: 18

2.1.6 Distanciamiento desde el área de infiltración a cualquier fuente destinada a la producción de agua para consumo humano (formal o informal). 23

2.2 Caracterización de la calidad física y química de las aguas que se infiltrarán con la obra 26

2.2.1 Descripción del origen de las aguas destinadas a la recarga 26

2.2.2 Caracterización de las propiedades físicas, químicas y biológicas de las aguas destinadas para la recarga. Según sea el origen de las aguas, describir la variabilidad de sus propiedades. Al respecto, en el título 7 se presentan algunos criterios orientativos. 26

2.2.3 Si corresponde, incluir una descripción de los procesos de pre-tratamiento del agua a recargar 29

2.2.4 Si corresponde, detallar la normativa ambiental que cumplirán las aguas que se infiltrarán. 29

2.3 Caracterización de la calidad de las aguas del sector influenciado directamente por la recarga artificial 31

2.3.1 Propiedades químicas de las aguas del acuífero sin proyecto. Se requiere presentar una caracterización física, química y biológica de las aguas subterráneas en el área de influencia 31

2.3.2 En cuanto a la extensión espacial de la caracterización de las aguas del acuífero, se requiere mediciones aguas arriba y aguas abajo de la ubicación proyectada para la obra de recarga artificial, ello visto en el sentido de la dirección de flujo del acuífero. 38

2.3.3 Describir el comportamiento esperado de las propiedades químicas, físicas y biológicas de las aguas del acuífero producto de la ejecución proyectada de la recarga artificial en las distintas etapas del proyecto. 41

2.4 Descripción y características geológicas e hidrogeológicas del sector de recarga 49

2.4.1 Geología: 49

2.4.2 Hidrogeología: 57

2.5 Plan de monitoreo 70

2.5.1 El plan de monitoreo deberá ser coherente con la duración de las etapas del proyecto, con la obra de recarga artificial, con las características del acuífero a recargar y con el sector influenciado por la recarga. 70

2.5.2 El plan de monitoreo debe permitir verificar la efectividad de la recarga artificial del acuífero y la no afectación al medio ambiente, ello en términos de la no contaminación del acuífero. En este sentido, el plan de monitoreo deberá incluir el seguimiento de la calidad del agua a recargar y de la calidad del agua en el acuífero en el sector influenciado por la recarga. 70

2.5.3 El plan de monitoreo debe indicar los parámetros a medir, frecuencia, lugares de medición, indicadores de cumplimiento o umbrales de comparación, metodologías para efectuar las mediciones y la toma de muestras de agua, los protocolos de análisis de los datos, y la frecuencia y contenidos de los informes de monitoreo. En el título 7 se presentan algunos criterios orientativos al respecto. 74

2.6 Plan de acción....78

2.6.1 Se requiere un plan de acción por riesgos ambientales relacionados a las distintas etapas del proyecto de recarga artificial considerando, por ejemplo, una eventual contaminación de las aguas subterráneas en el sector influenciado por la recarga artificial, lo cual puede traducirse en efectos sobre el medio ambiente o la población. 78

2.6.2 El plan de acción debe señalar claramente, para cada riesgo identificado en las distintas etapas del proyecto, la(s) medida(s) a adoptar con el respectivo efecto esperado, los plazos de ejecución de las medidas y los indicadores de efectividad de éstas. Las medidas deberán ser consistentes con las características de las obras, con el acuífero a recargar y las zonas ambientales sensibles o la población eventualmente afectada dentro del sector influenciado por la recarga. Asimismo, el plan de acción deberá indicar la oportunidad y vías de comunicación a la Superintendencia del Medio Ambiente para la activación de dicho plan. 80

2.6.3 Durante la posterior tramitación sectorial, antes del inicio de la fase de construcción, se deberá presentar el plan de acción que incorpore las observaciones o condiciones indicadas por los OAECA. 80

Tablas en texto

Tabla 1. Coordenadas de obras de recarga artificial, y pozos de bombeo de BH..... 3
Tabla 2. Descripción de las partes de un pozo de inyección 11
Tabla 3. Cronograma estimado de construcción y habilitación de la Barrera Hidráulica.....17
Tabla 4. Distanciamiento de las áreas de infiltración a fuentes de agua potable 25
Tabla 5. Características fisicoquímicas del agua para la recarga artificial. 27
Tabla 6. Pozos de monitoreo utilizados para la caracterización de la calidad de aguas subterráneas en los sectores de recarga, aguas arriba, y aguas abajo de la recarga artificial 36
Tabla 7. Caracterización de la calidad de aguas subterráneas en los sectores de recarga, aguas arriba, y aguas abajo de la recarga artificial.....37
Tabla 8. Detalle pozos de monitoreo PVA.....40
Tabla 9. Escenarios predictivos 41
Tabla 10. Discretización temporal de los escenarios predictivos.....42
Tabla 11. Tiempo de respuesta de pozos ante barrera hidráulica 45
Tabla 12. Pozos de la barrera hidráulica de DRT en Pampa Cere 60
Tabla 13. Transmisividad y Coeficiente de Almacenamiento para la PGC del pozo BRT-01.....61
Tabla 14. Transmisividad y Coeficiente de Almacenamiento para la PGC del pozo BRT-02.....62
Tabla 15. Transmisividad y Coeficiente de Almacenamiento para la PGC del pozo BRT-03.....62
Tabla 16. Transmisividad y Coeficiente de Almacenamiento para la PGC del pozo BRT-04.....63
Tabla 17. Resumen de valores de ensayos de infiltración.....63
Tabla 18. Parámetros hidráulicos representativos de cada unidad hidrogeológica.....64
Tabla 19. Pozos de Monitoreo del PAT 71
Tabla 20. Umbrales definidos para cada pozo PAT y sus respectivas acciones asociadas.....72
Tabla 21. Plan de Monitoreo 75
Tabla 22. Plan de acción asociado a la BH en las distintas etapas del Proyecto.....79

Figuras en el texto

Figura 1. Ubicación de la BH..... 4
Figura 2. Concentración de sulfatos en capa 3 al fin del periodo de calibración (septiembre 2025) 6
Figura 3. Ubicación pozos BH entre sector industrial y Pampa Cere..... 7
Figura 4. Resultados simulación sin barrera hidráulica (izquierda) versus resultados con barrera hidráulica (derecha). 8
Figura 5. Esquema recarga de acuíferos mediante pozo de inyección.....10

Figura 6. Procedimiento de Operación de la BH contenido en el Diagrama de flujo de funcionamiento del PAT....14
Figura 7. Mapa de ubicación general del proyecto....19
Figura 8. Vista en planta del proyecto y piezometría acuífero principal....20
Figura 9. Vista en planta de la BH, infraestructura de extracción e inyección y puntos de control de calidad de las aguas....21
Figura 10. Curvas piezométricas y dirección del flujo subterráneo en el escenario de operación de la BH....22
Figura 11. Distanciamiento de las áreas de infiltración a fuentes de agua potable....24
Figura 12. Delimitación del AI de la calidad y cantidad de aguas subterráneas para la recarga artificial....32
Figura 13. Ubicación de los pozos para la calidad basal del acuífero....33
Figura 14. Pozos de Monitoreo del PVA....39
Figura 15. Ubicación de los pozos de observación del Modelo Numérico....43
Figura 16. Descensos simulados en pozos por escenarios, Sim 5 respecto a simulación Caso Base (Sim 1)....44
Figura 17. Concentración SO4 simulada en pozos para los escenarios predictivos (1 de 2)....46
Figura 18. Concentración SO4 simulada en pozos para los escenarios predictivos (2 de 2)....47
Figura 19. Pluma de concentración de SO4 Sim 2 en año 2030, 2058 y 2158 (arriba) vs Sim 5 (abajo) en año 2042, 2092 y 2142....48
Figura 20. Contexto morfoestructural de la cuenca de Calama....50
Figura 21. Mapa geológico-estructural del área de estudio....52
Figura 22. Perfil geológico A-A'....53
Figura 23. Comparación entre estratigrafía del pozo PCH-16B y perfil D-T-L4 (Geodatos, 2018)....54
Figura 24. Columna estratigráfica PCH-14 (izquierda) y PCH-16B (derecha)....55
Figura 25. Columna estratigráfica PCH-17B (izquierda) y PCH-22 (derecha)....56
Figura 26. Mapa hidrogeológico del área de estudio....58
Figura 27. Perfil Hidrogeológico 1 (cortado desde sector RT hasta Salar Cere)....59
Figura 28. Ubicación de los pozos con ensayos de bombeo e inyección, y pozos de observación....61
Figura 29. Ubicación de pozos para análisis de niveles....66
Figura 30. Niveles piezométricos de los pozos del sector Pampa Cere....67
Figura 31. Piezometría Acuífero Principal (ACI) para el año 2025....69
Figura 32. Pozos PAT y BH....73

Apéndices

Apéndice A Plan de Vigilancia Ambiental (PVA)
Anexo PVA - Caracterización Hidroquímica de la Pluma y Potenciales Fuentes

Apéndice B Interpretación de Ensayos Hidráulicos

Apéndice C Archivo KMZ

Apéndice D Plan de Alerta Temprana (PAT)

Apéndice E Plantilla Base de Datos

Acrónimos y abreviaturas

ACS	Acuífero Superior
ACI	Acuífero Inferior o Acuífero Principal
AI	Área de Influencia
BH	Barrera Hidráulica
CE	Conductividad Eléctrica
C.N.	Contenido Natural del Acuífero
DAA	Derecho de Aprovechamiento de Aguas
DGA	Dirección General de Aguas
DRT	División Radomiro Tomic
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
ETFA	Entidad Técnica de Fiscalización Ambiental
HCT	Hidrocarburos Totales
NCh	Norma Chilena
OAECA	Órgano de la Administración del Estado con Competencia Ambiental
PAT	Plan de Alerta Temprana
PAS	Permiso Ambiental Sectorial
PGC	Prueba de Gasto Constante
PVA	Plan de Vigilancia Ambiental
RCA	Resolución de Calificación Ambiental
RSEIA	Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
SDT	Sólidos Disueltos Totales
SHAC	Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común
SMA	Superintendencia del Medio Ambiente
SO_4	Sulfato
UH	Unidad Hidrogeológica
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS84	World Geodetic System 1984

1.0 PERMISO ARTÍCULO 158

1.1 Introducción

El Permiso Ambiental Sectorial (PAS) N°158 corresponde al permiso para ejecutar obras de recarga artificial de acuíferos, conforme a lo establecido en el artículo 66 del D.F.L. N° 1.122, de 1981, del Ministerio de Justicia, que fija el Código de Aguas.

El requisito para su otorgamiento consiste en asegurar la conservación y protección del acuífero, de manera que las obras proyectadas no generen contaminación ni procesos de colmatación de las aguas subterráneas.

1.2 Autoridad competente

El otorgamiento del PAS N°158 es de competencia de la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP), organismo que actúa como Órgano de la Administración del Estado con Competencia Ambiental (OAECA) y como autoridad sectorial responsable de la regulación, protección y administración de los recursos hídricos.

1.3 Pertinencia

El Proyecto “Continuidad del Proceso de Lixiviación y Adecuaciones al Proyecto Minero División Radomiro Tomic” (en adelante, el “Proyecto”), cuyo titular es la División Radomiro Tomic de Codelco (DRT) (en adelante, el “Titular”), contempla como obra del Proyecto (que actuará de manera preventiva) la implementación de una Barrera Hidráulica Positiva (BH) destinada a la recarga artificial del acuífero en la DRT, mediante la inyección de agua de igual o mejor calidad. La ejecución de estas obras se somete a evaluación en el marco del PAS N°158, de competencia de la DGA.

En el marco del Proyecto se desarrolló un modelo hidrogeológico conceptual y numérico que permitió actualizar el conocimiento respecto del funcionamiento hidrodinámico en los sectores aguas arriba y aguas debajo de la DRT, con especial énfasis en la caracterización, evolución y comportamiento de una pluma de sulfatos existente.

El dominio del estudio hidrogeológico abarca aproximadamente 579 km² e incluye las instalaciones RT, Pampa Cere, el Salar de Cere y Pampa Carbonatera, incorporando además el rajo Chuquicamata dentro del dominio de modelación, permitiendo evaluar potenciales interacciones hidráulicas entre ambas operaciones.

Si bien en el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) se descartaron impactos significativos sobre el recurso hídrico y los ecosistemas dependientes, el Proyecto incorpora, de manera preventiva, el diseño y construcción de una barrera hidráulica destinada a controlar la eventual extensión de las infiltraciones históricas provenientes de las primeras etapas de depositación de ripios de la División hacia el sector del humedal del Salar de Cere, ubicado aproximadamente a 10 km aguas abajo del Sector Industrial RT.

Para la operación de la barrera hidráulica se establecieron umbrales intermedios y límites de concentración de sulfatos en pozos estratégicos (pozos PAT), junto con las correspondientes acciones de respuesta ante la superación de dichos valores. En particular, ante la superación de los umbrales límite definidos, se contempla la activación de la Barrera Hidráulica,

conformada por dos pozos de inyección de 15 l/s cada uno y dos pozos de extracción de agua de 15 l/s cada uno.

En este contexto, la ejecución de obras de recarga artificial mediante pozos de inyección, requeridas para la implementación de la Barrera Hidráulica, constituye el fundamento de la solicitud del presente Permiso Ambiental Sectorial, de conformidad con lo establecido en el artículo 158 del D.S. N°40/2012 del Ministerio del Medio Ambiente, Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (RSEIA).

1.4 Requisitos para su otorgamiento

Los contenidos técnicos y formales requeridos para acreditar el cumplimiento del objetivo del PAS N°158 se encuentran establecidos en la Minuta DCPRH N°12, de 17 de abril de 2024, complementada por la Circular N°02, de 31 de julio de 2025, ambas de la DGA.

Los contenidos ambientales son los siguientes:

i. Descripción del tipo y disposición de las obras de recarga artificial.
ii. Caracterización de la calidad física y química de las aguas que se infiltrarán con la obra.
iii. Caracterización de la calidad de las aguas del sector influenciado directamente por la recarga artificial.
iv. Descripción y características geológicas e hidrogeológicas del sector de recarga.
v. Plan de monitoreo.
vi. Plan de acción.

2.0 Antecedentes para el otorgamiento del permiso

2.1 Descripción del tipo y disposición de las obras de recarga artificial

2.1.1 Descripción del lugar de emplazamiento de la obra

El Proyecto contempla la implementación de una Barrera Hidráulica (BH) en el límite entre el Sector Industrial RT y el Sector Pampa Cere de la División Radomiro Tomic (DRT). La BH de referencia está conformada por cuatro (4) pozos: dos (2) pozos de bombeo o extracción de agua (BRT-1 y BRT-2) y dos (2) pozos de inyección de agua (BRT-3 y BRT-4).

Las obras de recarga artificial objeto del presente PAS N°158 corresponden, de forma referencial, a los dos pozos de inyección que forman parte de dicha barrera: denominados BRT-3 y BRT-4. Las coordenadas de estos pozos, referidas al datum WGS 1984 HUSO 19 Sur, son las indicadas en la Tabla 1 y su ubicación se muestra en la Figura 1.

Los pozos de bombeo, que también son parte de esta barrera hidráulica corresponden a los pozos BRT-1 y BRT-2, cuyo detalle también se presenta en la Tabla 1 y su ubicación en Figura 1. Los pozos de bombeo tienen por objetivo recuperar aguas subterráneas con una proporción elevada de aguas de proceso, provenientes de las infiltraciones históricas desde los botaderos de ripios, evitando y conteniendo el avance de la pluma. La extracción de agua se gestionará conforme a la Circular DGA N°3 de 2018, en lo que resulte aplicable. En ese sentido, la fracción de aguas naturales interceptada con el bombeo se respaldará con los derechos de aprovechamiento que correspondan (DGA, 2018).

Tabla 1. Coordenadas de obras de recarga artificial, y pozos de bombeo de BH.

Pozo	Tipo	Coord. UTM WGS84 H19S		Profundidad (m)	Profundidad tramos ranurados (m)	Unidad Hidrogeológica
		Este (m)	Norte (m)			
BRT-3	Inyección (Recarga artificial)	519.312	7.546.176	200	134-182; 188-200	UH-5
BRT-4	Inyección (Recarga artificial)	519.353	7.546.503	200	146-182; 188-200	
BRT-1	Bombeo	517.994	7.546.672	230	176-218; 224-230	
BRT-2	Bombeo	518.152	7.546.714	237	177-237	

Fuente: Elaboración propia.

Buscando una mayor eficiencia en el manejo de aguas de proceso, se propone que la ubicación definitiva de los puntos de bombeo e inyección, como alternativa a los puntos actuales, sea dentro del polígono que se presenta en la Figura 1, siguiendo un diseño guiado por criterios hidrogeológico y en conformidad con las autorizaciones aplicables. Las coordenadas del polígono de referencia se presentan también en la Figura 1.

La delimitación del polígono consideró los siguientes criterios:

i. Se relaciona con el mapeo en superficie de los depósitos sedimentarios de mayor permeabilidad de la UH-5, por los que se mueve la pluma de aguas de proceso.

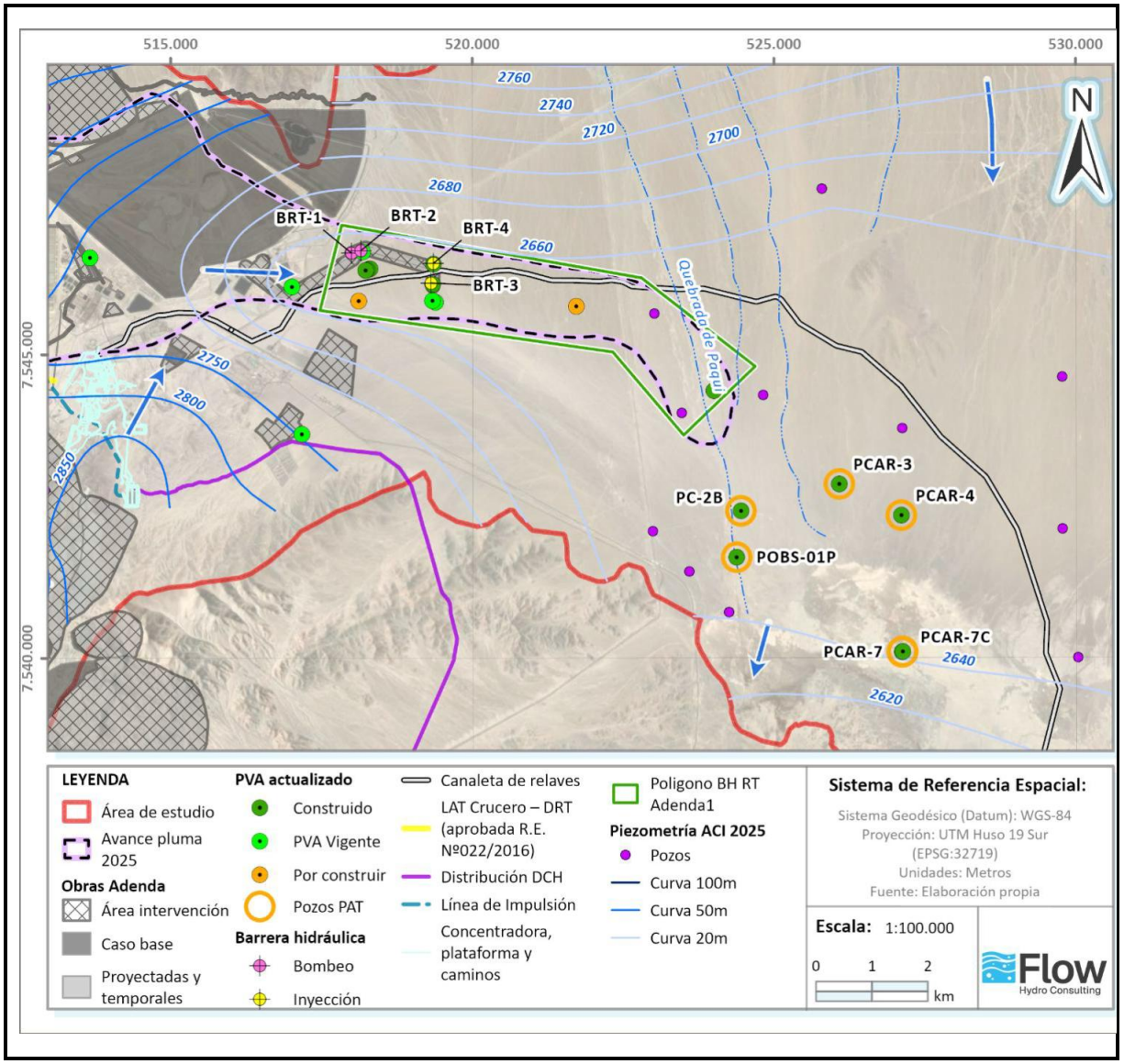
ii. Abarca la mayor parte del área en que se ha identificado la propagación de las infiltraciones, según ha sido interpretado a diciembre de 2025.

iii. Incorpora los puntos construidos de la barrera actual (BRT-1 a BRT-4).

iv. Su extensión aguas abajo permite evaluar posiciones alternativas de control, eventualmente más eficientes que la aquí propuesta.

v. Su límite este se mantiene aguas arriba de los pozos del PAT, para favorecer la recuperación de aguas con mayor componente de proceso y reducir la captación de aguas de mejor calidad situadas por delante del frente de pluma.

Figura 1. Ubicación de la BH



Vértice	UTM Este (m)	UTM Norte (m)
1	517.833	7.547.132
2	522.800	7.546.257
3	524.681	7.544.799
4	523.495	7.543.667
5	522.324	7.545.037
6	517.470	7.545.728
7	517.833	7.547.132

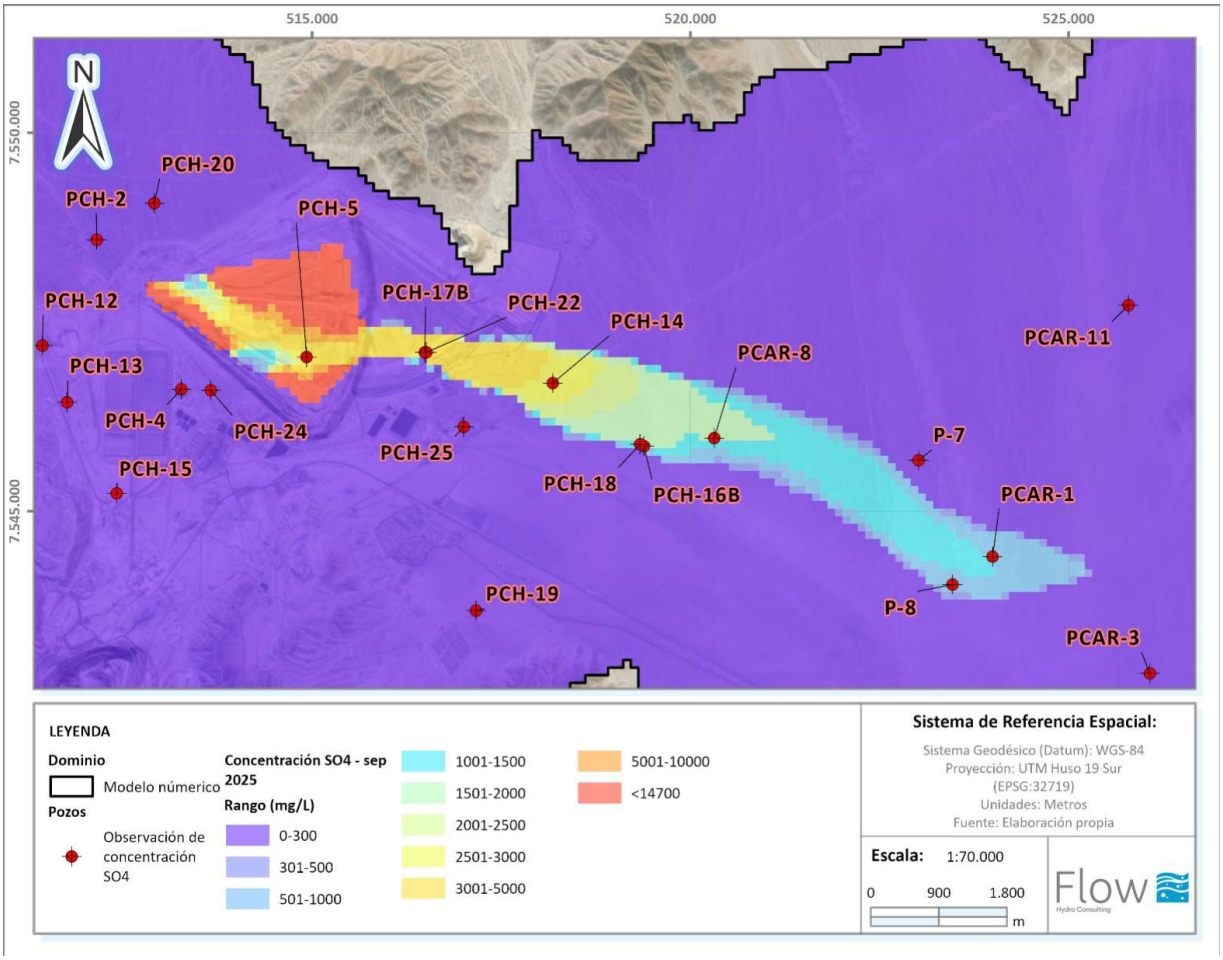
Fuente: Anexo D PAT actualizado.

Si bien en el EIA se descartaron impactos significativos sobre el recurso hídrico y los ecosistemas dependientes, considerando la existencia de dichas infiltraciones, el Proyecto contempla preventivamente la implementación de la BH, cuyo objetivo es controlar su potencial avance hacia el sector del humedal continental lacustre del Salar de Cere (HU-OT-132), ubicado aproximadamente a 10 km aguas abajo de la DRT.

La ubicación propuesta para la BH fue definida sobre la base de los resultados del modelo numérico hidrogeológico de flujo y transporte de sulfatos, actualizado y adjunto en esta Adenda mediante el Anexo 25, considerando la distribución espacial actual y proyectada de la pluma en el acuífero principal (UH-5), así como la dirección predominante del flujo subterráneo. Los resultados de calibración indican que la pluma de sulfatos se desarrolla principalmente desde el sector del botadero de ripios hacia el sureste, siguiendo el gradiente hidráulico (hacia Pampa Cere). Al término de la calibración (septiembre de 2025; ver Figura 2) la pluma se encuentra contenida dentro de un radio aproximado de 10 km aguas abajo del botadero y presenta su frente de avance en las proximidades del pozo PCAR-1. Así, la BH fue emplazada en un sector intermedio entre la fuente de infiltración y el frente de avance de la pluma, específicamente entre los pozos PCH-14 y PCH-18, donde el modelo identifica el principal corredor de transporte de masa de sulfatos. Esta ubicación permite interceptar el flujo antes de su propagación hacia los sectores más distales de Pampa Cere y hacia el Salar de Cere.

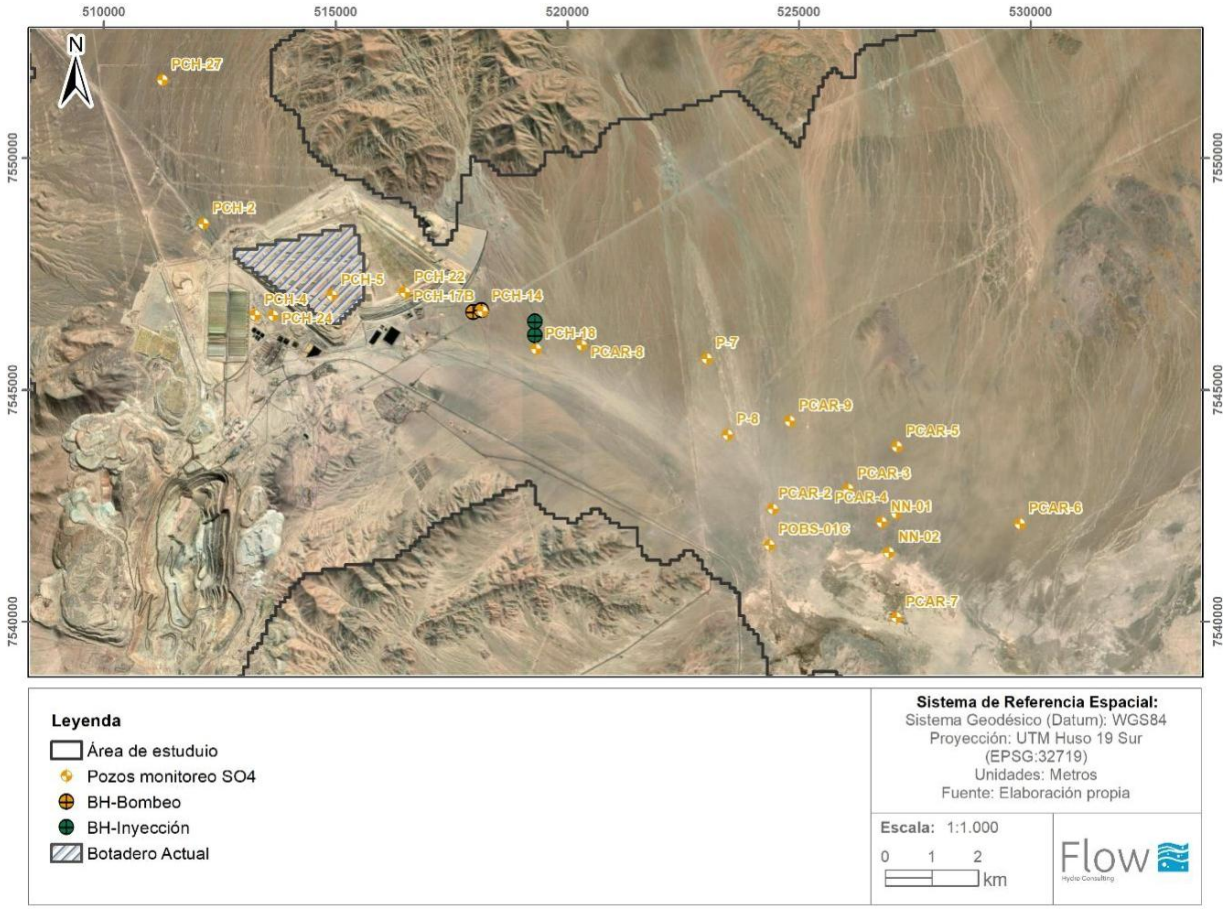
Las simulaciones predictivas muestran que el transporte de sulfatos se concentra en una franja preferencial orientada noroeste-sureste, coincidente con la dirección natural del flujo subterráneo (Figura 5). La Figura 3 permite visualizar la localización de los pozos de bombeo BRT1 y BRT2, los cuales se sitúan directamente sobre el eje central de esta trayectoria de transporte, mientras que los pozos de inyección BRT3 y BRT4 se ubican aguas abajo, generando una zona hidráulica de captura y dilución que permita limitar el avance de las concentraciones elevadas de sulfato. Así, La evaluación numérica de la configuración de referencia de la barrera hidráulica (pozos BRT-1 a BRT-4) consideró un escenario de operación durante 16 años, al término del cual se alcanzan concentraciones de sulfato del orden de 500 mg/L en el pozo PCAR-1, definido como criterio de desempeño de la medida.

Figura 2. Concentración de sulfatos en capa 3 al fin del periodo de calibración (septiembre 2025)



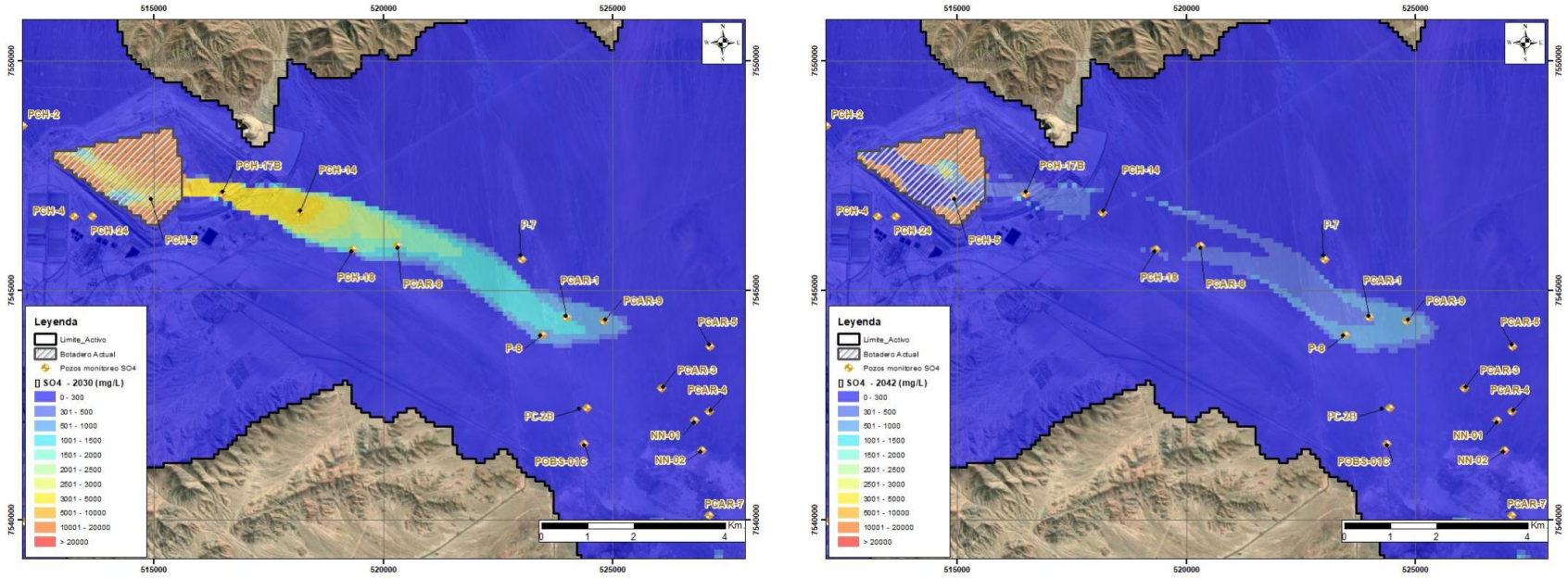
Fuente: "Actualización Modelo Numérico Hidrogeológico División Radomiro Tomic 2026" (Flow, 2026). Código documento: FLOW-COD006-REP-HDG-007R2, adjunto como Anexo 25 de la Adenda.

Figura 3. Ubicación pozos BH entre sector industrial y Pampa Cere



Fuente: "Actualización Modelo Numérico Hidrogeológico División Radomiro Tomic 2026" (Flow, 2026). Código documento: FLOW-COD006-REP-HDG-007R2, adjunto como Anexo 25 de la Adenda.

Figura 4. Resultados simulación sin barrera hidráulica (izquierda) versus resultados con barrera hidráulica (derecha).



Caso Base (Sim 1) – Año 2030 **Caso con Barrera Hidraulica (Sim 5) – Año 2042**

Fuente: "Actualización Modelo Numérico Hidrogeológico División Radomiro Tomic 2026" (Flow, 2026). Código: FLOW-COD006-REP-HDG-007R2, adjunto como Anexo 25 de la Adenda.

Cabe señalar que debido a que el Modelo Conceptual Hidrogeológico (Anexo 13 de la Adenda) identifica la pluma de sulfato en el acuífero inferior UH-5, es que el modelo numérico actualizado evalúa las simulaciones de flujo y transporte en este misma UH, y la barrera hidráulica se sitúa en profundidad conforme a esto.

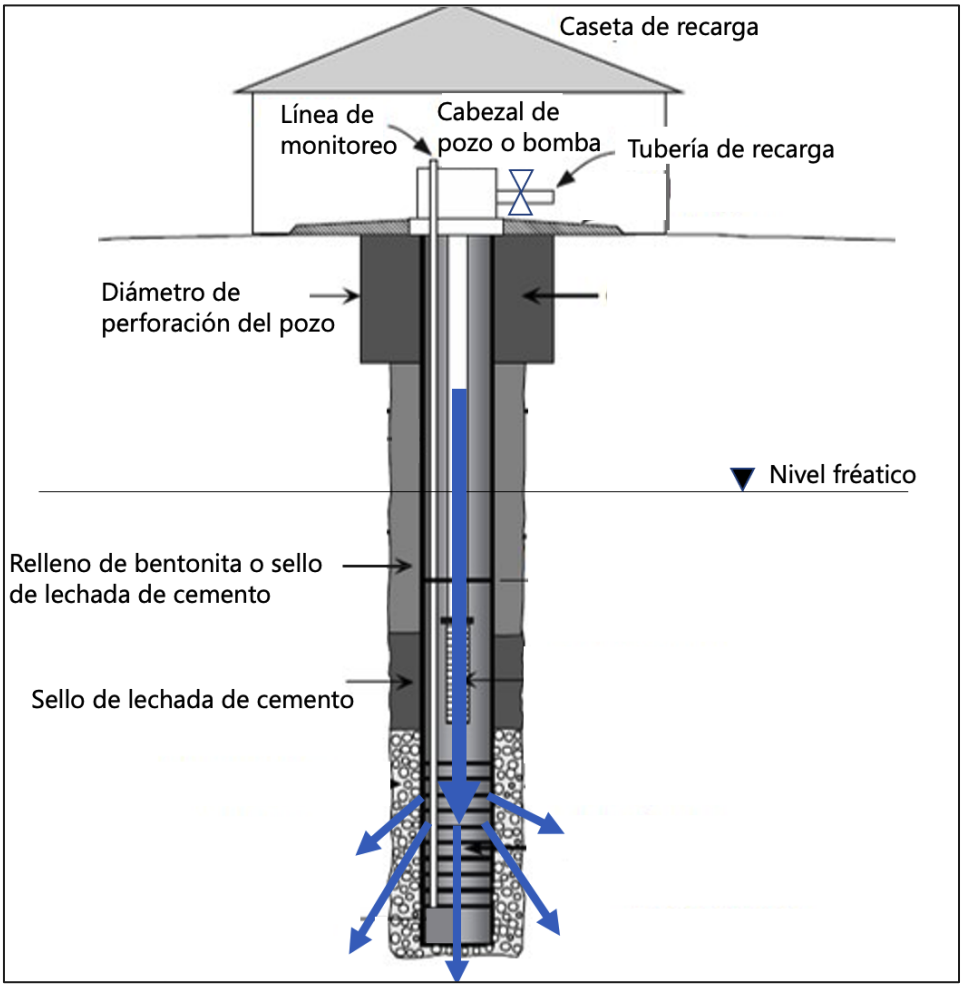
La BH será activada en caso de superarse los umbrales límite por 3 meses consecutivos, establecidos en el Plan de Alerta Temprana (PAT) para las concentraciones de sulfatos registradas durante el monitoreo. El referido PAT se adjunta en el Apéndice D del presente documento.

2.1.2 Detalle del tipo de obra de recarga, características constructivas básicas, principales dimensiones, procedimientos de operación y mantención.

El tipo de obra para la recarga artificial corresponde, referencialmente, a dos (2) pozos de inyección, identificados como BRT-3 y BRT-4, los cuales forman parte de la BH ubicada en el límite entre el sector Industrial RT y el sector Pampa Cere. Estos pozos se encuentran actualmente construidos y habilitados, y serán instrumentados para su operación como obras de recarga artificial.

Los pozos de inyección consideran una configuración constructiva tipo compuesta por: cabezal, tubería de inyección, revestimiento, cribas o tramos ranurados, filtro de grava, sello superior, válvula de control, instrumentación y equipamiento de bombeo/inyección. El esquema conceptual de una obra de recarga mediante pozo de inyección se presenta en la Figura 5.

Figura 5. Esquema recarga de acuíferos mediante pozo de inyección



Fuente: Elaboración propia.

A partir del esquema anterior, en la Tabla 2 se describen los principales componentes considerados para los pozos de inyección de la BH. Las partes esenciales que constituyen un pozo de inyección se describen como el cabezal del pozo, la tubería de inyección, el revestimiento del pozo, el filtro de grava, el sello superior, la válvula de control y el equipamiento de bombeo.

Tabla 2. Descripción de las partes de un pozo de inyección

Parte del Pozo	Descripción
Cabezal del pozo	Estructura superior del pozo que se encuentra sobre la superficie del suelo. Se utiliza para sujetar las tuberías de inyección, el equipo de bombeo y los instrumentos de medición.
Tubería de inyección	Es la tubería que se utiliza para inyectar el agua en el acuífero. Esta tubería debe estar diseñada para soportar la presión del agua y permitir la distribución uniforme del agua en el acuífero.
Revestimiento del pozo	Es la tubería que se coloca dentro del pozo para proteger las paredes de este y evitar que se derrumben. El revestimiento también ayuda a mantener la integridad estructural del pozo. El material de revestimiento de los pozos será PVC de alta resistencia.
Cribas	Son las aberturas o ranuras presentes en la tubería, que permiten el paso del agua desde el acuífero hacia el pozo.
Filtro	Material poroso que se coloca alrededor de la tubería, para evitar que el suelo y otros materiales entren en el pozo.
Grava	Se coloca alrededor del filtro para crear una zona de transición entre el acuífero y el pozo. La grava ayuda a estabilizar la tubería de inyección y a proporcionar una superficie para la filtración del agua.
Sello superior	Es una capa de arcilla o bentonita que se coloca sobre la grava para evitar que el agua superficial y los contaminantes entren en el pozo.
Válvula de control	Se utiliza para regular el flujo de agua hacia el acuífero. La válvula de control se encuentra en la superficie y se utiliza para ajustar el flujo de agua según las necesidades de recarga del acuífero.
Equipamiento de bombeo/ inyección	Es el conjunto de equipos y bombas que se utilizan para inyectar el agua en el acuífero. El equipo de bombeo se encuentra en la superficie y se conecta a la tubería de inyección para bombear el agua al pozo de inyección.

Fuente: Elaboración propia.

Las principales dimensiones de los pozos de inyección existentes se presentaron en la Tabla 1, los cuales alcanzan una profundidad de 200 metros, diámetro de habilitación de 12'' y tramos ranurados que varían entre 134 y 200 metros de profundidad. En cuanto a los caudales, se considera que cada pozo pueda inyectar un flujo promedio aproximado de 15 L/s equivalente aproximadamente a 1.296 m³/día y 473.040 m³/año por pozo. La inyección se realizará hacia el acuífero inferior o acuífero principal, denominado UH-5. En el caso de la construcción de pozos nuevos para la barrera hidráulica, estos tendrán similares características a los pozos ya existentes (BRT-1 al BRT-4) y se construirán con una profundidad tal que lleguen hasta el basamento.

La operación de los pozos de inyección se realizará de manera controlada, conforme al procedimiento de activación definido en el PAT. La BH se activará en caso de verificarse la superación de los umbrales límite establecidos para sulfatos en los pozos de observación definidos. Durante su operación, los caudales de inyección serán regulados mediante válvulas de control e instrumentación asociada, considerando un caudal de hasta 15 L/s por pozo. La mantención considerará la revisión periódica de cabezales, válvulas, instrumentación, equipos de bombeo/inyección y condiciones operacionales necesarias para asegurar el funcionamiento adecuado del sistema.

2.1.3 Descripción de las fases de la obra (construcción, operación y cierre, si corresponde)

A continuación, se describen las fases de construcción, operación y cierre de la BH:

2.1.3.1 Fase de Construcción

La fase de construcción considera; el acondicionamiento e instrumentación de pozos existentes (BRT-1, BRT-2, BRT-3 y BRT-4), o construcción de pozos nuevos según polígono de Figura 1; la habilitación de una infraestructura compuesta por dos pozos de extracción y dos pozos de inyección de agua, además de las obras complementarias necesarias para su funcionamiento. Entre las actividades principales se contemplan:

- Acondicionamiento e instrumentación de los pozos existentes o nuevos.
- Instalación de tuberías de transporte de agua (extracción e inyección), línea eléctrica de 23 kV, subestación eléctrica, caminos de acceso y operación.

Estas actividades se ejecutarán al interior de instalaciones industriales existentes de División Radomiro Tomic.

2.1.3.2 Fase de Operación

La BH tendrá una función preventiva para evitar el avance de la pluma de infiltración histórica asociada a antiguas etapas de depositación de ripios.

Su operación se basa en la extracción controlada de agua subterránea mediante dos pozos de bombeo y la inyección de agua a través de dos pozos de reinyección, generando un control hidráulico del flujo subterráneo.

La activación de la barrera se realizará de manera eventual y en función de un sistema de monitoreo hidrogeológico. El seguimiento se efectuará mediante una red de pozos de observación que controlan principalmente las concentraciones de sulfato (SO_4) en las aguas subterráneas. En caso de verificarse el cumplimiento de los criterios de activación definidos en el PAT, la barrera será puesta en operación y se mantendrá activa hasta que los indicadores de control vuelvan a condiciones establecidos en el mismo instrumento.

Durante la operación se efectuarán actividades de:

- Monitoreo hidrogeológico y de calidad de aguas subterráneas.
- Operación y mantención de pozos, bombas y tuberías.
- Mantención de sistemas eléctricos y de control.
- Inspección y conservación de accesos e infraestructura de apoyo.
- Evaluación periódica de la efectividad de la medida de contención.

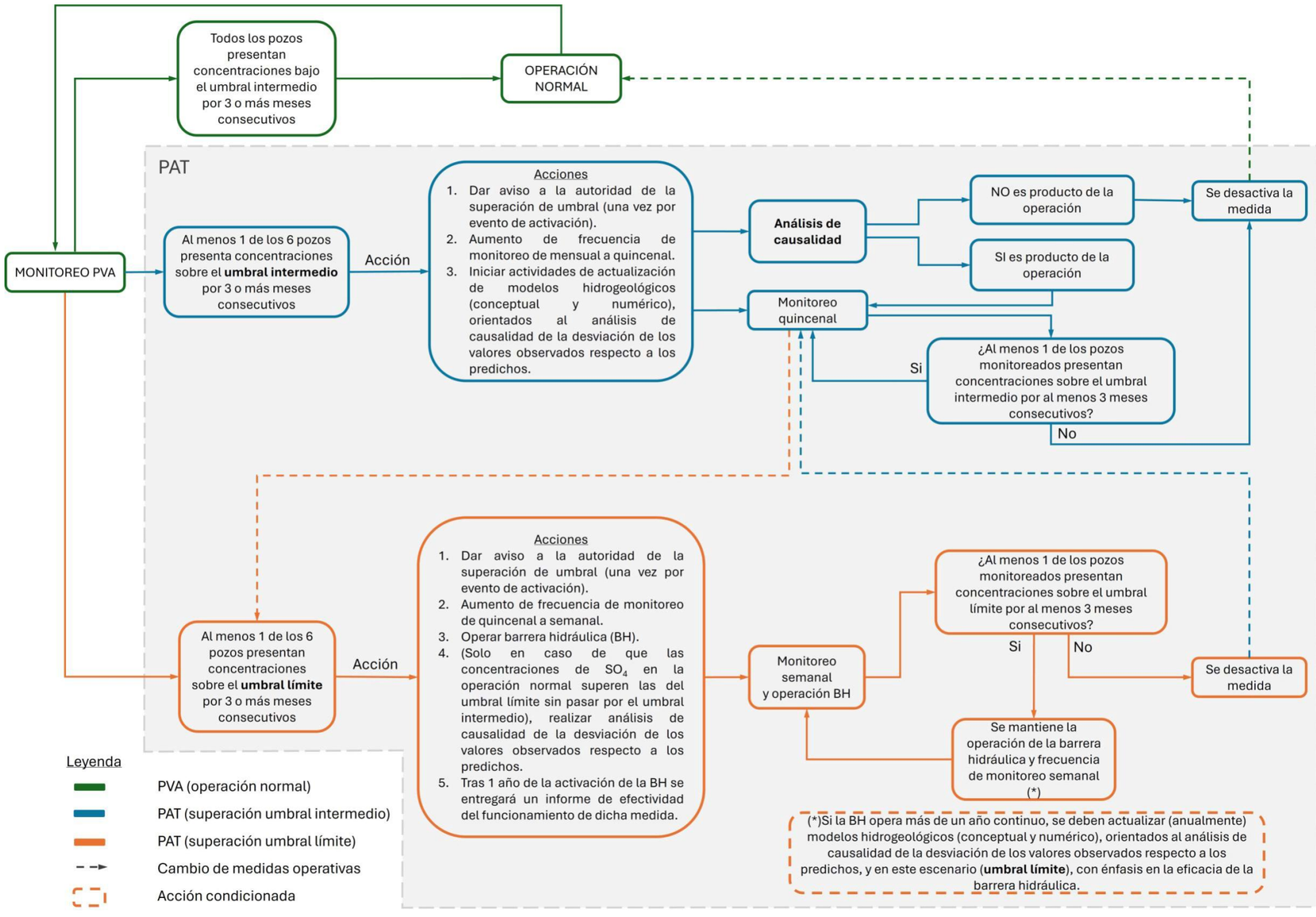
Los criterios de activación de la BH se han establecido en el Plan de Alerta Temprana (PAT), presentado en el Apéndice D del presente Anexo. La Figura 6 presenta el diagrama de flujo de funcionamiento del referido Plan y el procedimiento considerado para la activación de la BH.

De acuerdo con dicho procedimiento, cuando al menos uno (1) de los seis (6) Pozos PAT presenten concentraciones de sulfato superiores al umbral límite por tres (3) o más meses consecutivos (independiente de la frecuencia de monitoreo), se ejecutarán las siguientes acciones:

- Informar a la SMA y a la DGA en 30 días corridos, una vez por evento y pozo.
- Aumentar el monitoreo a frecuencia semanal
- Activar el funcionamiento de la barrera hidráulica.
- Actualizar el modelo hidrogeológico y simular la medida implementada.
- Actualizar anualmente los modelos si la barrera opera más de un año continuo.
- Entregar el informe de efectividad en el mes 14 desde el inicio efectivo de operación, evaluando el primer año (12 meses de datos) o el periodo efectivamente operado.
- Desactivar conforme a los criterios de recuperación e informar a la SMA y a la DGA.
- Retornar al monitoreo mensual cuando se cumpla la recuperación bajo los umbrales intermedios.

El PAT indica que, tal como se señala en la guía del SEA, frente a la superación negativa de umbrales (concentraciones de sulfato mayores al umbral definido) y la consecuente activación de acciones, estas acciones se deben desactivar cuando él o los puntos de observación del PAT muestren una superación positiva de la concentración de sulfato (recuperación de valores bajo umbral), durante al menos tres (3) meses consecutivos. Esto independientemente de la frecuencia de monitoreo que se esté ejecutando.

Figura 6. Procedimiento de Operación de la BH contenido en el Diagrama de flujo de funcionamiento del PAT



Fuente: PAT, código de documento: FLOW-COD006-MEM-HDG-006R5, adjunto en el Apéndice D del presente Anexo 2.

2.1.3.3 Fase de Cierre

Al término de la vida útil del proyecto o una vez que la barrera deje de ser requerida, se procederá al cierre de las instalaciones.

Las actividades de cierre consideran:

- Desenergización de la infraestructura eléctrica asociada.
- Retiro y desmantelamiento de equipos electromecánicos.
- Desmontaje de instalaciones auxiliares que no sean requeridas.
- Sellado de los pozos de extracción e inyección conforme a los procedimientos técnicos aplicables.
- Restitución de las condiciones de seguridad de las áreas intervenidas.
- Ejecución de los monitoreos post-cierre que correspondan según los instrumentos ambientales y sectoriales vigentes.

De esta forma, se asegura que la infraestructura no genere riesgos para las personas ni para los componentes ambientales una vez finalizada su operación.

2.1.4 Estimación de los plazos y periodos de construcción de la obra

Si bien se proponen, referencialmente, 4 pozos de la barrera hidráulica (BRT-1, BRT-2, BRT-3 y BRT-4) que se encuentran actualmente construidos, es posible que su ubicación sea reemplazada por pozos que se ubiquen dentro del polígono indicado en Figura 1, de acuerdo con la búsqueda de mayor eficiencia en el manejo de aguas de proceso.

Las gestiones previas para poder tener construida y operativa la barrera hidráulica consideran los siguientes aspectos de tipo técnico:

1. Exploración hidrogeológica para la determinación de los puntos más propicios para lograr un bombeo e inyección eficientes.
2. Perforación, habilitación y desarrollo de pozos de bombeo e inyección.
3. Realización de ensayos hidráulicos de larga duración para determinar los caudales óptimos, descensos y ascensos en los niveles del acuífero, eficiencia de los pozos e interferencias entre ellos.

Junto a las siguientes gestiones de tipo administrativo:

1. Gestión de permisos asociados a la aplicación de la Circular N°3 DGA 2018 (metodología aprobada en el ORD. N°237 del 13 de junio de 2023).
2. Resolución y otorgamiento de dichos permisos por parte de los organismos competentes.
3. La tramitación ambiental del Proyecto, incluyendo la evaluación del PAS 158 en el marco del EIA hasta la obtención de la RCA, y tramitación sectorial del PAS 158.
4. El desarrollo de la ingeniería de detalle y la planificación de las obras;
5. El inicio de la verificación y gestión de los derechos de aprovechamiento de aguas requeridos para la operación de la Barrera Hidráulica.

Actividades relacionadas a la posible construcción de nuevos pozos, instalación de la infraestructura e instrumentación complementaria necesaria para la operación de la BH, se

detallan en la Tabla 3. Estas actividades incluyen la instalación de tuberías de transporte de agua (extracción e inyección), línea eléctrica de 13.8 kV, subestación eléctrica, caminos de acceso y operación, como también la integración de los sistemas y pruebas de funcionamiento.

Todas estas actividades asociadas a la fase de construcción se desarrollarán, de manera preliminar, entre el Año 2 y el Año 4, contados desde la obtención de la RCA favorable, conforme al siguiente cronograma:

Tabla 3. Cronograma estimado de construcción y habilitación de la Barrera Hidráulica

Fases	Actividad	Año													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	…	30	31	32
		2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	…	2058	2059	2060
Fase de Construcción	Acondicionamiento e instrumentación de pozos existentes (BRT-1, BRT-2, BRT-3 y BRT-4), o construcción de pozos nuevos según polígono de Figura 1.		X	X	X							…			
	Instalación de tuberías de transporte de agua (extracción e inyección), línea eléctrica de 13.8 kV, subestación eléctrica, caminos de acceso y operación.		X	X	X							…			
Fase de Operación	Integración de los sistemas y pruebas de funcionamiento.					X	X	X				…			
	Disponibilidad operacional de la BH.					X	X	X	X	X	X	…	X	X	
Fase de Cierre	Desenergización y desmantelamiento de la infraestructura, y sellado de los pozos de inyección y extracción.											…		X	X

Fuente: Elaboración propia.

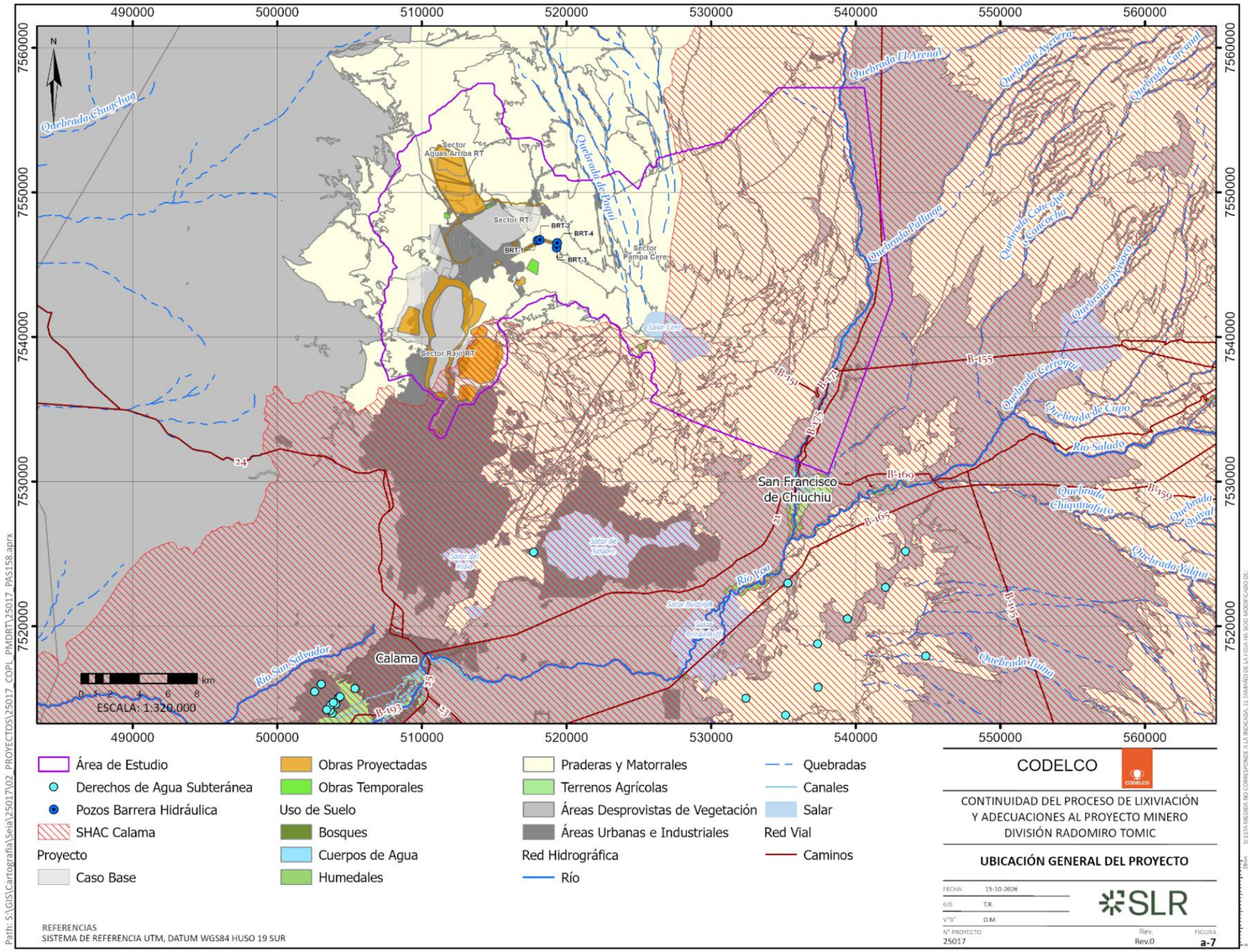
2.1.5 Planos a escala del proyecto; se deberá considerar al menos los siguientes planos:

2.1.5.1 Plano o mapa que indique la ubicación del proyecto, señalando ubicación de caminos, ciudades o poblados cercanos, cursos de agua naturales y artificiales, uso de suelo, ubicación de pozos con derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas otorgados por DGA, actividades que pueden condicionar el proyecto, etc.; incluir, de modo orientativo, la delimitación del sector acuífero a recargar;

A continuación, se presenta la Figura 7, que corresponde al mapa a escala del proyecto que muestra la ubicación general del Proyecto, la disposición de las obras aprobadas y proyectadas, la ubicación de los pozos de inyección y bombeo, su relación con los Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC), la red vial, los poblados más cercanas (Calama y Chiu-Chiu), la red hidrográfica natural y artificial (canales), y la ubicación de pozos con derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas otorgados por DGA.

De acuerdo con dicha figura, el Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC) más cercano corresponde al SHAC Calama, clasificado como Zona de Prohibición. Si bien el SHAC Calama intercepta algunas obras del Proyecto, no presenta superposición con el Área de Influencia Hidrogeológica para la cantidad del recurso hídrico subterráneo ni con el Área de Influencia de calidad de aguas subterráneas asociada a la operación de la BH. En consecuencia, el Proyecto no queda sujeto a una gestión hidrogeológica colectiva ni a restricciones especiales asociadas a dicho sector.

Figura 7. Mapa de ubicación general del proyecto

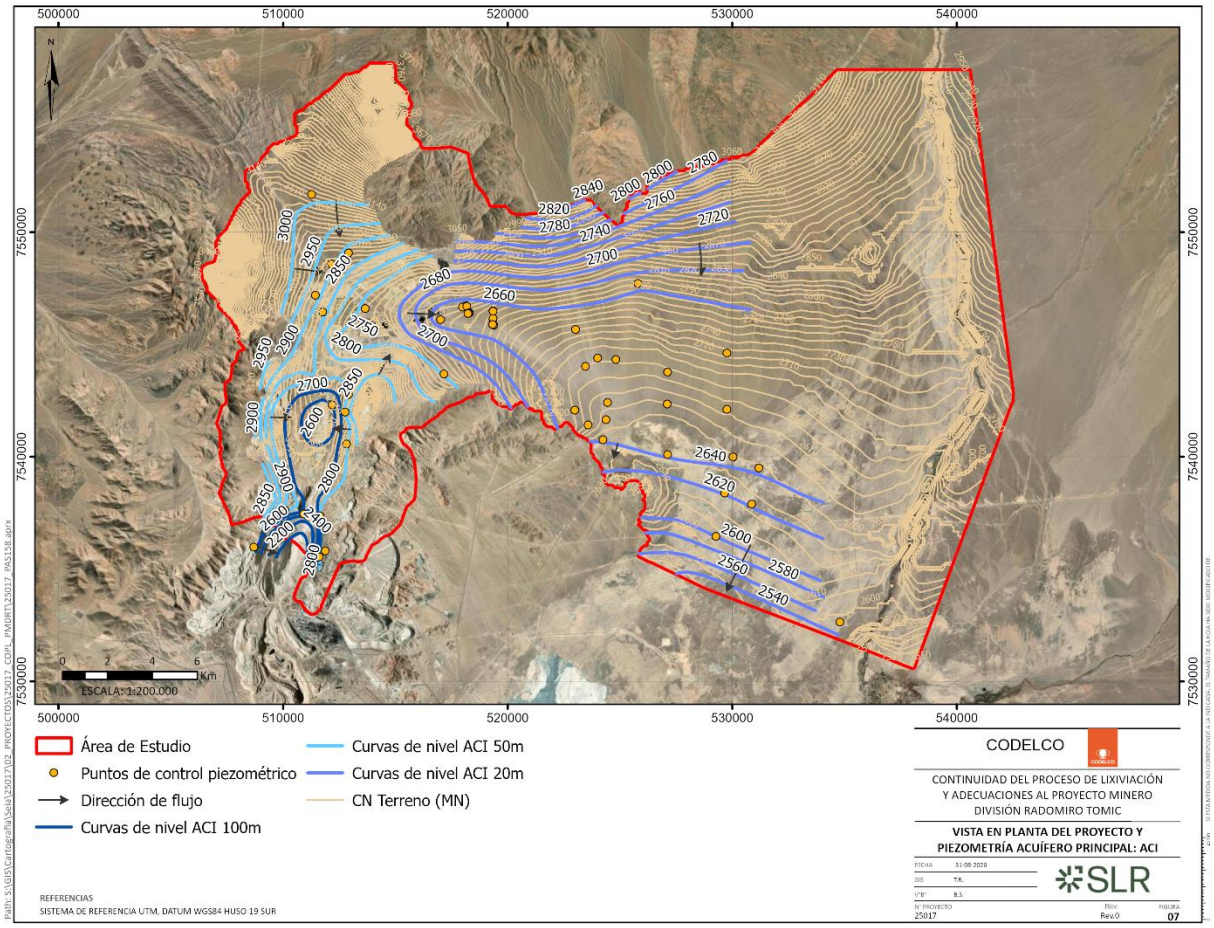


Fuente: Elaboración propia.

2.1.5.2 Vista en planta del área sin proyecto, indicando curvas de nivel topográfico y curvas piezométricas del acuífero a recargar;

A continuación, en la Figura 8 se presenta una vista en planta del área sin proyecto, que permite visualizar la piezometría del acuífero a recargar denominado UH-5 (acuífero inferior o principal). Estas curvas piezométricas provienen del Anexo 13 Modelo Conceptual que se acompaña en esta adenda, la cual fue elaborada a partir de mediciones en pozos durante el año 2025.

Figura 8. Vista en planta del proyecto y piezometría acuífero principal

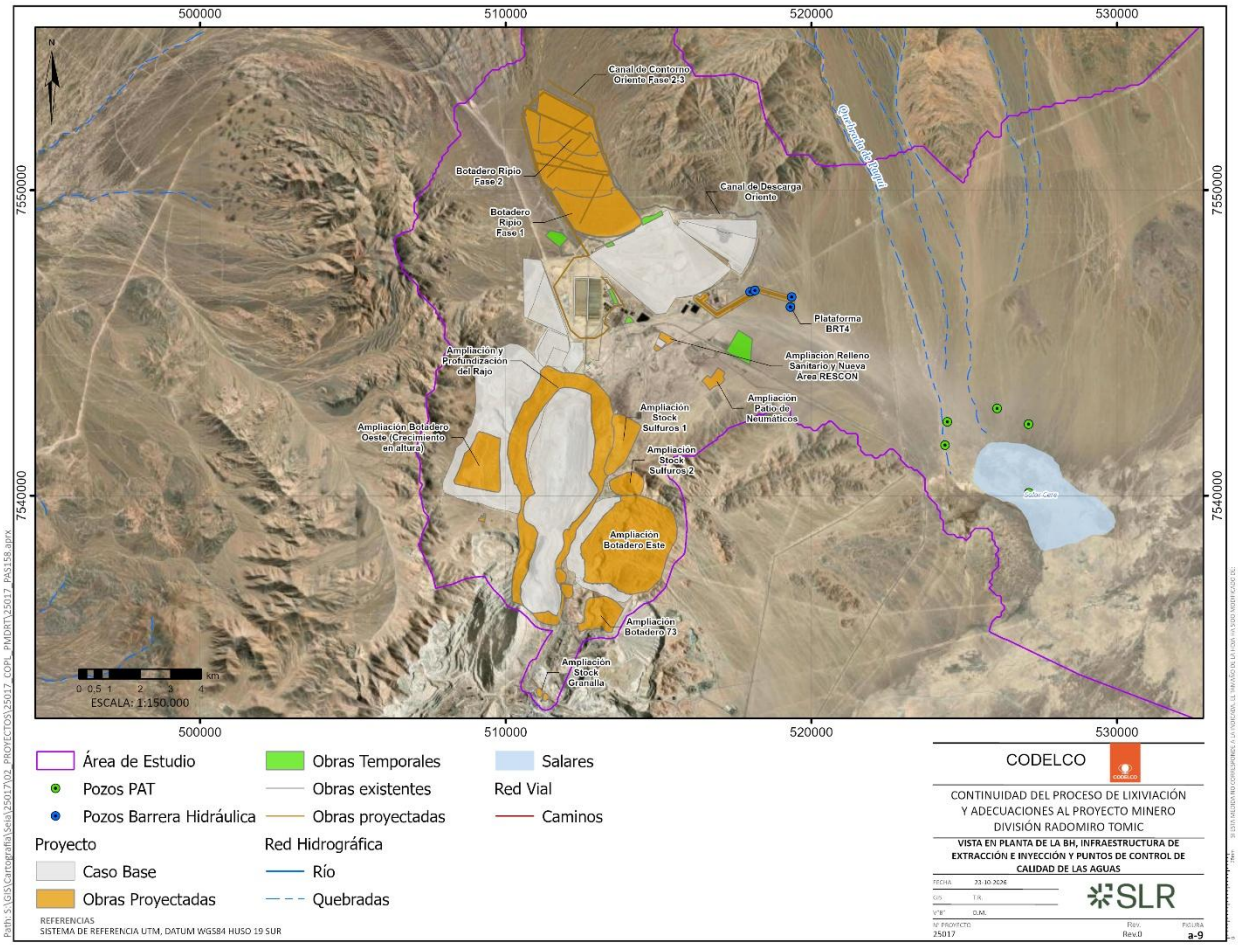


Fuente: Elaboración propia.

2.1.5.3 Vista en planta del área con proyecto, que incluya todos los elementos que lo componen y en particular lo relativo al control de calidad de aguas de la recarga artificial y la descripción de la infraestructura proyectada para la recuperación del agua recargada, incluyendo la ubicación del punto de extracción y su regla de operación, si corresponde;

La Figura 9 muestra una vista en planta del área con proyecto, incluyendo las ubicaciones de los puntos de extracción (pozos BRT-3 y BRT-4), y los pozos PAT que regulan su regla de operación. El control de calidad de aguas de la recarga artificial proviene de la calidad química del agua proveniente de la Planta Desaladora del Distrito Norte de Codelco.

Figura 9. Vista en planta de la BH, infraestructura de extracción e inyección y puntos de control de calidad de las aguas

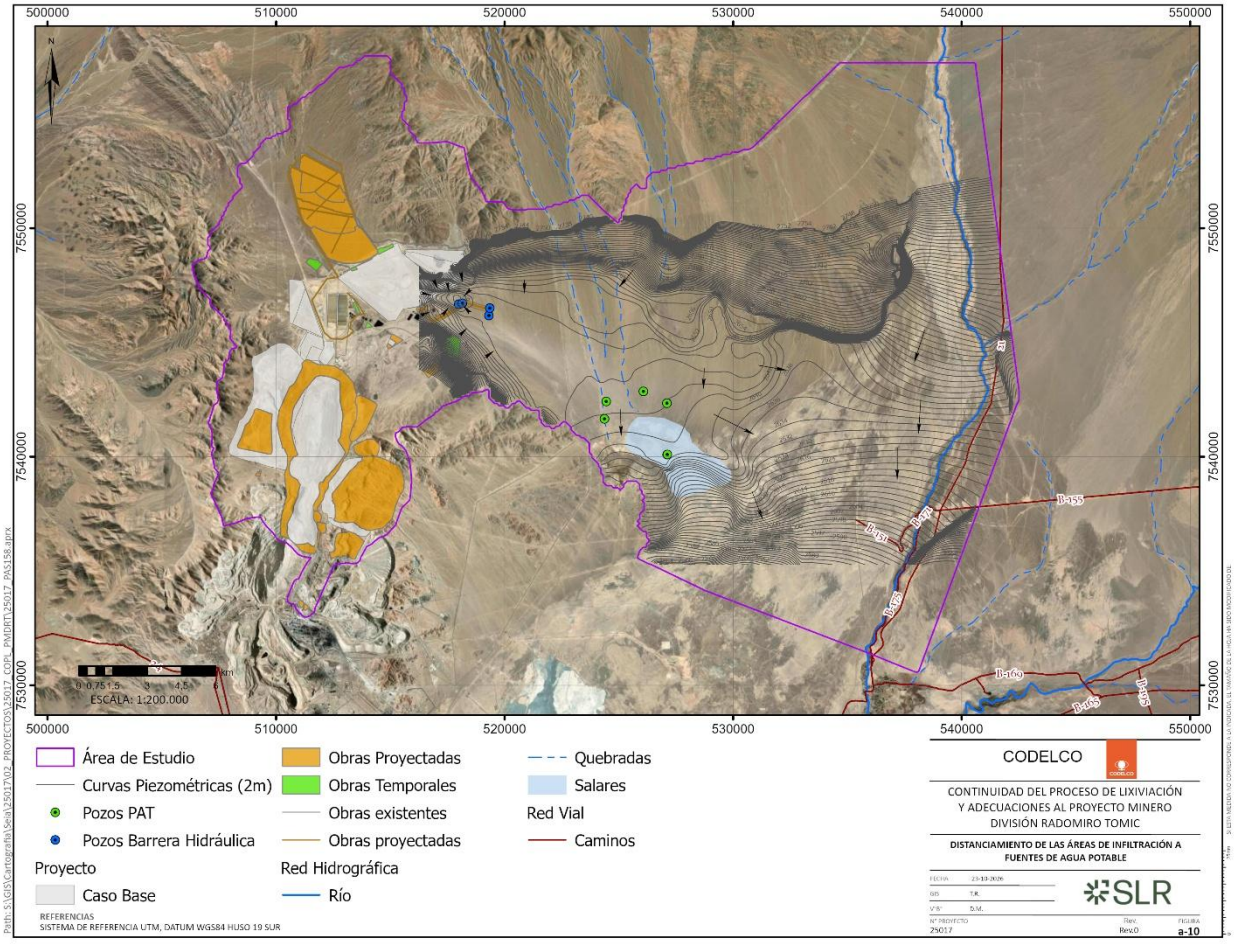


Fuente: Elaboración propia

2.1.5.4 Vista en planta del proyecto, indicando las curvas piezométricas del acuífero considerando la recarga artificial y la dirección del flujo a recargar.

A continuación, se presenta la Figura 10, la cual muestra una vista en planta del proyecto, indicando las curvas piezométricas del acuífero inferior que son el resultado de la modelación numérica realizada en un escenario que considera el funcionamiento de la barrera hidráulica (Sim 5) al año 2042 (último año de funcionamiento de la BH. La figura además indica la dirección de flujo resultante de esta piezometría.

Figura 10. Curvas piezométricas y dirección del flujo subterráneo en el escenario de operación de la BH

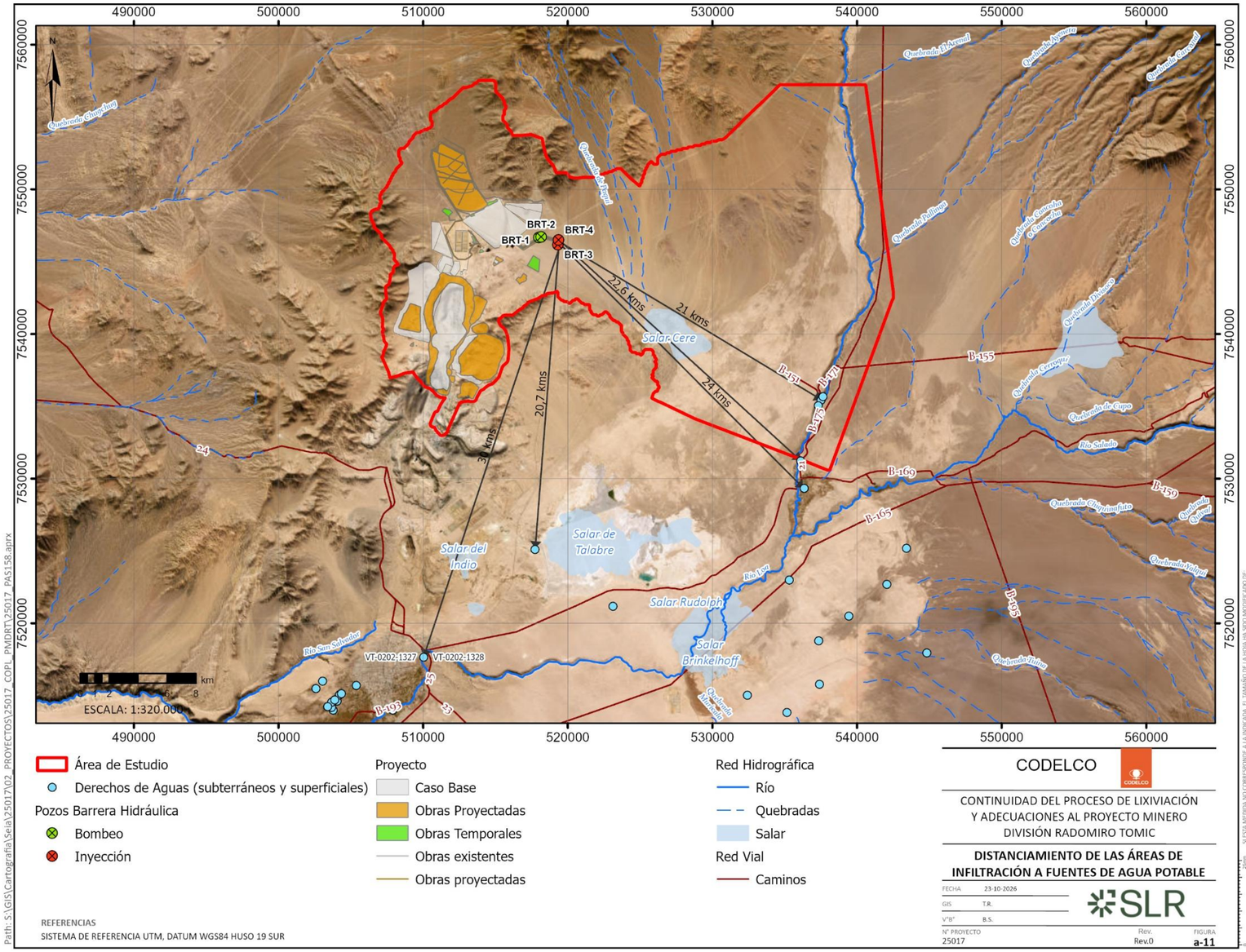


Fuente: Elaboración propia.

2.1.6 Distanciamiento desde el área de infiltración a cualquier fuente destinada a la producción de agua para consumo humano (formal o informal).

La Figura 11 y la Tabla 4 presenta el distanciamiento entre los puntos de infiltración asociadas a los pozos de inyección de la BH, y las fuentes de agua identificadas en el entorno del Proyecto. En particular, se consideran como referencia las fuentes de agua más cercanas destinadas o potencialmente asociadas al abastecimiento humano, así como derechos de aprovechamiento de aguas superficiales y subterráneas próximos al área de recarga artificial.

Figura 11. Distanciamiento de las áreas de infiltración a fuentes de agua potable



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la información presentada, los derechos superficiales que tienen un uso declarado de bebida/uso doméstico/saneamiento corresponde a los expedientes VT-0202-1327 y VT-0202-1328, propiedad de la empresa ESSAN de Servicios Sanitarios, desde una fuente de vertiente, ubicados a una distancia de 30 km al suroeste desde la zona de recarga artificial.

Otros derechos superficiales, en el río Loa, que no declaran su uso, se ubican a entre 2-24 km al sureste del área de la recarga. Estos se ubican cercanos a las localidades de Lasama, y San Francisco de Chiu Chiu, que probablemente utilizan el agua para consumo humano/animal.

El derecho de aprovechamiento subterráneo más cercano corresponde al asociado al expediente VPC-0202-5020, el que se ubica a unos 21 km al sur del área de recarga. Este DAA es propiedad del Titular en la División Ministro Hales, y su uso probablemente es minero.

Tabla 4. Distanciamiento de las áreas de infiltración a fuentes de agua potable

Área de interés	Distancia (km)	Código del Expediente del DAA
DAA Superficial con uso declarado: Bebida/uso doméstico/saneamiento. Fuente: Vertiente	30 km al Suroeste, en ciudad de Calama	VT-0202-1327 Empresa de Servicios Sanitarios de Antofagasta S.A. (ESSAN) VT-0202-1328 Empresa de Servicios Sanitarios de Antofagasta S.A. (ESSAN)
Otros DAA Superficiales cercanos Fuente: Rio Loa	21-24 km al Sureste	NR-0202-5002, NR-0202-5003, NR-0202-5005, NR-0202-5008, NR-0202-5009, NR-0202-5010, NR-0202-5013, NR-0202-5014, NR-0202-5015, NR-0202-5016, NR-0202-5019, NR-0202-5022, NR-0202-5025, NR-0202-5026, NR-0202-5028, NR-0202-5030, NR-0202-5035
DAA Subterránea más cercanos. Fuente: Acuífero	20,7 km al Sur	VPC-0202-5020 CORPORACION NACIONAL DEL COBRE DE CHILE DIVISION MINISTRO HALES
Nomenclatura: DAA: Derecho de Aprovechamiento de Agua, que puede ser superficial o subterráneo; **NR:** No regularizado. Derecho de agua inscrito o solicitado, pero que aún no cuenta con la validación definitiva dentro del sistema oficial de derechos de aguas.; **VPC:** Variación de Punto de Captación. **VT:** derecho proveniente de Vertiente.		

Fuente: Elaboración propia.

2.2 Caracterización de la calidad física y química de las aguas que se infiltrarán con la obra

2.2.1 Descripción del origen de las aguas destinadas a la recarga

El agua destinada a la recarga artificial del acuífero provendrá preferentemente de la planta desaladora de Codelco, o de aguas adquiridas a terceros que cuenten con las autorizaciones pertinentes, así como aguas asociadas a derechos de aprovechamiento de los que Codelco sea titular, siempre que su utilización resulte compatible con la calidad de agua del medio receptor y con la implementación y operación de los pozos de la barrera hidráulica, cabe destacar que su consideración en este contexto, no implica su incorporación como fuente de abastecimiento de agua industrial para la operación minera normal del Proyecto, solo como parte de una de las alternativas de la recarga artificial del acuífero.

La Planta Desaladora del Distrito Norte de Codelco, fue autorizada mediante las RCA N°022/2016, correspondiente al proyecto RT Sulfuros, y N°045/2018, correspondiente al proyecto Adecuación Planta Desaladora RT Sulfuros.

El Titular asegurará que estas fuentes cumplan estrictamente con los estándares de calidad exigidos para la recarga del acuífero, sin comprometer su integridad. Es importante mencionar que las características fisicoquímicas del agua a inyectar cumplirán con ser de igual o mejor calidad que las aguas del acuífero en los sectores donde se realizará la inyección que corresponden a sitios con afectación por aguas de contacto del Sector Industrial RT.

La utilización de fuentes complementarias estará condicionada a su caracterización previa y al cumplimiento de los criterios de calidad establecidos para el agua destinada a la recarga, conforme a lo indicado en el numeral 2.2.22.2.1.

2.2.2 Caracterización de las propiedades físicas, químicas y biológicas de las aguas destinadas para la recarga. Según sea el origen de las aguas, describir la variabilidad de sus propiedades. Al respecto, en el título 7 se presentan algunos criterios orientativos.

El agua destinada a la recarga artificial del acuífero provendrá preferentemente de la Planta Desaladora del Distrito Norte de Codelco, fuente autorizada mediante las RCA N°022/2016, correspondiente al proyecto RT Sulfuros, y N°045/2018, correspondiente al proyecto Adecuación Planta Desaladora RT Sulfuros. Alternativamente, también se utilizarán aguas adquiridas a terceros que cuenten con las autorizaciones pertinentes, así como aguas asociadas a derechos de aprovechamiento de los que Codelco sea titular, siempre que su utilización resulte compatible con la calidad de agua del medio receptor y con la implementación y operación de los pozos de la barrera hidráulica.

El proceso de producción de agua desalada contempla captación de agua de mar, pretratamiento, ósmosis inversa y postratamiento o remineralización, lo que da como resultado aguas de composición fisicoquímica relativamente estables debido al proceso de tratamiento. En el caso de aguas continentales (DAA del Titular y/o compra a terceros autorizados), éstas podrían presentar una mayor variabilidad asociada a su origen y condiciones de captación.

Indistintamente del origen de las aguas, el Titular asegurará que estas fuentes cumplan con los estándares de calidad exigidos para la recarga del acuífero, sin comprometer su integridad. Es importante mencionar que las características fisicoquímicas del agua a inyectar cumplirán con

ser de igual o mejor calidad que las aguas del acuífero en los sectores donde se realizará la inyección que corresponden a sitios con afectación por aguas de contacto del Sector Industrial RT.

El agua que será efectivamente infiltrada deberá cumplir con los criterios de calidad establecidos en la Tabla 5, los cuales fueron definidos considerando:

(1) Condición hidroquímica basal del acuífero: para los parámetros con información hidroquímica representativa, se adoptaron como referencia los valores correspondientes al percentil 75 de la base de datos hidroquímica histórica, desde septiembre de 2003 hasta marzo de 2026, considerando los registros de los pozos PCH-14, PCH-18 y PCH-16B, ubicados en el sector de la recarga.

(2) Parámetros sin monitoreo: se adoptaron como referencia las magnitudes establecidas en la NCh 409/2005, complementadas con los límites establecidos en la Tabla 4 de la Circular N° 2 de la DGA (en base al D.S. N° 46/2002).

(3) Características del agua desalada: para los parámetros asociados específicamente a la calidad del agua producida por la planta desaladora, se consideraron los valores establecidos en su diseño.

(4) Sulfatos: se adoptó la concentración de sulfatos establecida para la simulación del escenario que incluye el funcionamiento de la BH (Anexo 25 Modelo Hidrogeológico Numérico).

De este modo, la Tabla 5 establece los criterios de calidad aplicables al agua que será efectivamente infiltrada, cualquiera sea su fuente de origen.

Tabla 5. Características fisicoquímicas del agua para la recarga artificial.

Parámetro	Unidad	Límites máximos Tabla 1 y Tabla 2 Nch409/2005/ Límite Circular DGA N°2 Tabla 4*	Magnitud máxima para el agua utilizada en la recarga artificial
Aluminio	mg/L	5*	≤ 0,81 (1)
Arsénico	mg/L	0,01	≤ 0,16 (1)
Boro	mg/L	0,75*	≤ 14,2 (1)
Cadmio	mg/L	0,01	≤ 0,01 (1)
Cianuro	mg/L	0,05	≤ 0,05 (1)
Cobre	mg/L	2	≤ 0,1 (1)
Cromo Total	mg/L	0,05	≤ 0,02 (1)
Cromo hexavalente	mg/L	0,005*	≤ 0,005 (2)

Parámetro	Unidad	Límites máximos Tabla 1 y Tabla 2 Nch409/2005/ Límite Circular DGA N°2 Tabla 4*	Magnitud máxima para el agua utilizada en la recarga artificial
Fluoruro	mg/L	1,5	≤ 1,58 (1)
Hierro	mg/L	0,3	≤ 3,88 (1)
Magnesio	mg/L	125	≤ 19,51 (1)
Manganeso	mg/L	0,1	≤ 0,09 (1)
Mercurio	mg/L	0,001	≤ 0,01 (1)
Molibdeno	mg/L	1*	≤ 0,17 (1)
Níquel	mg/L	0,2*	≤ 0,01 (1)
Nitrato	mg/L	50	≤ 85,1 (1)
Nitrito	mg/L	3*	≤ 3 (2)
Selenio	mg/L	0,01	≤ 0,01 (1)
Sulfuros	mg/L	1*	≤ 0,01 (1)
Zinc	mg/L	3	≤ 0,11 (1)
Coliformes fecales	Col Fec NMP/100ml	-	≤ 23(1)
Eschericia Coli	-	Ausente	Ausente (2)
2,4 – D*	mg/L	0,03	≤ 0,03 (2)
DDT + DDD + DDE*	mg/L	0,002	≤ 0,002 (2)
Lindano*	mg/L	0,002	≤ 0,002 (2)
Metoxicloro*	mg/L	0,02	≤ 0,02 (2)
Pentaclorofenol*	mg/L	0,009	≤ 0,009 (2)
pH	Adimensional	6 – 8,5	7,0 - 8,5 (3)
Plomo	mg/L	0,05	≤ 0,2(1)
Cloruros	mg/L	400*	< 300 (3)
Sulfatos	mg/L	500*	≤ 200 (4)
SDT	mg/L	No aplica	< 700 (3)

(1) Rangos referenciales establecidos en función del percentil 75 de la base de datos hidroquímica del acuífero principal, determinado a partir de los registros del pozo PCH-14, PCH-18 y PCH-16B, todos ubicados en el sector de la recarga artificial. Los valores referenciales cumplen con ser de mejor o igual calidad que las aguas del acuífero principal en el sector de la BH (pluma de sulfatos existente); (2) Sin monitoreo del parámetro, valor referencial corresponde al límite de la NCh 409/2005, complementada con la Tabla 4 de la Circular N°2 DGA; (3) Valor establecido por diseño de la planta desaladora (Capítulo 1 del EIA RT Sulfuros). (4) Corresponde a la concentración de sulfatos establecida para la Simulación 5, que corresponde al caso con proyecto + operación de barrera hidráulica (Anexo 25 Modelo Hidrogeológico Numérico).

Fuente: Elaboración propia.

2.2.3 Si corresponde, incluir una descripción de los procesos de pre-tratamiento del agua a recargar

El agua destinada a la recarga artificial provendrá preferentemente de la Planta Desaladora del Distrito Norte de Codelco. En dicha instalación, el agua de mar es sometida a procesos de pretratamiento, osmosis inversa y post-tratamiento, con el objeto de obtener agua desalada apta para su conducción y uso operacional.

Captación de agua de mar

El agua de mar es captada y conducida hasta la planta desaladora para su ingreso al sistema de tratamiento.

Pretratamiento

El objetivo del sistema de pre-tratamiento es asegurar la calidad requerida para la alimentación del sistema de ósmosis inversa. Para ello se consideran procesos de separación física destinados a la remoción de partículas y material orgánico, seguidos de un sistema de ultrafiltración con su correspondiente sistema de lavado de membranas.

Osmosis Inversa

Este sistema tiene por objetivo desalar el agua de mar para obtener un agua producto de calidad industrial. El proceso de osmosis inversa operará con una recuperación de un 45%, respecto al agua de mar que ingresa en los bastidores, incluirá un sistema de lavado de membranas in-situ (“CIP”), diseñado para limpiar las membranas de cualquier suciedad biológica, orgánica y/o incrustación mineral

Postratamiento:

Esta operación comprende el acondicionamiento del agua desalada con productos químicos para ajuste de su pH y dureza cálcica (remineralización). El proceso de remineralización se basa en la adición de CO2 y cal. La dosificación se realizará una vez el agua tratada abandone el depósito de desplazamiento y con el fin de evitar corrosión en el sistema de impulsión de agua.

En caso de requerirse fuentes complementarias de abastecimiento, tales como derechos de aprovechamiento de aguas vigentes del Titular o agua adquirida a terceros autorizados, éstas sólo serán utilizadas en la medida que cumplan previamente, y en forma estricta, con los criterios de calidad definidos para el agua destinada a la recarga artificial. Por lo tanto, toda agua que sea infiltrada en el acuífero deberá presentar una calidad igual o mejor que los valores máximos establecidos en la Tabla 5 del presente Anexo.

2.2.4 Si corresponde, detallar la normativa ambiental que cumplirán las aguas que se infiltrarán.

La Circular N°2 sobre las obras de infiltración directa establece que “el agua a inyectar deberá ser de igual o mejor calidad que la del contenido natural (C.N.) del acuífero durante la totalidad del tiempo que se considere su operación incluyendo, si corresponde, aquel período de tiempo en que funcione de forma provisoria al final de su fase de construcción”.

En concordancia con lo anterior, el agua destinada a la recarga artificial de la BH deberá cumplir con los criterios de calidad definidos para el agua a infiltrar, independiente de su fuente de

abastecimiento. Lo anterior aplica tanto para el agua proveniente de la Planta Desaladora del Distrito Norte, como para eventuales fuentes complementarias, tales como derechos de aprovechamiento de aguas vigentes del Titular o agua adquirida a terceros autorizados.

La calidad del agua destinada a la recarga artificial deberá cumplir con ser de igual o mejor calidad que el agua del acuífero en el área de recarga, y en el caso de ser un parámetro que no cuente con mediciones históricas, deberá cumplir con los límites máximos definidos en la Tabla 5 del presente Anexo, los cuales fueron establecidos considerando los criterios aplicables de la NCh 409/2005, complementada con la Circular N°2 de la DGA, y el D.S. N°46/2002. Para el caso del sulfato, el límite máximo establecido es de 200 mg/L, valor que proviene de la concentración de sulfatos establecida para la Simulación 5, que corresponde al caso con proyecto + operación de barrera hidráulica (Anexo 25 Modelo Hidrogeológico Numérico).

Estos criterios deberán verificarse de manera previa y durante la operación de la BH, mediante el plan de monitoreo correspondiente, con el objeto de asegurar la protección del acuífero y evitar la incorporación de aguas que puedan generar alteraciones adversas en su calidad.

La utilización de fuentes complementarias de abastecimiento quedará condicionada al cumplimiento estricto de dichos criterios de calidad. Por lo tanto, sólo podrán ser destinadas a la recarga artificial aquellas aguas que cumplan con los valores máximos admisibles definidos para la infiltración al acuífero indicados en la Tabla 5 de este documento.

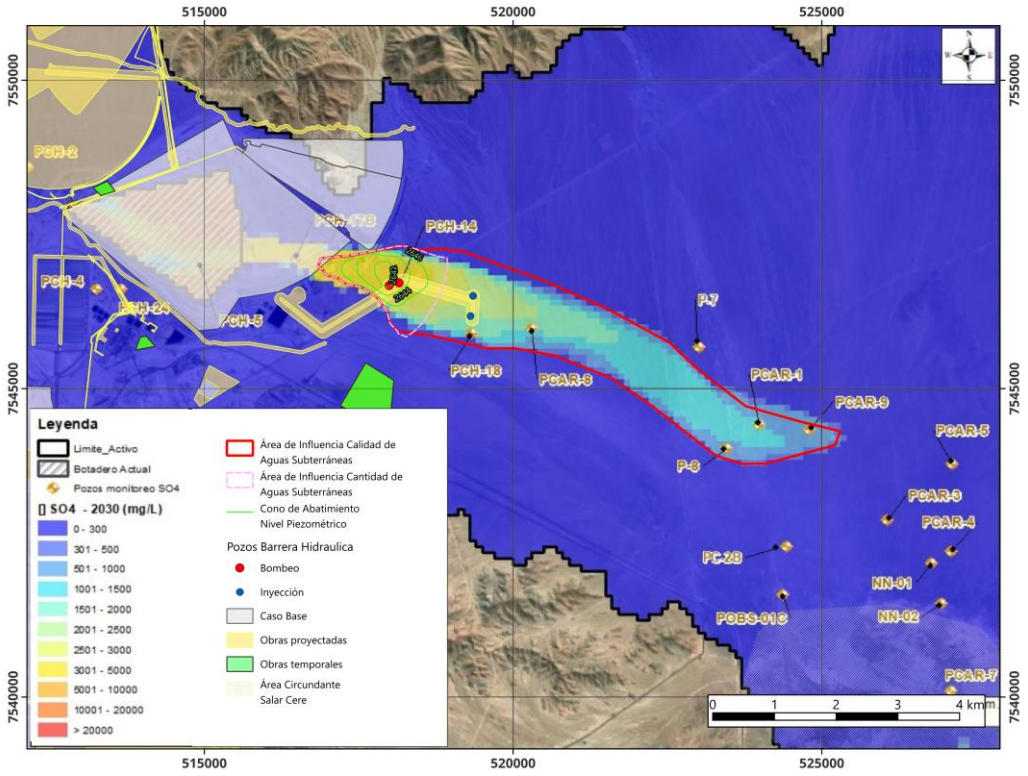
2.3 Caracterización de la calidad de las aguas del sector influenciado directamente por la recarga artificial

2.3.1 Propiedades químicas de las aguas del acuífero sin proyecto. Se requiere presentar una caracterización física, química y biológica de las aguas subterráneas en el área de influencia

A continuación, se presenta una caracterización de la calidad de las aguas subterráneas en el acuífero principal (UH-5), en el área de influencia de la recarga artificial, en la situación sin proyecto.

Respecto al Área de Influencia (AI) de la recarga artificial, en cuanto a calidad y cantidad, ésta se define sobre la base de los resultados del Modelo Numérico Hidrogeológico actualizado (Anexo 25) en esta adenda. El AI se define en función de la extensión de la pluma de concentración de sulfato en el Caso Base (al año 2030), considerando el escenario más desfavorable debido a las infiltraciones a causa de la operación histórica del botadero de ripios DRT, tal y como se muestra en la Figura 12. Cabe señalar que el Caso Base, o Simulación 1, corresponde a la simulación del Proyecto aprobado según RCA N°121/2021, con operación hasta 2030, escenario escogido para definir la AI de Calidad, dado que la operación de la Barrera Hidráulica actúa directamente sobre dicha pluma, generando su captura y reducción progresiva. En consecuencia, en el escenario Con Proyecto y CP+BH (Sim 2 y Sim, respectivamente) se proyecta una disminución gradual de las concentraciones de sulfato, lo que se traduce en una mejora de la calidad de las aguas subterráneas y, por ende, en un impacto positivo no significativo. Asimismo, el AI de cantidad de aguas subterráneas se encuentra en concordancia con la delimitación del AI de calidad de aguas subterráneas, toda vez que su extensión espacial se encuentra comprendida dentro del área definida para la componente de calidad.

Figura 12. Delimitación del AI de la calidad y cantidad de aguas subterráneas para la recarga artificial



Fuente: Elaboración propia

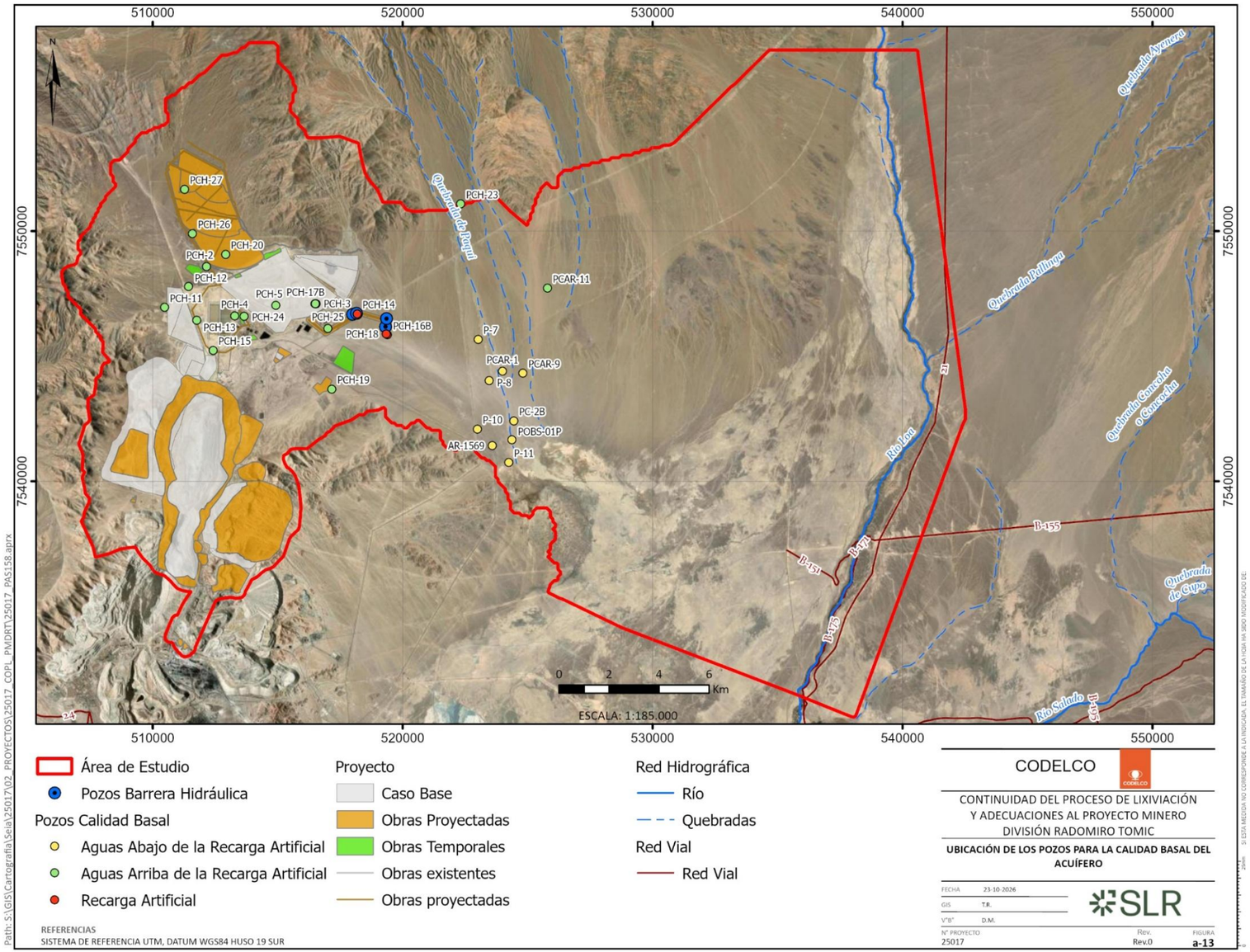
Luego, los pozos que se encuentran dentro del AI de la calidad de las aguas subterráneas por efecto de la recarga, son aquellos que pertenecen a los sectores de zona de mezcla proximal y zona de mezcla distal, de acuerdo con lo definido por el Modelo Conceptual actualizado (Anexo 13), tal como se indica en la Tabla 6. En base a los pozos PCH-14, PCH-16B, PCH-18, PCAR-1, P-7 y P-8, es que se caracteriza el AI de la recarga.

Para efectos de representar la calidad de aguas del acuífero en el AI de la recarga, se consideraron los parámetros físicos, químicos y biológicos disponibles en la base de datos hidroquímica, incluyendo metales, aniones, pH, sólidos disueltos totales, nitratos, cloruros y sulfatos. Las concentraciones mínimas, máximas, y en el percentil 75 de cada parámetro por sector, se presentan en la Tabla 7.

Adicionalmente, y con el objetivo de caracterizar todo el acuífero en la situación sin proyecto, se extiende esta caracterización hacia los sectores aguas arriba y aguas abajo del sector influenciado por la recarga. Esto también contenido en la Tabla 7.

En la Figura 13 se muestran todos los pozos con los que se ha caracterizado la condición basal del acuífero en la situación sin proyecto.

Figura 13. Ubicación de los pozos para la calidad basal del acuífero



Fuente: Elaboración propia

La caracterización de las aguas subterráneas del acuífero sin proyecto se realizó a partir de la base de datos hidroquímica contenida en el Apéndice E de este documento. Esta base de datos se encuentra actualizada con datos desde septiembre de 2003 hasta marzo del año 2026. La mayoría de los pozos analizados son parte del Plan de Vigilancia Ambiental (PVA). En este caso, sólo se han utilizado aquellos pozos que se encuentran operativos, debido a que los que se encuentran secos u obstruidos presentan datos sólo hasta 2019.

La Tabla 6 contiene el listado de los pozos utilizados para la caracterización de la calidad de aguas subterráneas en el sector de la recarga, como también en los sectores aguas arriba, y aguas abajo de esta. Adicionalmente, se adjunta un archivo KMZ en el Apéndice C, el cual contiene la ubicación de todos los pozos considerados en la caracterización de calidad de aguas subterráneas. Dicho archivo incorpora, como atributos de cada elemento, el nombre del pozo, la profundidad de la habilitación y el acuífero monitoreado, que corresponde al acuífero UH-5.

Para el sector aguas arriba de la recarga, de acuerdo con lo establecido en el Anexo 13 Modelo Conceptual de esta adenda, se tienen tanto aguas naturales como aguas de proceso. Para el sector aguas abajo se tienen aguas naturales además de aguas de proceso de mezcla distal. Las aguas en el sector de la recarga no son totalmente naturales, sino que se encuentran mezcladas con aguas de proceso de forma proximal a la fuente. Luego, se caracterizan no solamente los 3 sectores: sector de recarga, sector aguas arriba, y sector aguas abajo, sino que se realiza el análisis de forma separada entre dichos tipos de aguas.

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 6, las aguas subterráneas del sector de la BH presentan una mineralización elevada, con concentraciones medias relevantes de sólidos disueltos totales, sulfatos, y nitratos. En particular, se registran concentraciones, en el percentil 75, de: sulfatos del orden de 956 mg/L, sólidos disueltos totales del orden de 1.900 mg/L, y nitratos del orden de 85 mg/L. Luego, y de acuerdo con lo analizado en el Anexo 13 Modelo Conceptual, la composición hidroquímica del sector de mezcla proximal (pozos PCH-14, PCH-18, PCH-16B) de la BH presenta una evolución de las aguas desde una composición sulfatada-sódica a sulfatada/clorurada-sódico/cálcica, con una tendencia creciente en las concentraciones de sulfato, cloruro, nitrato y sodio en el tiempo, además de un aumento sostenido de los niveles en el tiempo.

Las aguas subterráneas en la zona de mezcla distal (P-7, P-8 y PCAR-1), también tiene una mineralización elevada, con concentraciones relevantes de sólidos disueltos totales, sulfatos, cloruros y nitratos. En particular, se registran concentraciones, en el percentil 75, de: sulfatos del orden de 806 mg/L, sólidos disueltos totales del orden de 2.445 mg/L, cloruros de 593 mg/L y nitratos del orden de 254 mg/L. Luego, y de acuerdo con lo analizado en el Anexo 13 Modelo Conceptual, las aguas subterráneas de la zona de mezcla distal indican una evolución donde se incorpora sulfato y calcio, pasando de una composición clorurada-sódica a sulfatada-calco sódica.

Respecto a las aguas de procesos en el sector aguas arriba de la recarga, o Sector Industrial RT, presenta concentraciones más elevadas de iones mayores, particularmente sulfatos, cloruros, sodio, nitratos y sólidos disueltos totales, lo que es consistente con la influencia de la pluma histórica de sulfatos existente en dicho sector. En particular, se registran concentraciones, en el percentil 75, de: sulfatos del orden de 3.000 mg/L, sólidos disueltos totales del orden de 35.000 mg/L, cloruros de 9.536 mg/L y nitratos del orden de 4.300 mg/L.

En contraste, el Sector Aguas Arriba RT, de aguas naturales, presenta menores concentraciones relativas de dichos parámetros, representando condiciones hidroquímicas comparativas menos

influenciadas por dicha pluma. En particular, se registran concentraciones, en el percentil 75, de: sulfatos del orden de 1.200 mg/L, sólidos disueltos totales del orden de 2.000 mg/L, cloruros de 160 mg/L y nitratos del orden de 70 mg/L.

Las aguas subterráneas naturales en el sector aguas abajo de la recarga registran concentraciones, en el percentil 75, de: sulfatos del orden de 250 mg/L, sólidos disueltos totales del orden de 1.400 mg/L, cloruros de 496 mg/L y nitratos del orden de 17 mg/L. Luego, y de acuerdo con lo analizado en el Anexo 13 Modelo Conceptual, las aguas subterráneas de esta zona se caracterizaron por presentar una composición desde clorurada/sulfatada-cálcica a clorurada-sódico/potásica.

Tabla 6. Pozos de monitoreo utilizados para la caracterización de la calidad de aguas subterráneas en los sectores de recarga, aguas arriba, y aguas abajo de la recarga artificial

Sector	Clasificación	Pozo de Monitoreo	Coordenadas UTM (WGS84)		Periodo de datos utilizados		Estado Actual	Fuente	Habilitación	Acuífero que mide	Profundidad del Pozo (m)
			Este, m	N, m	Fecha Inicio	Fecha Fin					
Aguas Arriba de la Recarga Artificial	Aguas Naturales aguas arriba RT	PCH-23	522316	7551087	abr-11	oct-17	Pozo operativo	Pozo actual del PVA	124,55-130,5 / 136,43-142,38 / 148,32-183,96	ACI (UH-5)	192
		PCAR-11	525791	7547722	sept-05	oct-25	Pozo operativo	Pozo Interno	S/I	ACI (UH-5)	210
		PCH-26	511592	7549901	may-12	nov-25	Pozo operativo	Pozo actual del PVA	88-172	ACI (UH-5)	178
		PCH-27	511271	7551673	may-12	nov-25	Pozo operativo	Pozo actual del PVA	48-52, 59-65,72-76, 84-88, 95-101, 106-112, 120-124, 130-136, 143-148, 155-160,168-172	ACI (UH-5)	178
	Aguas de proceso subterráneas	PCH-2	512154	7548585	sept-03	feb-26	Pozo operativo	Pozo actual del PVA	S/I	ACI (UH-5)	S/I
		PCH-12	511435	7547789	abr-11	feb-26	Pozo operativo	Pozo actual del PVA	S/I	ACI (UH-5)	200
		PCH-13	511762	7546440	may-11	feb-26	Pozo operativo	Pozo actual del PVA	S/I	ACI (UH-5)	266
		PCH-19	517168	7543687	abr-11	ene-26	Pozo operativo	Pozo actual del PVA	133,1-144,97 / 150,91-162,79 / 168,73-174,66 / 186,54-198,42 / 204,36-216,24 / 222,18-234,06	ACI (UH-5)	240
		PCH-20	512913	7549070	abr-11	feb-26	Pozo operativo	Pozo actual del PVA	71,18-83,06 / 89,01-100,88 / 106,83-118,69 / 130,57-142,43 / 148,36-160,23 / 166,16-178,03	ACI (UH-5; 6)	180
		PCH-24	513660	7546598	may-12	sept-25	Pozo operativo	Pozo actual del PVA	168-220	ACI (UH-5)	226
		PCH-25	517006	7546115	may-12	feb-26	Pozo operativo	Pozo actual del PVA	180-184, 192-196, 202-208, 214-220,226-232	ACI (UH-5)	235
Recarga Artificial	Zona de mezcla Proximal	PCH-14	518180	7546692	abr-11	feb-26	Pozo operativo	Pozo actual del PVA	106-118 / 166-177,7 / 183,62-195,47 / 201,41-213,47 / 219,2-231,07 / 237,01-248,87 / 254,8-266,67	ACI (UH-5)	269
		PCH-16B	519386	7545860	abr-11	feb-26	Pozo operativo	Pozo actual del PVA	141-165 / 171-201 / 207-231	ACI (UH-5)	235
		PCH-18	519337	7545885	abr-11	feb-26	Pozo operativo	Pozo actual del PVA	118,8-130,68 / 136,62-148,5 / 154,44-166,32 / 172,26-184,14 / 190,08-201,96 / 207,9-219,78	ACI (UH-5)	230
Aguas Abajo de la Recarga Artificial	Zona de mezcla Distal	PCAR-1	523995	7544399	jul-05	mar-26	Pozo operativo	Pozo nuevo del PVA	45-81 / 93-117 / 129-153 / 165-189 / 201-225 / 237-261 / 273-303	ACI (UH-5)	333
		P-8	523466	7544030	sept-03	oct-25	Pozo operativo	Pozo Interno	S/I	ACI (UH-5)	400
		P-7	523015	7545673	sept-03	oct-25	Pozo operativo	Pozo Interno	62-114	ACI (UH-5)	389
	Aguas Naturales aguas abajo	PCAR-9	524811	7544324	ago-05	mar-26	Pozo operativo	Pozo Interno	50-74 / 80-104 / 110-132 / 138-162 / 168-192	ACI (UH-5)	198
		P-10	522986	7542085	oct-03	oct-25	Pozo operativo	Pozo Interno	S/I	ACI (UH-5)	81
		AR-1569	523585	7541420	sept-03	oct-25	Pozo operativo	Pozo Interno	S/I	ACI (UH-5)	199,5
		PC-2B	524445	7542418	oct-05	feb-26	Pozo operativo	Pozo Interno	48,52-105,72 / 116,44-156,06 / 173,04-201,34	ACI (UH-5)	207
		POBS-01P	524370	7541655	jun-17	mar-26	Pozo operativo	Pozo nuevo del PVA	10,99-22,48 / 50,98-73,9 / 79,63-96,82 / 102,55-119,74 / 125,47-142,66	ACI (UH-5	155

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Caracterización de la calidad de aguas subterráneas en los sectores de recarga, aguas arriba, y aguas abajo de la recarga artificial

Sector		Sector Aguas Arriba de la Recarga Artificial						Sector de la Recarga Artificial			Sector aguas abajo de la recarga artificial					
Pozos		PCH-23, PCH-26, PCH, 27, PCAR-11			PCH-2, PCH-12, PCH-13, PCH-19, PCH-20, PCH-24, PCH-25			PCH-14, PCH-18, PCH-16B			PCAR-1, P-7, P-8			PCAR-9, P-10, AR-1569, PC-2B, POBS-01P		
Tipo de aguas		Aguas Naturales aguas arriba RT			Aguas de proceso subterráneas			Zona de mezcla Proximal			Zona de mezcla Distal			Aguas Naturales aguas abajo		
Parámetro		mín.	P75	máx.	mín.	P75	máx.	mín.	P75	máx.	mín.	P75	máx.	mín.	P75	máx.
Aluminio	Al Tot mg/l	0,01	1,80	6,30	0,01	1,09	2,63	0,01	0,81	3,00	0,20	1,30	3,50	0,01	0,81	2,05
Arsénico	As Tot mg/l	0,00	0,05	0,12	0,00	0,12	0,29	0,00	0,16	0,36	0,02	0,05	0,13	0,01	0,06	0,14
Boro	B Tot mg/l	0,16	7,10	11,40	0,01	23,70	92,00	1,00	14,20	22,81	0,44	5,21	7,80	0,24	6,71	13,00
Cadmio	Cd Tot mg/l	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01
Cianuro	CN- mg/l	0,02	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05	0,02	0,05	0,05	-	-	-	-	-	-
Cobre	Cu Tot mg/l	0,01	0,14	0,36	0,01	0,16	0,43	0,01	0,10	0,20	0,01	0,22	0,49	0,01	0,19	0,37
Cromo Total	Cr Tot mg/l	0,01	0,02	0,04	0,01	0,03	0,07	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,10	0,01	0,08	0,16
Fluoruro	F- mg/l	0,05	1,14	2,04	0,01	1,10	2,56	0,10	1,58	2,40	0,05	0,55	0,92	0,05	0,70	1,21
Hierro	Fe Tot mg/l	0,00	1,88	7,36	0,00	1,56	4,00	0,01	3,88	11,51	0,30	1,85	4,69	0,01	1,10	2,56
Magnesio	Mg Tot mg/l	0,12	46,32	83,76	2,78	495,75	2154,54	0,05	19,51	50,80	0,34	47,47	78,08	5,28	22,06	32,25
Manganeso	Mn Tot mg/l	0,00	0,09	0,34	0,01	0,28	0,72	0,00	0,09	0,23	0,01	0,08	0,22	0,00	0,03	0,08
Mercurio	Hg Tot mg/l	0,00	0,00	0,01	0,00	0,03	0,07	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01
Molibdeno	Mo Tot mg/l	0,01	0,17	0,27	0,06	0,13	0,17	0,01	0,17	0,30	0,10	0,10	0,30	0,01	0,12	0,34
Niquel	Ni Tot mg/l	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02	0,05	0,01	0,01	0,02	0,10	0,10	0,10	0,01	0,10	0,20
Nitrato	NO3 mg/l	0,20	70,27	157,00	0,01	4285,00	17200,00	0,01	85,09	244,00	0,60	253,57	469,53	0,40	17,00	46,30
Plomo	Pb Tot mg/l	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,63	1,28	0,01	0,49	0,83
Selenio	Se Tot mg/l	0,00	0,02	0,06	0,00	0,79	2,02	0,00	0,01	0,02	0,02	0,04	0,10	0,02	0,13	0,40
Sulfuros	S- mg/l	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	1,00	1,00	1,00	0,50	0,50	0,50
Zinc	Zn Tot mg/l	0,00	0,11	0,22	0,00	0,18	0,45	0,00	0,11	0,20	0,08	0,17	0,38	0,00	0,12	0,25
Coliformes fecales	Col Fec NMP/100ml	4,00	20,00	23,00	2,00	14,00	110,00	2,00	23,00	49,00	0,06	16,00	23,00	2,00	9,13	23,00
Conductividad Eléctrica	CE uS/cm	1418,00	2570,00	3251,02	8,00	52112,75	123076,00	936,00	2611,75	4924,00	1045,00	3310,00	4726,68	1207,00	2133,58	2752,20
pH	-	7,00	8,00	8,60	6,10	7,80	8,40	7,00	8,70	9,79	6,80	7,80	8,40	6,90	7,90	8,50
Bicarbonato	HCO3 mg/l	6,00	61,00	110,00	3,15	266,00	652,80	0,40	119,75	219,30	6,00	71,00	126,00	7,00	146,00	357,00
Calcio	Ca Tot mg/l	35,84	280,00	428,00	24,80	685,50	1803,00	17,12	102,00	257,00	14,43	385,84	620,00	44,11	184,00	256,00
Carbonatos	CO3 mg/l	2,80	5,00	6,00	5,00	5,00	5,00	1,00	31,20	56,40	-	-	-	5,00	6,00	9,00
Cloruros	Cl- mg/l	8,60	159,70	256,50	64,50	9536,11	31647,00	18,30	151,68	474,00	19,40	593,40	1129,20	194,00	496,00	631,00
Potasio	K Tot mg/l	0,10	12,09	23,43	0,71	79,12	205,79	0,10	10,95	19,26	3,48	13,67	20,80	4,80	11,00	15,20
Sodio	Na Tot mg/l	120,17	321,09	442,00	12,00	8047,30	22260,00	184,00	473,44	807,00	48,00	250,66	392,00	25,60	249,96	389,74
Sulfatos	SO4 mg/l	306,00	1174,00	1625,00	81,90	3043,10	6901,18	293,00	956,30	1478,00	89,00	806,30	1361,00	14,80	246,10	422,00
Solidos Disueltos Totales	SDT mg/l	696,00	2072,00	2696,00	985,00	35453,50	99960,00	804,00	1900,00	3680,00	628,00	2445,00	3632,00	665,00	1415,00	1848,00

Fuente: Elaboración propia.

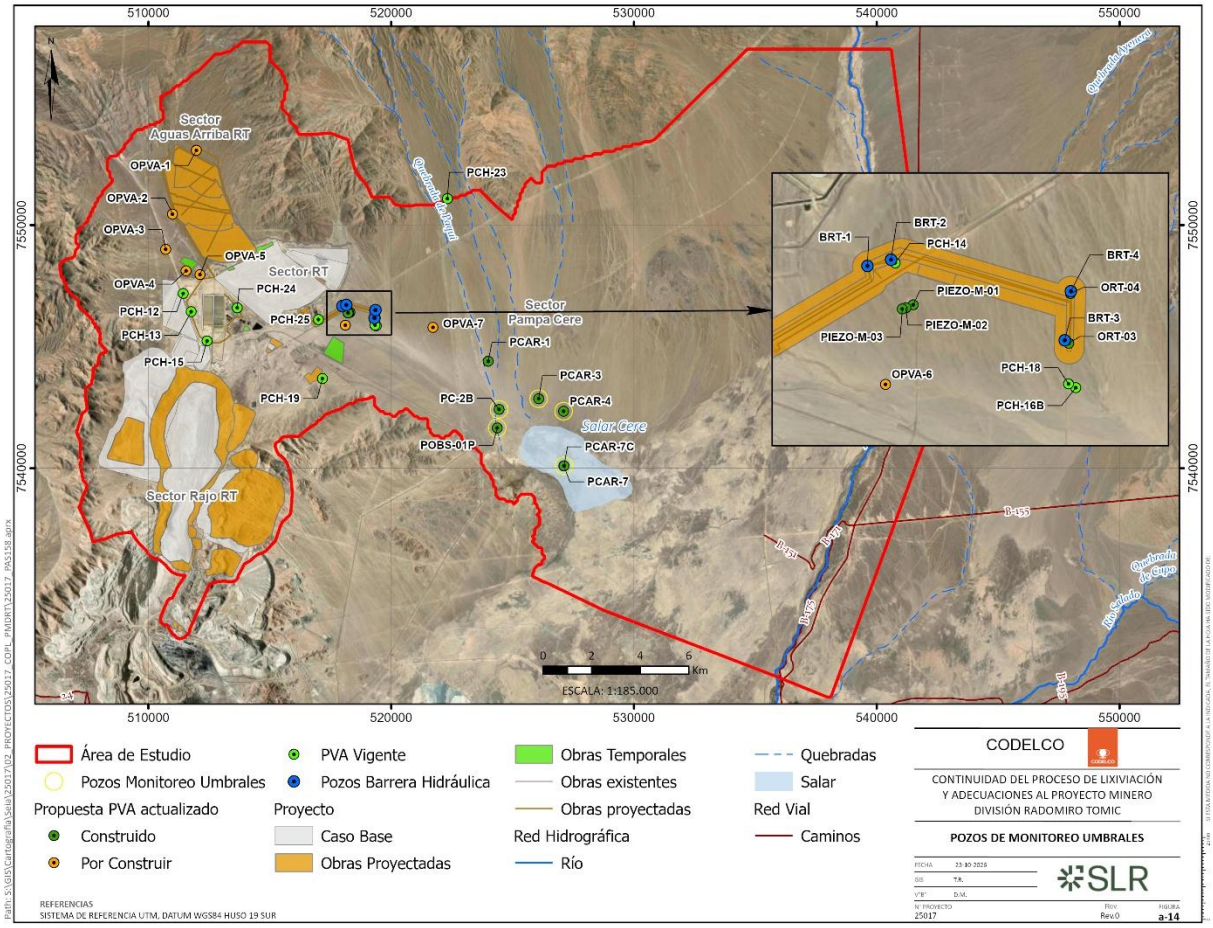
2.3.2 En cuanto a la extensión espacial de la caracterización de las aguas del acuífero, se requiere mediciones aguas arriba y aguas abajo de la ubicación proyectada para la obra de recarga artificial, ello visto en el sentido de la dirección de flujo del acuífero.

Respecto a la extensión espacial de la caracterización de las aguas del acuífero se señala que en el punto anterior (2.3.1) se abordó la caracterización de la calidad química de las aguas en todo el acuífero UH-5, tanto en el sector de la recarga artificial, como aguas arriba y aguas abajo de esta.

Luego, acerca de las mediciones requeridas aguas arriba y aguas abajo de la ubicación proyectada de la obra de la recarga artificial, es decir, la barrera hidráulica, se presenta en la Figura 14 la ubicación de los puntos de monitoreo que se contemplan, los cuales son parte del Plan de Vigilancia Ambiental (PVA), para el seguimiento de las variables de calidad y cantidad de aguas subterráneas. El Plan de Vigilancia Ambiental (PVA) de la División Radomiro Tomic (DRT) responde a los compromisos de seguimiento presentados en la Resolución de Calificación Ambiental N°132/2012 del proyecto “Ampliación Lixiviación Secundaria de Ripios”, e incluye los puntos de monitoreo comprometidos en las Resoluciones de Calificación Ambiental de proyectos previos al mencionado. Estos puntos de monitoreo consideran la trayectoria del flujo subterráneo regional, el cual presenta una orientación predominante noroeste-sureste, desde el Sector Industrial RT hacia Pampa Cere y el sector del Salar de Cere. El listado de estos pozos de monitoreo se presenta en la Tabla 8.

Luego, la red de puntos de monitoreo considerada permitirá dar un seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas en el sector de recarga artificial y en sectores ubicados aguas arriba y aguas abajo, en la trayectoria del flujo subterráneo regional. Esta caracterización entregará una base comparativa para evaluar el comportamiento esperado de la recarga artificial y su relación con el acuífero receptor.

Figura 14. Pozos de Monitoreo del PVA



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Detalle pozos de monitoreo PVA

Pozo	Ubicación	Coordenada Este	Coordenada Norte	Estado	Prof. (m)	Habilitación	UH
PCH-12	Sector RT	511.435	7.547.189	Actual	200	-	-
PCH-13	Sector RT	511.762	7.546.441	Actual	-	-	-
PCH-14	Pampa Cere	518.180	7.546.692	Actual	269	107-266(*)	UH-5
PCH-15	Sector RT	512.416	7.545.237	Actual	200	41-195(*)	UH-5
PCH-16B	Pampa Cere	519.386	7.545.860	Actual	235	141-231(*)	UH-5
PCH-18	Pampa Cere	519.337	7.545.885	Actual	230	119-220(*)	UH-5
PCH-19	Pampa Cere	517.168	7.543.688	Actual	240	133-234(*)	UH-6a
PCH-23	Aguas Arriba RT	522.316	7.551.087	Actual	192	124-184(*)	UH-5
PCH-24	Sector RT	513.660	7.546.598	Actual	228	166-220	UH-5
PCH-25	Pampa Cere	517.006	7.546.115	Actual	237	178-232(*)	UH-5
OPVA-1	Aguas Arriba RT	511.976	7.553.078	Nuevos	200	120-200	UH-5
OPVA-2	Aguas Arriba RT	510.993	7.550.451	Nuevos	200	90-200	UH-5
OPVA-3	Aguas Arriba RT	510.714	7.549.004	Nuevos	200	120-200	UH-5
OPVA-4	Aguas Arriba RT	511.553	7.548.120	Nuevos	200	80-200	UH-5
OPVA-5	Aguas Arriba RT	512.127	7.547.963	Nuevos	200	80-200	UH-5
OPVA-6	Pampa Cere	518.115	7.545.882	Nuevos	450	170-Por definir	UH-5
OPVA-7	Pampa Cere	521.720	7.545.792	Nuevos	450	85-Por definir	UH-5
PIEZO-M-01	Pampa Cere	518.300	7.546.413	Nuevos	230	182-230	UH-5
PIEZO-M-02	Pampa Cere	518.251	7.546.393	Nuevos	182	172-182	UH-5
PIEZO-M-03	Pampa Cere	518.227	7.546.385	Nuevos	172	158-170	UH-5
ORT-03	Pampa Cere	519.339	7.546.156	Nuevos	250	134-248	UH-5
ORT-04	Pampa Cere	519.351	7.546.488	Nuevos	200	140-200	UH-5
PCAR-1	Pampa Cere	523.995	7.544.399	Nuevos	333	45-303(*)	UH-5
PC-2B	Pampa Cere	524.445	7.542.418	Nuevos	207	48,5-201(*)	UH-5
PCAR-4	Pampa Cere	527.103	7.542.343	Nuevos	138	42-132(*)	UH-5
PCAR-7	Pampa Cere	527.110	7.540.094	Nuevos	100,5	35-98	UH-5
PCAR-7C	Pampa Cere	527.121	7.540.098	Nuevos	7,5	1,5-7,5	UH-2
PCAR-3	Pampa Cere	526.074	7.542.858	Nuevos	228	50-215(*)	UH-5
POBS-01P	Pampa Cere	524.370	7.541.656	Nuevos	155	48,5-201(*)	UH-5

Nota: (*) Tramo habilitado no continuo, intercalaciones entre PVC ranurado y ciego.

Fuente: Extraído desde Apéndice A – PVA de este documento.

2.3.3 Describir el comportamiento esperado de las propiedades químicas, físicas y biológicas de las aguas del acuífero producto de la ejecución proyectada de la recarga artificial en las distintas etapas del proyecto.

En este apartado se presenta el comportamiento esperado de las aguas del acuífero principal UH-5 producto de la operación proyectada de la Barrera Hidráulica (BH), considerando los resultados de las simulaciones predictivas desarrolladas en el Anexo 25 del EIA. Dichas simulaciones permiten evaluar la evolución esperada de los niveles piezométricos y de las concentraciones de sulfatos en el acuífero, tanto en condición sin operación de la BH como bajo el escenario de operación de la medida.

El análisis se centra en la evolución de sulfatos, por cuanto este parámetro constituye el principal indicador de seguimiento de la pluma histórica identificada en el Sector Industrial RT y Pampa Cere. Asimismo, se considera el efecto hidráulico de la operación de los pozos de bombeo e inyección que conforman la BH, los cuales permiten controlar el avance potencial de la pluma hacia sectores aguas abajo.

Para efectos de la evaluación predictiva, se consideraron tres escenarios de simulación, los cuales se presentan en la Tabla 9. Estos escenarios permiten comparar la condición base, la condición con Proyecto y la condición con Proyecto más operación de la BH. Cada escenario predictivo tiene un periodo de duración desde el año 2025 hasta el año 2158, cuya discretización temporal se detalla en la Tabla 10.

Tabla 9. Escenarios predictivos

Escenarios	Descripción	Operación Rajo RT	
Sim 1	**Caso Base (CB):** Proyecto aprobado según RCA 121/2021.	Hasta 2030	Flujo constante de 3,5 L/s con concentración de 14.400 mg/L operando hasta 2030.
Sim 2	**Caso proyecto (CP):** Proyecto en evaluación. Sin barrera hidráulica.	Hasta 2058	Flujo constante de 3,5 L/s con concentración de 14.400 mg/L operando hasta 2030. Nuevos Botaderos no infiltran debido a revestimiento impermeable.
Sim 5	**CP + Operación Barrera hidráulica**: concentración objetivo de 500 mg/L. Considera bombeo/ reinyección hasta disminuir concentración de SO4 a 500 mg/L en pozo PCAR-1	Hasta 2058	

Fuente: Anexo 25 Modelo Hidrogeológico Numérico Barrera hidráulica.

Tabla 10. Discretización temporal de los escenarios predictivos

Años	Actividad del Proyecto	Duración períodos de estrés
2025–2058	Construcción y Operación	Mensual
2059–2060	Cierre	Semestral
2061–2078	Cierre y Post Cierre	Anual
2079–2158	Cierre y Post Cierre	Cada 5 años

Fuente: Anexo 25 Modelo Hidrogeológico Numérico.

A continuación, se describen las principales consideraciones de cada escenario predictivo utilizado para evaluar el comportamiento esperado del acuífero:

Sim 1: Corresponde al Caso Base. Considera que las recargas antrópicas se mantienen igual que en el último periodo de calibración (septiembre de 2025), tanto para caudales como para concentraciones de sulfato.

El caudal total recargado por las instalaciones es de 3,5 L/s con una concentración de 14.400 mg/L. Este valor es constante desde octubre del 2025 hasta diciembre 2030. A partir de esa fecha, se asume la detención del riego e infiltración antrópica, con una caída gradual estimada en un periodo de 2 años hasta llegar a 0, calculado como la desaturación y drenaje. Tal como se mencionó anteriormente, la recarga meteórica en el periodo predictivo se mantuvo constante y corresponde al promedio histórico de los últimos 5 años de calibración (enero 2020 a septiembre 2025). El rajo RT por su parte mantiene su excavación y operación hasta el año 2030.

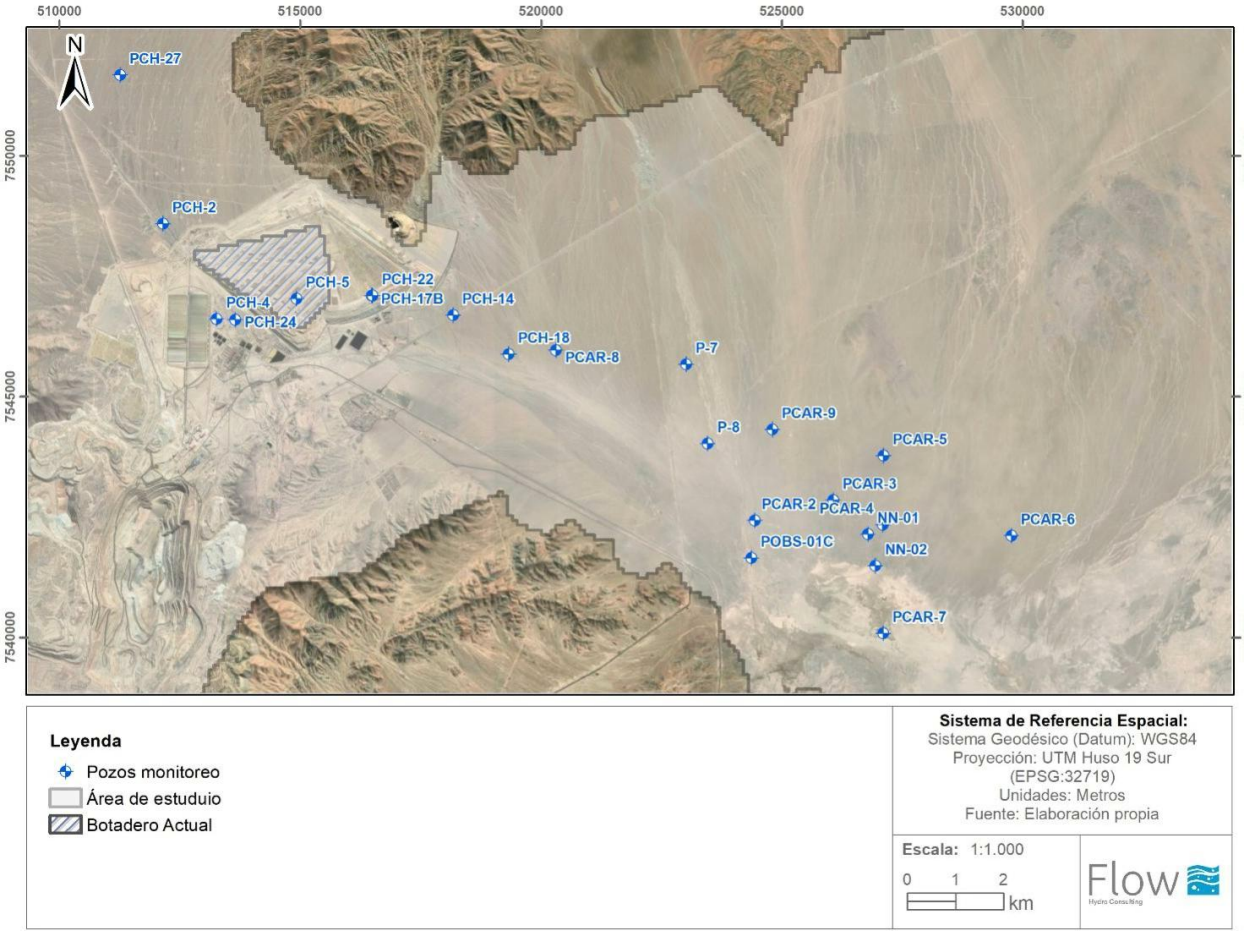
Sim 2: Corresponde al Caso Proyecto. Considera las mismas recargas antrópicas que el Caso Base hasta el 2030, y disminución paulatina de la infiltración en la zona de botadero, equivalente al Caso Base. Posterior a 2030, se inicia la lixiviación en la nueva ubicación declarada en el EIA, al noroeste de botadero actual, infraestructura para la que por diseño de ingeniería se asume no habrá infiltraciones al acuífero ya que considera una base impermeabilizada. El rajo RT por su parte mantiene su excavación y operación hasta el año 2058.

Sim 5: Toma de base la Sim 2 y le agrega una barrera hidráulica de 4 pozos, dos como pozos de extracción (BRT1 y BRT2), con caudal de 15 L/s cada uno, y dos como pozos de reinyección (BRT3 y BRT4), con caudal de 15 L/s cada uno y concentración de 200 mg/L. El funcionamiento de la barrera hidráulica es de forma continua, desde junio de 2026 hasta disminuir la concentración de sulfato en el pozo PCAR-1 en torno a 500 mg/L (año 2042). Luego de eso se evalúa la atenuación natural a largo plazo, 100 años posterior al cese de operación de la Barrera (2142).

El escenario Sim 5 corresponde al escenario de mayor interés para este análisis, ya que representa el comportamiento esperado del acuífero bajo la operación de la BH.

A partir de los resultados de las simulaciones predictivas, se evaluó la evolución temporal de los niveles y las concentraciones de sulfatos en los pozos de monitoreo (Figura 15) y la distribución espacial de la pluma en el acuífero principal.

Figura 15. Ubicación de los pozos de observación del Modelo Numérico



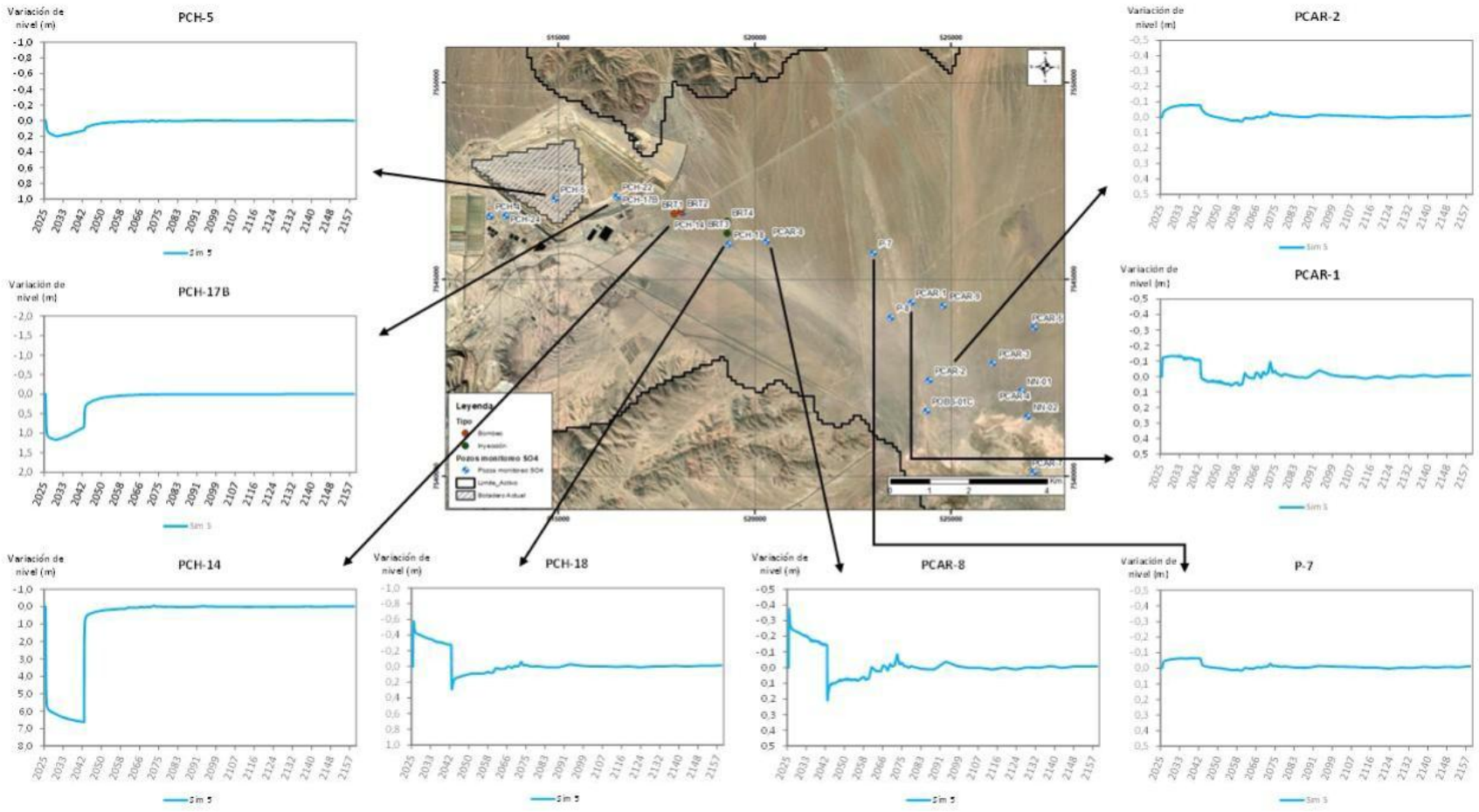
Fuente: Anexo 25 Modelo Numérico. Código de documento: FLOW-COD006-REP-HDG-007R2.

2.3.3.1 Niveles

La Figura 16 muestra los descensos simulados por pozo de observación en el escenario SIM 5 respecto al caso base. Los pozos en las instalaciones o alrededor de estas, como el PCH-5, presentan descensos menores a 0,2 m producto de la operación de la Barrera. Por su parte, aguas abajo los pozos de monitoreo más cercanos al bombeo (PCH-17B y PCH-14) evidencian un descenso durante el funcionamiento de la barrera hidráulica, siendo más pronunciado en el PCH-14, situado a 40 m de los pozos de bombeo, mostrando descensos de hasta 6,5 m.

Por otro lado, los pozos de monitoreo más próximos a los de reinyección muestran leves ascensos de nivel debido al aporte de agua al acuífero, que van desde los 0,3 m en el PCH-18 (a 290 m de distancia de la reinyección), y hasta 0,1 m en el pozo PCAR-2 aguas arriba del Salar de Cere (a 6 km de distancia del punto de reinyección).

Figura 16. Descensos simulados en pozos por escenarios, Sim 5 respecto a simulación Caso Base (Sim 1)



Fuente: Anexo 25 Modelo Numérico. Código de documento: FLOW-COD006-REP-HDG-007R2.

2.3.3.2 Concentraciones de sulfato (SO_4)

La Figura 17 y Figura 18 muestran la evolución temporal de las concentraciones de SO4 en los escenarios predictivos en distintos pozos y la Figura 19 indica la distribución espacial de la pluma de sulfato. Comparando los Casos Base y Proyecto con aquel en que se opera la barrera hidráulica, se puede comentar lo siguiente:

- Aguas arriba del botadero (p.e. PCH-24) no se observan cambios en las concentraciones entre escenarios, ni en la Sims 1 (CB) y Sim 2 (CP). Tampoco en la Sim 5, en donde se incorpora el funcionamiento de la barrera hidráulica.
- La operación de la barrera hidráulica (Sim 5) no genera efectos en los pozos ubicados aguas arriba del botadero (p.e. PCH-5), pero sí consigue atenuar la pluma de sulfato desde el pozo PCH-14, próximo a los pozos de bombeo de la barrera hidráulica, hacia aguas abajo, hasta el punto de máximo avance natural a 2025, cercano a PCAR-1.
- Producto del funcionamiento de la barrera hidráulica la concentración de sulfato disminuye en la mayor parte de los pozos situados aguas abajo de la Barrera, desde el PCH-14 y hasta PCAR-1. El tiempo que tarda en comenzar a disminuir la concentración está relacionado con la distancia a la que se sitúan los puntos de observación de la barrera hidráulica (BH): en el pozo PCH-14 (a ~40 m) la atenuación comienza a días de iniciar su operación la Barrera, en el punto PCH-18 (a ~1,5 km) la atenuación comienza tras ~2 meses de operación y en el punto PCAR-1 (a ~6,3 km) la atenuación comienza tras 5 años de bombeo e inyección, en 2031 (Tabla 11).

Tabla 11. Tiempo de respuesta de pozos ante barrera hidráulica

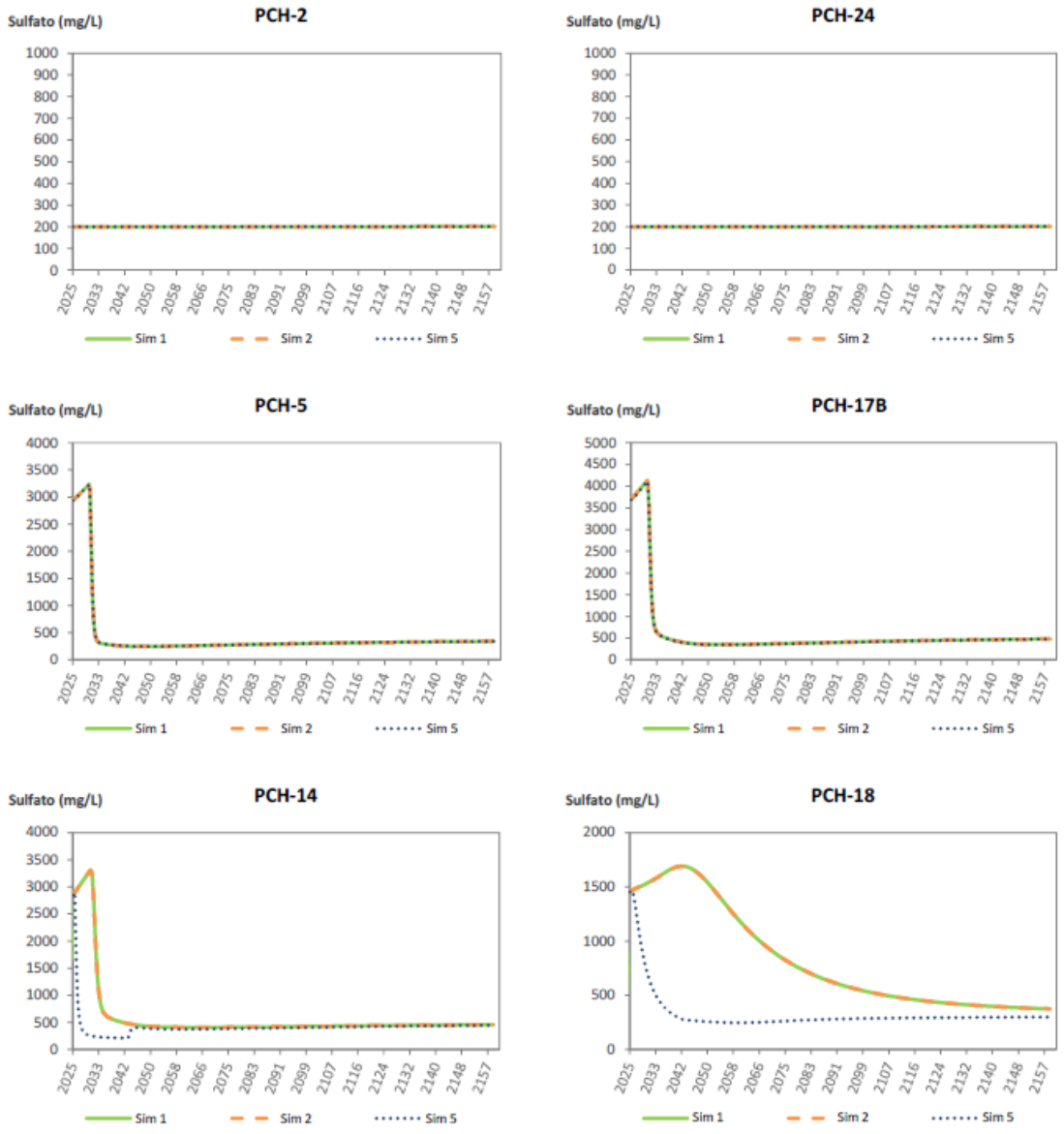
Pozo	Distancia a la barrera (km)	Tiempo de inicio de respuesta	Concentración final (2158) (mg/L)
PCH-14	~0,04	mismo mes	450
PCH-18	~1,5	2 meses	300
PCAR-8	~2,3	6 meses	310
PCAR-1	~6,3	5 años	270

Fuente: Anexo 25 Modelo Numérico.

- Espacialmente puede verse que tras 16 años de operación de la BH (2026 -2042) se consigue atenuar la concentración de sulfato por debajo de 500 mg/L en el pozo PCAR-1. En el resto de los pozos situados entre la BH y el pozo PCAR-1 la atenuación es más marcada, debido a la menor distancia. Al año 2158, tras el fin del Post Cierre y por efectos de la atenuación natural del medio, se espera una reducción del alcance espacial de la pluma hasta el pozo PCAR-8, manteniendo las concentraciones en la totalidad del área bajo los 500 mg/L.
- Posterior a la operación de la barrera hidráulica, se observan leves aumentos de concentración en el tiempo para los pozos aguas abajo del botadero (PCH-14, PCH-18, PCAR-8, PCAR-1), que responden a una redistribución de la pluma residual desde el que fue su origen. Estos aumentos graduales, no obstante, llevan a concentraciones de sulfato por debajo de 300 mg/L en el pozo PCAR-1 al año 2071.
- Los efectos de dilución y particularmente los de redistribución de la pluma obedecen a la transferencia de masa entre el acuífero principal y el estrato subyacente de roca fracturada de baja permeabilidad, cercano al botadero.

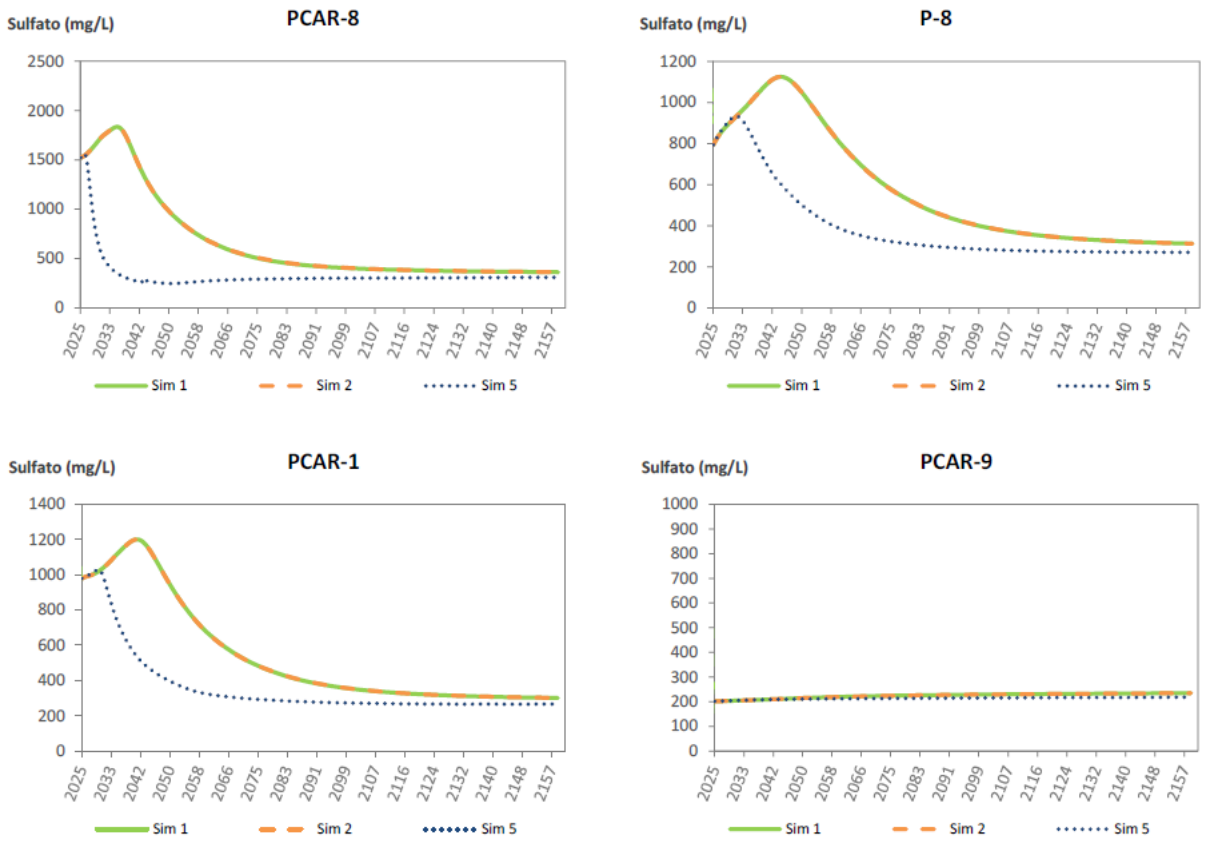
- Aguas arriba de la barrera hidráulica podrían observarse concentraciones en el rango de 500 – 1000 mg/L transcurridos 100 años post funcionamiento de la barrera hidráulica, cuyas concentraciones se encuentran relacionadas directamente con la masa acumulada en el largo plazo, en estratos inferiores (y menos permeables), bajo el botadero.

Figura 17. Concentración SO4 simulada en pozos para los escenarios predictivos (1 de 2)



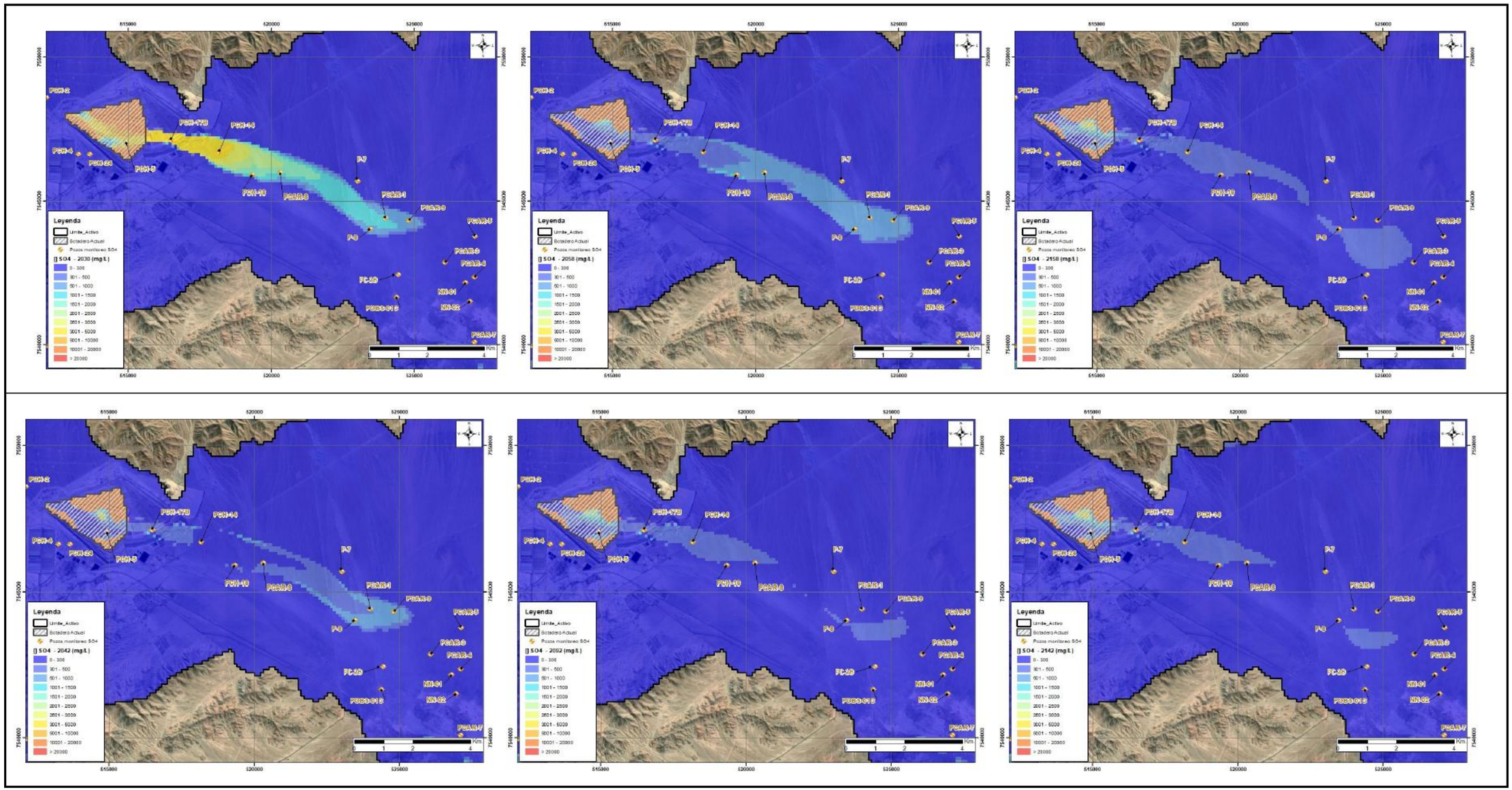
Fuente: Anexo 25 Modelo Hidrogeológico Numérico Barrera hidráulica.

Figura 18. Concentración SO4 simulada en pozos para los escenarios predictivos (2 de 2)



Fuente: Anexo 25 Modelo Hidrogeológico Numérico Barrera Hidráulica.

Figura 19. Pluma de concentración de SO4 Sim 2 en año 2030, 2058 y 2158 (arriba) vs Sim 5 (abajo) en año 2042, 2092 y 2142



Fuente: Anexo 25 Modelo Hidrogeológico Numérico Barrera Hidráulica.

En términos generales, los resultados de la modelación indican que la operación de la BH permite atenuar la pluma de sulfatos en el acuífero principal UH-5, reduciendo las concentraciones en los sectores ubicados aguas abajo de la zona de bombeo e inyección. En particular, el escenario con operación de la BH muestra una disminución de las concentraciones de sulfatos respecto del escenario sin operación de la medida (CP), manteniendo las concentraciones simuladas bajo los umbrales definidos para los puntos de observación considerados.

Desde el punto de vista físico, la operación de la BH genera una modificación controlada del régimen hidráulico local, asociada al bombeo desde los pozos BRT-1 y BRT-2 y a la reinyección mediante los pozos BRT-3 y BRT-4. Este comportamiento permite influir en la dirección y velocidad de desplazamiento de la pluma, favoreciendo su contención y atenuación.

Desde el punto de vista químico, el agua destinada a la recarga artificial deberá cumplir con los criterios de calidad definidos en la Tabla 5 del presente Anexo. Por lo tanto, la operación de la recarga artificial no considera la incorporación de aguas con calidad inferior a los valores máximos establecidos para la infiltración, lo que permite resguardar la compatibilidad hidroquímica con el acuífero receptor.

En consecuencia, el comportamiento esperado de las aguas del acuífero producto de la operación de la recarga artificial corresponde a una condición de control y atenuación de la pluma histórica de sulfatos, sin generación de alteraciones adversas adicionales sobre la calidad basal del acuífero principal UH-5.

2.4 Descripción y características geológicas e hidrogeológicas del sector de recarga

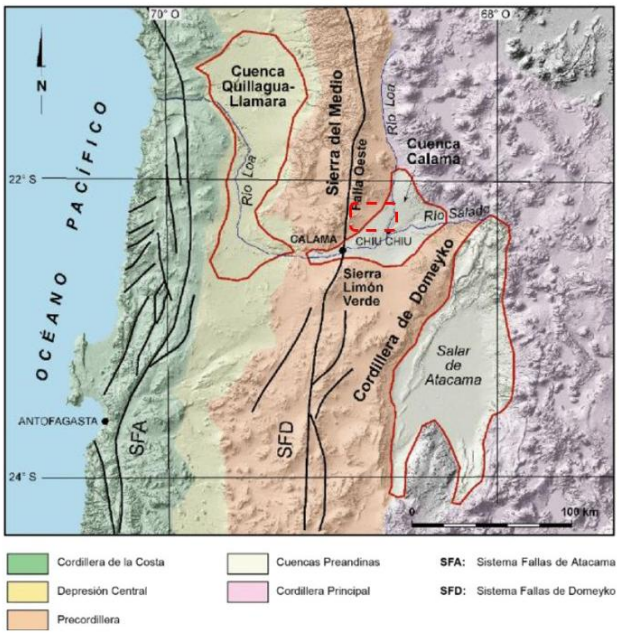
El Modelo Conceptual presentado en el Anexo 13 de esta adenda, contiene un estudio acabado de la geología e hidrogeología del área de estudio. La descripción geológica e hidrogeológica que aquí se presenta constituye un extracto de dicho Anexo, el cual hace énfasis en el sector de la recarga artificial.

2.4.1 Geología:

2.4.1.1 Marco geomorfológico

El área de estudio se encuentra contenida entre dos unidades morfoestructurales, la Cordillera de Domeyko o Precordillera y la Cordillera Principal (Figura 20). Esta región está formada por sierras que alcanzan 4.500 msnm y zonas llanas de altitud media de 2.800 msnm (Pallauta, 1982 en Aguilar, J. 2008).

Figura 20. Contexto morfoestructural de la cuenca de Calama



Fuente: Modificado de Blanco y Tomlinson (2008)

2.4.1.2 Geología

El área de estudio se emplaza dentro de la cuenca de Calama, caracterizada por albergar depósitos sedimentarios semi-consolidados a no-consolidados del Cenozoico. Se describen además afloramientos de rocas volcanosedimentarias e intrusivas de edad Carbonífero Superior a Triásico, que han sido parcialmente intruidas por cuerpos magmáticos del Terciario Inferior.

Al noroeste del área de estudio se hallan unidades basales de tipo ígneo, mientras que al sureste se describen secuencias principalmente volcanosedimentarias estratificadas, sobre las que se han depositados unidades aluviales y carbonáticas-evaporíticas más recientes. La actividad tectónica del área de estudio se ha organizado en distintas fases de deformación que ocurrieron a partir del Eoceno, directamente relacionadas al sistema estructural de la Falla Oeste.

A continuación, se describen las principales características litológicas de las unidades reconocidas en el área de influencia de la recarga artificial, y se presenta el mapa geológico y estructural del área de estudio (Figura 21), además de un perfil geológico representativo del área de estudio de la geología, indicando en la figura el área de recarga artificial (Figura 22).

Las unidades geológicas reconocidas en el sector de la recarga son:

- Depósitos no consolidados y de baja consolidación recientes (Plioceno – Cuaternario)

Depósitos aluviales antiguos (PHa). Cubren la mayor parte de la Pampa Cere y están compuestos principalmente por gravas, ripios, arenas y limos polimícticos no-consolidados. Los depósitos aluviales antiguos (PHa) se relacionan con abanicos aluviales antiguos y paleocanales, y presentan una relación de truncamiento estratigráfico al subyacer a los depósitos aluviales activos.

Depósitos de piedemonte (Mpg). Se componen de gravas, ripios, arenas y limos de mala selección y de baja consolidación. En algunos sectores presentan además intercalaciones de cenizas. Los depósitos afloran principalmente en zonas topográficamente elevadas.

- Depósitos semi-consolidados y consolidados (Mioceno a Plioceno)

Grupo El Loa (Mioceno Inferior – Plioceno Superior)

Fm. Calama (Ec, Eoceno 52- ¿35? Ma). Corresponde a la formación de mayor relevancia hidrogeológica en el área de estudio, ya que sus depósitos alojan el acuífero principal (inferior) de la zona. Corresponden a conglomerados compuestos por gravas arenosas y arenas gravosas limosas con bloques con moderada consolidación y mala estratificación.

- Unidades rocosas (Paleógeno y Pre-Terciario)

Estratos de Cerros de Chuquicamata (Triásico Medio a Superior). Secuencia principalmente volcánica compuesta por lavas andesíticas y niveles de conglomerados y areniscas.

- Rocas Intrusivas

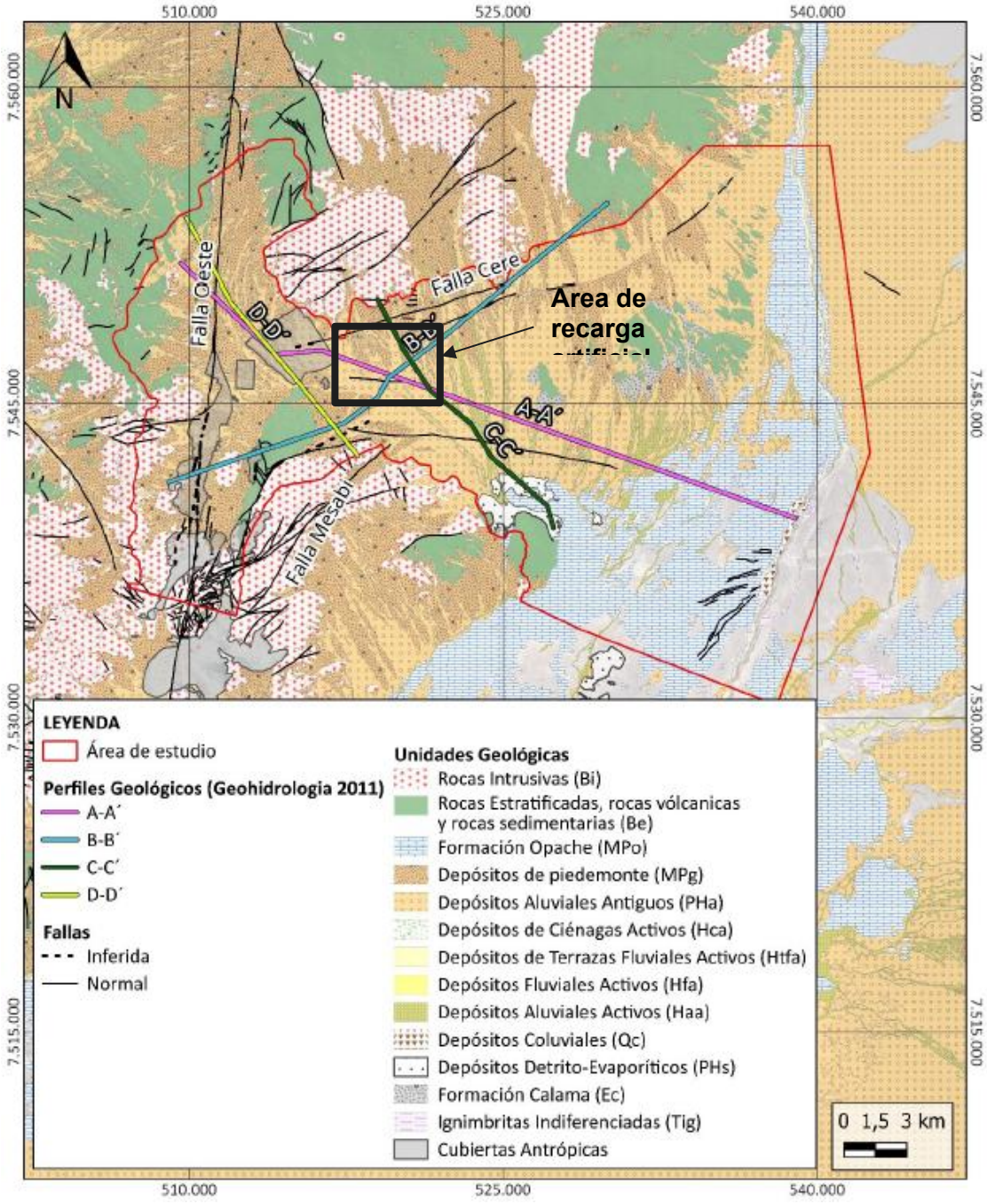
Granitoides del Triásico (Trg. Triásico). Este complejo describe unidades compuestas de granodiorita y granito que aflora al límite norte, y al sur en los Cerros de Chuquicamata.

El perfil geológico A-A’ (Figura 22) abarca desde las instalaciones industriales de DRT hasta el sur de la Pampa Cere. Este perfil muestra la extensión longitudinal de la quebrada, cuya porción inferior, en el sector de la recarga, estaría constituida por el basamento asociado a los estratos del Cerro Chuquicamata (conglomerados y andesitas), mientras que su relleno corresponde a la unidad de gravas polimícticas de la Fm. Calama y depósitos recientes, los cuales alcanzarían espesores superiores a 200 m.

En el sector del Botadero de Ripios y Pilas de Lixiviación (aguas arriba de la zona de recarga), el basamento corresponde a rocas graníticas del Triásico, sobre las que yacen depósitos sedimentarios semi-consolidados a no-consolidados. En Pampa Cere, las secuencias sedimentarias sobreyacen en discordancia sobre la unidad basal. Cabe señalar que bajo el sector de los botaderos se ha inferido la presencia de la Falla Cere, la cual pondría en contacto unidades intrusivas con rocas estratificadas de los estratos del Cerro Chuquicamata.

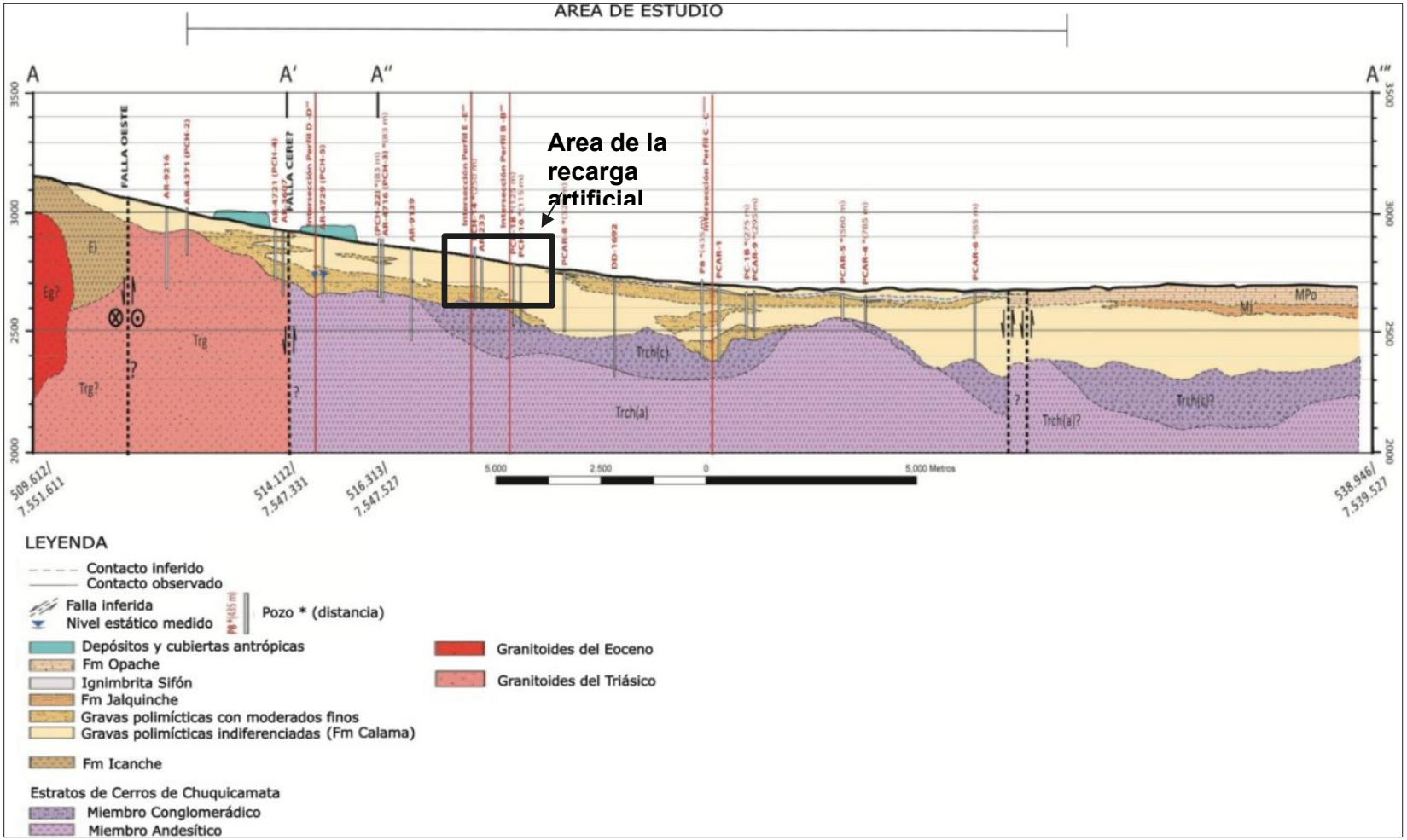
Estudios geofísicos, en Pampa Cere, lugar donde se ubica el sector de recarga artificial, identifican un nivel conductor a partir de los 50–70 m de profundidad (bajas resistividades), asociado a una unidad de arenas y limos saturados. Bajo este nivel se identificó una unidad subyacente de mediana resistividad, interpretada como arenas y gravas saturadas, correspondiente al acuífero principal del área. Al comparar la geofísica con la estratigrafía del pozo PCH-16B (Figura 23), se determinó que la unidad basal registrada en dicho sondaje (depósitos volcanosedimentarios a aproximadamente 230 m de profundidad) probablemente no constituye un basamento hidrogeológico impermeable, sino unidades de rocas consolidadas saturadas, como lo sugieren los bajos valores de resistividad obtenidos.

Figura 21. Mapa geológico-estructural del área de estudio.



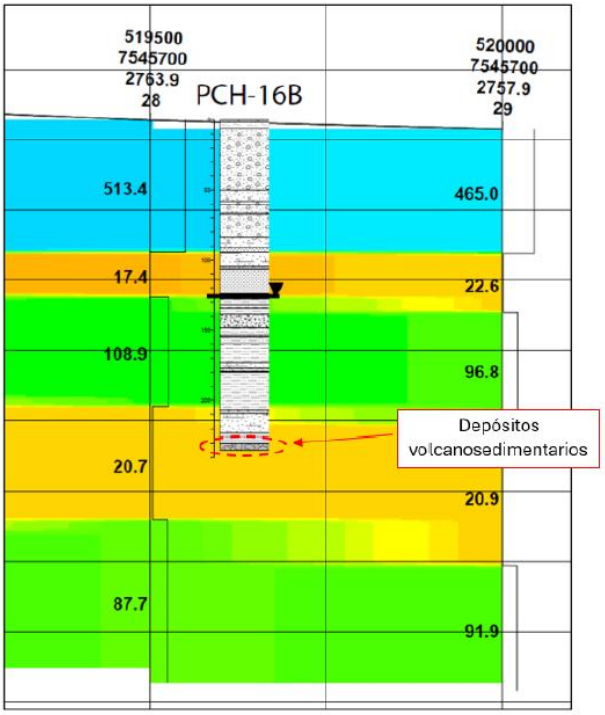
Fuente: Anexo 13 Actualización del Modelo Conceptual de la Adenda.

Figura 22. Perfil geológico A-A'



Fuente: Anexo 13 Actualización del Modelo Conceptual de la Adenda.

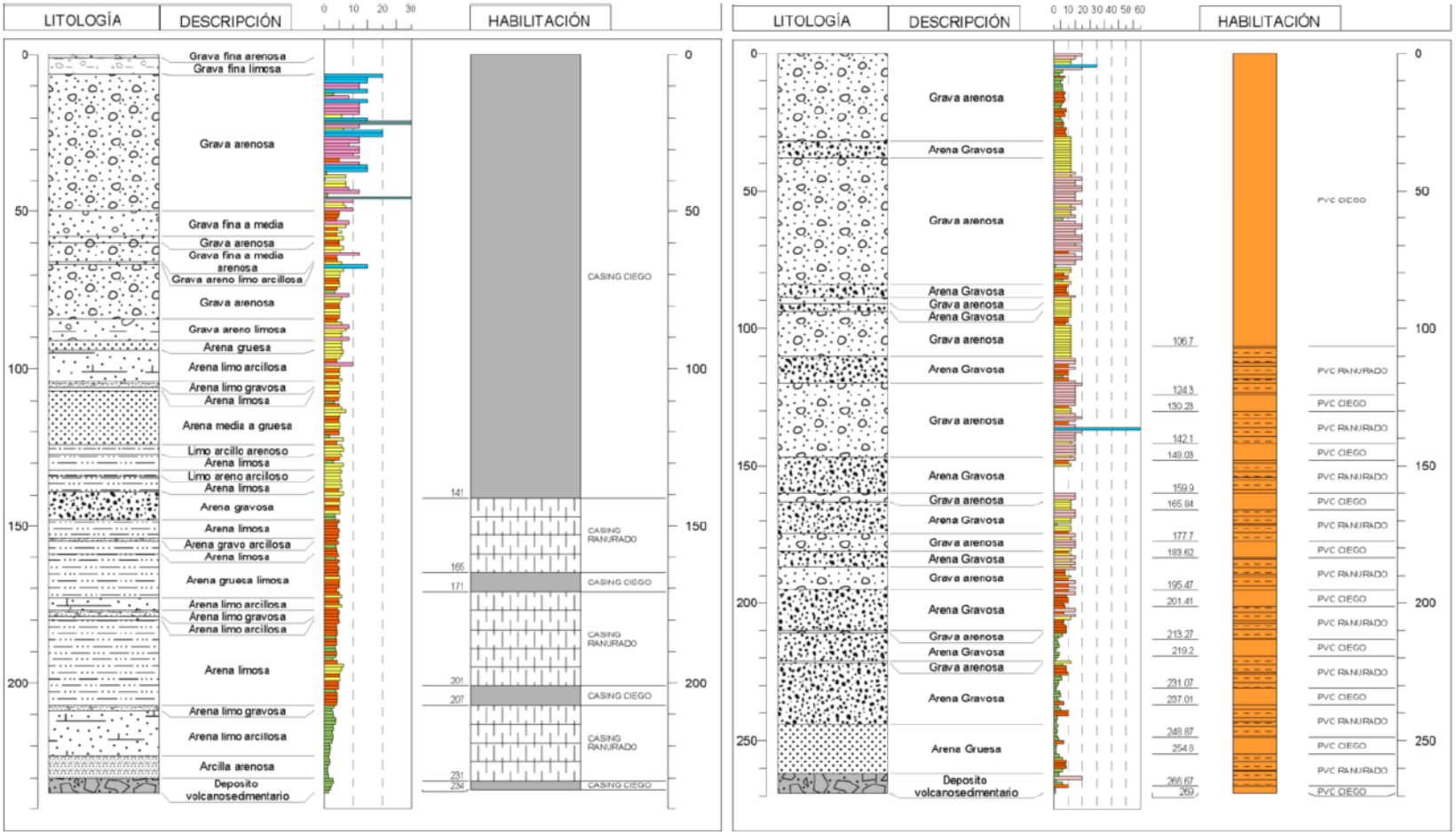
Figura 23. Comparación entre estratigrafía del pozo PCH-16B y perfil D-T-L4 (Geodatos, 2018)



Fuente: Anexo 13 Actualización del Modelo Conceptual de la Adenda, Geodatos (2018).

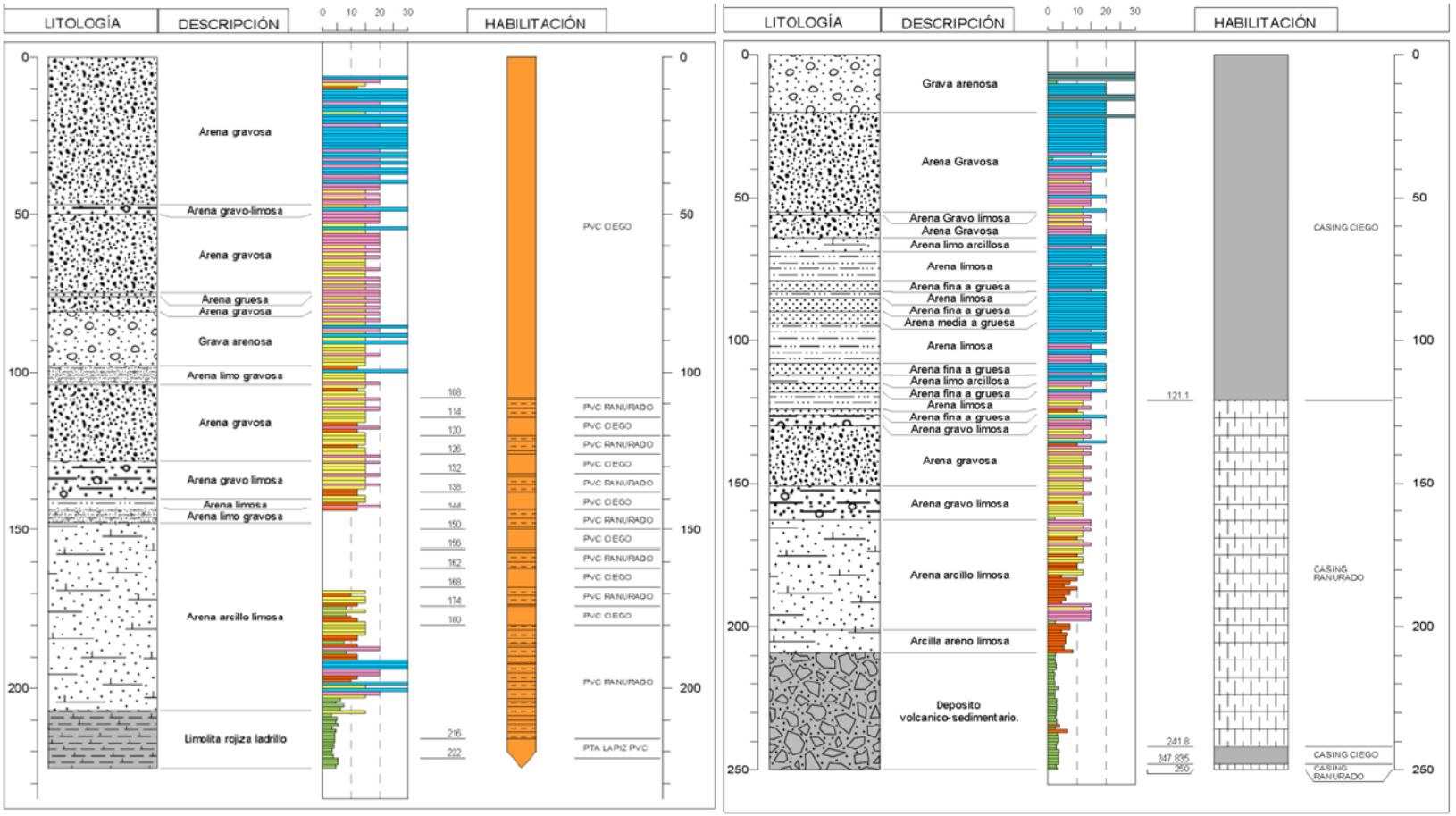
Por último, perforaciones asociadas al Plan de Vigilancia Ambiental de la División RT han permitido caracterizar la estratigrafía de las secuencias en profundidad. Pozos como PCH-14, PCH-17B, PCH-16B y PCH-22 evidencian una importante potencia sedimentaria desde el sector del Botadero de Ripios hacia el este (Pampa Cere), describiendo depósitos que varían desde arenas limo-arcillosas hasta gravas arenosas, con mayor o menor contenido de finos, incluso por debajo de los 150 m bajo superficie. En términos generales, el basamento en la zona se ubicaría a profundidades superiores a los 200 m y correspondería a depósitos volcano-sedimentarios. Las Figura 24 y Figura 25 ilustran, las columnas estratigráficas detalladas de algunos pozos asociados al PVA, emplazados inmediatamente aguas abajo de la zona de botaderos, y cercanos o en la zona de recarga artificial.

Figura 24. Columna estratigráfica PCH-14 (izquierda) y PCH-16B (derecha).



Fuente: Anexo 13 Actualización del Modelo Conceptual de la Adenda.

Figura 25. Columna estratigráfica PCH-17B (izquierda) y PCH-22 (derecha).



Fuente: Anexo 13 Actualización del Modelo Conceptual de la Adenda.

2.4.2 Hidrogeología:

2.4.2.1 Unidades Hidrogeológicas

Se identifican seis unidades hidrogeológicas en el área de estudio a partir de la integración de información geológica superficial y subsuperficial, incluyendo estratigrafía de pozos y resultados de ensayos geofísicos, junto con criterios hidrogeológicos derivados del análisis de niveles piezométricos y pruebas hidráulicas. Esta caracterización permitió definir dos unidades hidrogeológicas con comportamiento acuífero: el Acuífero Superior (ACS), correspondiente a la Unidad Hidrogeológica 2 (UH-2), y el Acuífero Inferior o Principal (ACI), asociado a la Unidad Hidrogeológica 5 (UH-5).

La UH-2 o Acuífero Superior presenta condiciones que varían desde freáticas semiconfinadas hasta libres, mientras que la UH-5 o Acuífero Inferior exhibe un comportamiento libre en los sectores de instalaciones RT y Pampa Cere, y confinado en el sector de Pampa Carbonatera. Ambos acuíferos se encuentran separados por dos unidades de tipo acuitardo (UH-3 y UH-4). Subyaciendo a la UH-5 se encuentra el basamento hidrogeológico (UH-6), constituido por rocas de diversa litología, que incluyen unidades volcanosedimentarias estratificadas y rocas ígneas intrusivas de edad preterciaria, afectadas por distintos grados de fracturamiento.

La Figura 26 muestra el mapa hidrogeológico de superficie del área de estudio, y se indica además el área de la recarga artificial. Se observa que el área de la recarga se sitúa sobre la unidad UH-1a correspondiente a depósitos detrito-evaporíticos del Plioceno a Cuaternario. Del perfil hidrogeológico de la Figura 27, se observa que, en el área de recarga, en profundidad, participan las unidades UH-5 acuífero inferior detrítico, y la UH-6a Basamento de permeabilidad media a baja. A continuación, se describen estas unidades hidrogeológicas:

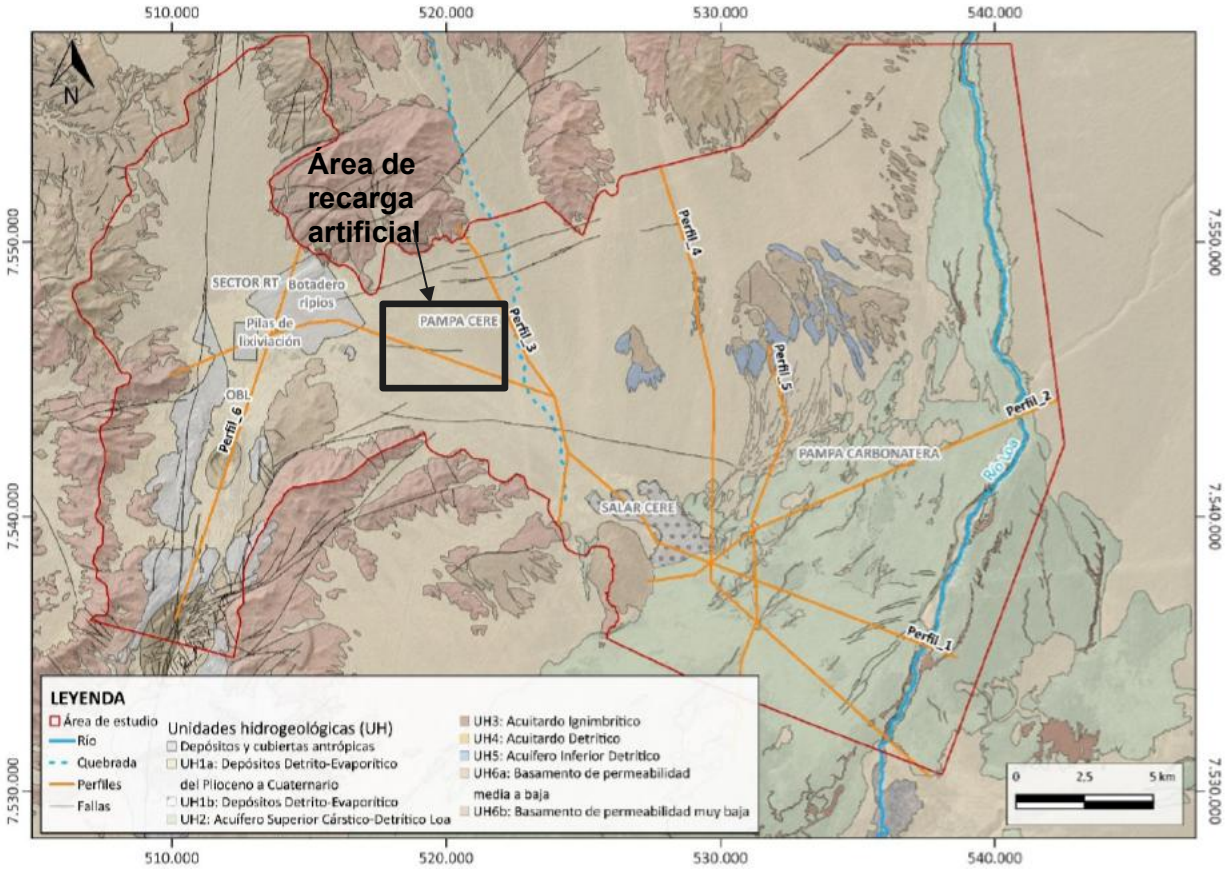
UH-1: Incluye todos los depósitos más recientes no-consolidados y de baja consolidación de origen detrito-evaporíticos de potencia total de entre 10-170 m. Entre estos depósitos se encuentran los depósitos aluviales recientes y antiguos que se ubican a lo largo de toda el área de estudio, sumándose además los sedimentos de piedemonte. La UH-1 se compone principalmente de gravas y arenas limosas. En la parte oeste de la zona de interés, esta unidad sobreyace directamente a los conglomerados y gravas de la Formación Calama (definida como UH-5, como se describirá más abajo). Aunque UH-1 se encontraría seca en la mayor parte del área de estudio, se puede encontrar saturada y comunicada hidráulicamente con UH-5. El análisis estratigráfico del pozo POBS-01 sugiere que, al sureste de la Pampa Cere, la base de UH-1 se define por la ocurrencia de tobas e ignimbritas (UH-3). Se caracterizan 2 subunidades, UH-1a constituida por depósitos detríticos de permeabilidad relativa media-alta y UH-1b formada por depósitos detrito-evaporíticos de menor permeabilidad.

UH-5: Corresponde al acuífero principal inferior constituido por conglomerados, gravas, y arenas gravosas con matriz limo-arenosa a arenosa asociada a depósitos de la Fm Calama. Se han observados potencias medias de en general 200 m, caracterizando espesores máximos puntuales de poco más de 300 m en algunos pozos como el P-7, P-8 y PCAR-1, ubicados en los sectores norte y centro de la Pampa Cere. Esta unidad se acuña hacia los límites norte, oeste y suroeste del área de estudio. El acuífero principal se encontraría confinado por acuitardos detríticos (UH-4) e ignimbrítico (UH-3) hacia la Pampa Carbonatera (como lo señala la surgencia del pozo TB-05), mientras que estaría en conexión hidráulica con la UH-1 en el sector oeste de la Pampa Cere (sector de la recarga), donde tendría un comportamiento libre. Aunque la UH-5

presente diversos niveles de matriz fina, no se considera una separación en subunidades ya que no constituyen horizontes continuos dentro del área de estudio.

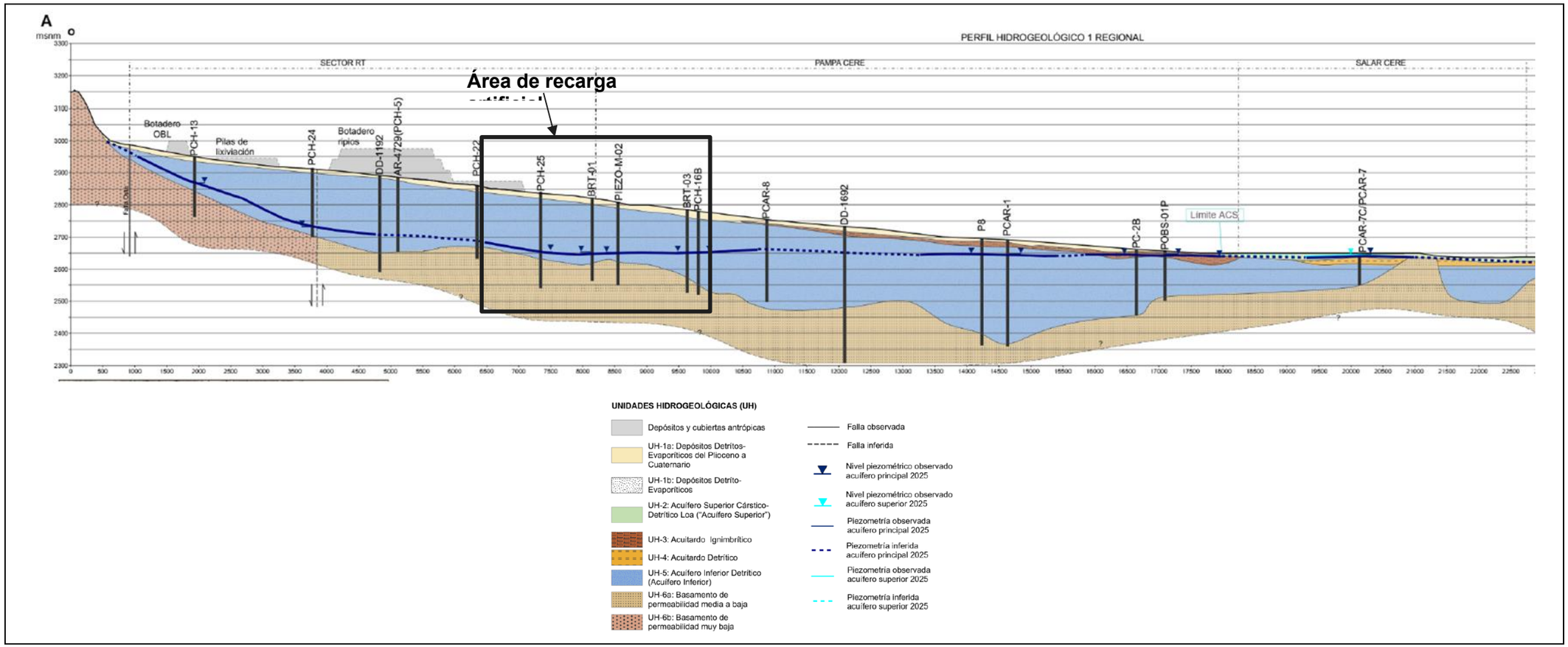
UH-6a: Basamento rocoso de permeabilidad media a baja. Está formado por rocas sedimentarias, volcano-sedimentarias e intrusivas fracturadas, provenientes principalmente de los Estratos de Chuquicamata y subordinadamente de la Formación Icanche y otras unidades pre-terciarias. Su nivel superior sería localmente saturado y estaría conectada hidráulicamente con la UH-5 de acuerdo con levantamientos geofísicos. Estas zonas podrían potencialmente albergar acuitardos, asociados a los niveles fracturados en la roca.

Figura 26. Mapa hidrogeológico del área de estudio



Fuente: Anexo 13 Actualización del Modelo Conceptual de la Adenda.

Figura 27. Perfil Hidrogeológico 1 (cortado desde sector RT hasta Salar Cere)



Fuente: Anexo 13 Actualización del Modelo Conceptual de la Adenda.

2.4.2.2 Ensayos Hidráulicos en los pozos de la BH

En el Apéndice B se adjunta un memorándum técnico de la interpretación de ensayos hidráulicos en pozos de la Barrera Hidráulica (BH).

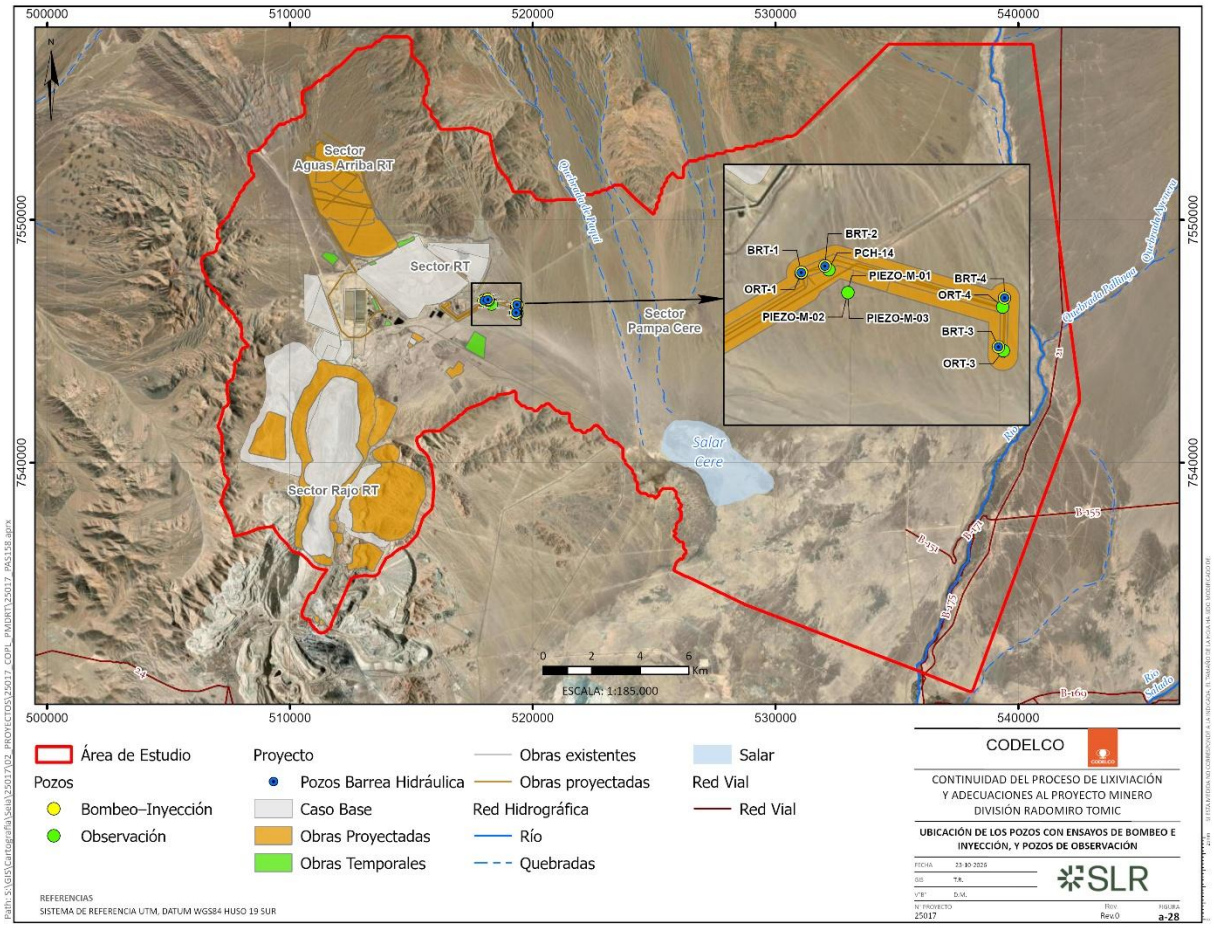
La siguiente Tabla 12 presenta la información de los pozos donde se realizaron los ensayos de bombeo e inyección, como también se identifican los pozos de observación. La distribución espacial de estos pozos se muestra en la Figura 28.

Tabla 12. Pozos de la barrera hidráulica de DRT en Pampa Cere

Pozo	Tipo de Ensayo	Coordenada UTM Este (m)	Coordenada UTM Norte (m)
BRT-1	Bombeo–Inyección	517.994,5	7.546.672,2
BRT-2	Bombeo–Inyección	518.152,9	7.546.714,9
BRT-3	Bombeo–Inyección	519.312,0	7.546.176,0
BRT-4	Bombeo–Inyección	519.353,1	7.546.503,2
ORT-1	Observación	517.994,0	7.546.668,0
ORT-3	Observación	519.344,9	7.546.148,9
ORT-4	Observación	519.341,0	7.546.443,0
PIEZO-M-01	Observación	518.305,0	7.546.538,0
PIEZO-M-02	Observación	518.305,0	7.546.538,0
PIEZO-M-03	Observación	518.305,0	7.546.538,0
PCH-14	Observación	518.179,0	7.546.692,3

Fuente: Apéndice B del presente documento.

Figura 28. Ubicación de los pozos con ensayos de bombeo e inyección, y pozos de observación



Fuente: Elaboración propia.

Las pruebas de gasto constante (PGC) permitieron estimar los parámetros hidráulicos como la transmisividad (T) y el coeficiente de almacenamiento (S). En particular, mediante el análisis de los pozos de bombeo se obtuvieron valores de transmisividad (T), con los métodos de Cooper & Jacob I, Theis y recuperación de Theis. En cuanto al coeficiente de almacenamiento (S), este se obtuvo a partir de la interpretación de los pozos de observación cercanos al pozo bombeado, mediante los métodos de Cooper & Jacob I, Theis y Neuman. A continuación, se detallan los resultados obtenidos por pozo:

Tabla 13. Transmisividad y Coeficiente de Almacenamiento para la PGC del pozo BRT-01.

Pozo	Tipo	Espesor saturado (m)	Ensayo	Método	T (m²/d)	K (m/d)	S (-)
BRT-01	Bombeo	60	Gasto constante	Cooper & Jacob I	470	8	–
			Gasto constante	Theis	470	8	–

Pozo	Tipo	Espesor saturado (m)	Ensayo	Método	T (m²/d)	K (m/d)	S (-)
			Recuperación	Theis Recovery	2.000	34	–
ORT-01	Observación	54	Gasto constante	Cooper & Jacob I	660	12	2,7E–01
			Gasto constante	Theis	790	15	9,4E–02
			Gasto constante	Neuman	700	13	3,4E–01
			Recuperación	Theis Recovery	2.100	40	–

Fuente: Extraído del Apéndice B del presente documento.

Tabla 14. Transmisividad y Coeficiente de Almacenamiento para la PGC del pozo BRT-02.

Pozo	Tipo	Espesor saturado (m)	Ensayo	Método	T (m²/d)	K (m/d)	S (-)
BRT-02	Bombeo	61	Gasto constante	Cooper & Jacob I	140	2	–
			Gasto constante	Theis	200	3	–
			Recuperación	Theis Recovery	980	16	–
PCH-14	Observación	93	Gasto constante	Cooper & Jacob I	890	10	–
			Gasto constante	Theis	890	10	–
			Gasto constante	Neuman	310	3	2,0E–02
			Recuperación	Theis Recovery	1.300	14	–

Fuente: Extraído del Apéndice B del presente documento.

Tabla 15. Transmisividad y Coeficiente de Almacenamiento para la PGC del pozo BRT-03.

Pozo	Tipo	Espesor saturado (m)	Ensayo	Método	T (m²/d)	K (m/d)	S (-)
BRT-03	Bombeo	67	Gasto constante (55 hr)	Cooper & Jacob I	13.300	199	–
			Gasto constante (55 hr)	Theis	6.000	90	–
			Recuperación (55 hr)	Theis Recovery	5.700	85	–
			Gasto constante (20 hr)	Cooper & Jacob I	7.100	105	–
			Gasto constante (20 hr)	Theis	6.000	89	–
			Recuperación (20 hr)	Theis Recovery	2.700	40	–

Pozo	Tipo	Espesor saturado (m)	Ensayo	Método	T (m²/d)	K (m/d)	S (-)
ORT-03	Observación	119	Gasto constante (55 hr)	Cooper & Jacob I	7.700	65	–
			Gasto constante (55 hr)	Theis	6.200	52	–
			Gasto constante (55 hr)	Neuman	620	5	2,9E–01
			Recuperación (55 hr)	Theis Recovery	5.100	43	–
			Gasto constante (20 hr)	Cooper & Jacob I	4.100	35	–
			Gasto constante (20 hr)	Theis	4.200	35	–
			Gasto constante (20 hr)	Neuman	420	4	1,2E–01

Fuente: Extraído del Apéndice B del presente documento.

Tabla 16. Transmisividad y Coeficiente de Almacenamiento para la PGC del pozo BRT-04.

Pozo	Tipo	Espesor saturado (m)	Ensayo	Método	T (m²/d)	K (m/d)	S (-)
BRT-04	Bombeo	56	Gasto constante	Cooper & Jacob I	1.700	30	–
			Gasto constante	Theis	1.500	27	–
			Recuperación	Theis Recovery	3.700	67	–
ORT-04	Observación	54	Gasto constante	Cooper & Jacob I	35.000	650	8,7E–02

Fuente: Extraído del Apéndice B del presente documento.

Por otra parte, se realizaron pruebas de inyección de carga variable, que fueron analizadas con el método de Hvorslev, para estimar los valores de conductividad hidráulica (K). En total, se realizaron 8 ensayos de infiltración, resumidos en la Tabla 17 observándose un máximo de conductividad hidráulica en el pozo BRT-01 con 35 m/d y un valor mínimo en el pozo ORT-03 con 0,02 m/d.

Tabla 17. Resumen de valores de ensayos de infiltración

Pozo	Fecha	Ensayo de carga constante			Ensayo de carga variable		Promedio
		Caudal (L/s)	Tiempo (min)	K (m/d)	Tiempo (min)	K (m/d)	K (m/d)
ORT-01	09/11/2024	10	1440	3,6E+00	360	1,4E-01	3,8E+00
BRT-01	09/11/2024	10	1440	3,5E+01	360	5,4E-01	3,6E+01
BRT-02	22/11/2024	15	1440	2,7E-01	240	1,8E-01	4,5E-01
PCH-14	22/11/2024	15	1440	1,1E+01	240	1,2E-01	1,1E+01

Pozo	Fecha	Ensayo de carga constante			Ensayo de carga variable		Promedio
		Caudal (L/s)	Tiempo (min)	K (m/d)	Tiempo (min)	K (m/d)	K (m/d)
BRT-03	10/12/2024	20	1500	1,1E+01	120	1,3E+00	1,2E+01
ORT-03	10/12/2024	20	1500	3,3E+01	120	1,9E-02	3,3E+01
ORT-04	26/11/2024	15	1440	3,1E+01	180	5,9E-02	3,1E+01
BRT-04	27/11/2024	15	1440	7,2E-01	180	3,6E-01	1,1E+00

Fuente: Extraído del Apéndice B del presente documento.

2.4.2.3 Parámetros Hidráulicos en las UH

La integración de ensayos hidráulicos realizados en el área de estudio, junto a la incorporación de datos bibliográficos, permitió resumir la determinación de los parámetros hidráulicos: conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento, para las diferentes unidades hidrogeológicas, que se indican en la Tabla 18.

Luego, para el acuífero principal inferior (UH-5), unidad donde ocurre la recarga, los valores de K se sitúan en el rango de 10^{-1} a 10^{2} m/d.

Tabla 18. Parámetros hidráulicos representativos de cada unidad hidrogeológica

Unidad Hidrogeológica	Litología	Conductividad hidráulica K (m/d)		Coeficiente de almacenamiento S	
		K mínima	K máxima	S mínimo	S máximo
UH-1a	Gravas y arenas limosas	$1,0 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{2}$	$5,0 \times 10^{-2}$	$5,0 \times 10^{-2}$
UH-1b	Detritos evaporíticos	$1,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{0}$	$5,0 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-2}$
UH-2	Calizas, calizas arenosas y arenas calcáreas	$2,2 \times 10^{-2}$	$9,1 \times 10^{-1}$	$2,0 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-2}$
UH-3	Tobas consolidadas	$1,0 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$
UH-4	Arcillas y limos	$1,0 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$
UH-5	Gravas y arenas gravosas	$2,1 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{2}$	$2,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-1}$
UH-6a	Rocas sedimentarios y volcano-sedimentarias, e intrusivos fracturados	$2,6 \times 10^{-6}$	$5,5 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-2}$
UH-6b	Rocas volcánicas e intrusivas no fracturadas	$1,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-5}$	$< 1,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-3}$

Fuente: Anexo 13 Actualización del Modelo Conceptual de la Adenda.

2.4.2.4 Niveles

Se analiza la evolución de los niveles en el área de la recarga, que se encuentra dentro del sector definido como Pampa Cere, con datos de nivel desde al año 2003 hasta el año 2025. Los niveles piezométricos en el sector Pampa Cere se concentran principalmente en un rango comprendido entre 2.640 y 2.670 msnm.

El pozo PCAR-11 registra la mayor cota piezométrica del sector (Figura 30), con un nivel aproximado de 2.665 msnm, y se localiza en el extremo norte del área de estudio (Figura 29). Debido a su ubicación, se considera que este pozo es representativo del régimen natural de recarga del sistema, asociado al flujo de aguas subterráneas provenientes de la quebrada Paqui.

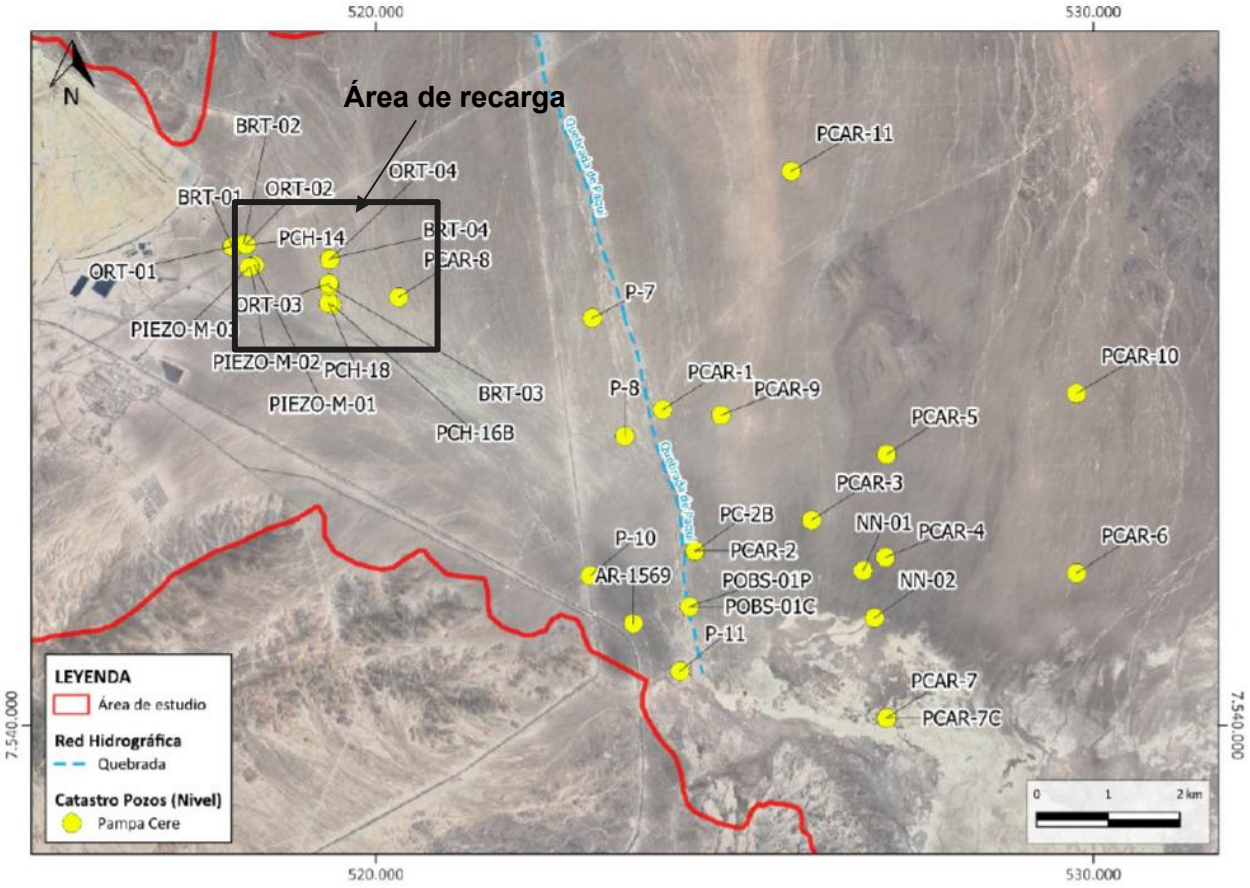
Los pozos más cercanos a las instalaciones mineras dentro de Pampa Cere corresponden a PCH-14, PCH-16B, PCH-18, ORT, BRT y PIEZO-M. El pozo PCH-14 evidencia un aumento sostenido de los niveles piezométricos a una tasa aproximada de 30 cm/año (Figura 30); sin embargo, a partir de fines de 2021 se observa una estabilización de los niveles, la cual se mantiene hasta el año 2025. Por su parte, los pozos PCH-16B y PCH-18, ubicados aproximadamente 1,5 km aguas abajo del pozo PCH-14, también muestran un incremento sostenido del orden de 15 cm/año, con un comportamiento similar al de PCH-14 hasta el año 2022. Este ascenso progresivo podría estar asociado a procesos de infiltración provenientes del sector de instalaciones RT. Cercano a estos pozos se ubica el área de la recarga artificial (Figura 29).

Hacia el sector central de la Pampa Cere, se localizan los pozos P-7, P-8, PCAR-1 y PCAR-9. Hasta fines de 2010, estos pozos muestran una tendencia de leve descenso, del orden de 10–20 cm/año. Luego, entre los años 2011 y 2015 se observa un período de relativa estabilidad en el pozo PCAR-9, mientras que los pozos PCAR-1, P-7 y P-8 presentan ascensos moderados, con tasas del orden de 8–10 cm/año. A partir de fines de 2017, se registra un incremento en la tasa de ascenso de los niveles piezométricos en el conjunto de estos pozos. Este período de recuperación podría atribuirse a recargas locales, posiblemente asociadas al avance de infiltraciones provenientes de las instalaciones del sector RT.

En el sector suroeste de Pampa Cere se encuentran los pozos AR-1569, P-10, PC-2B, P-11, POBS-01C y POBS01-P. Los pozos P-10, PC-2B y AR-1569 muestran un descenso de niveles hasta inicios de 2012, de aproximadamente 8 cm/año, seguido de una recuperación similar y posterior estabilización. Por otra parte, el pozo P-11 presenta un patrón comparable, con fluctuaciones de 8–10 cm posiblemente estacionales, mientras que POBS-01C y POBS01-P evidencian una leve tendencia al ascenso.

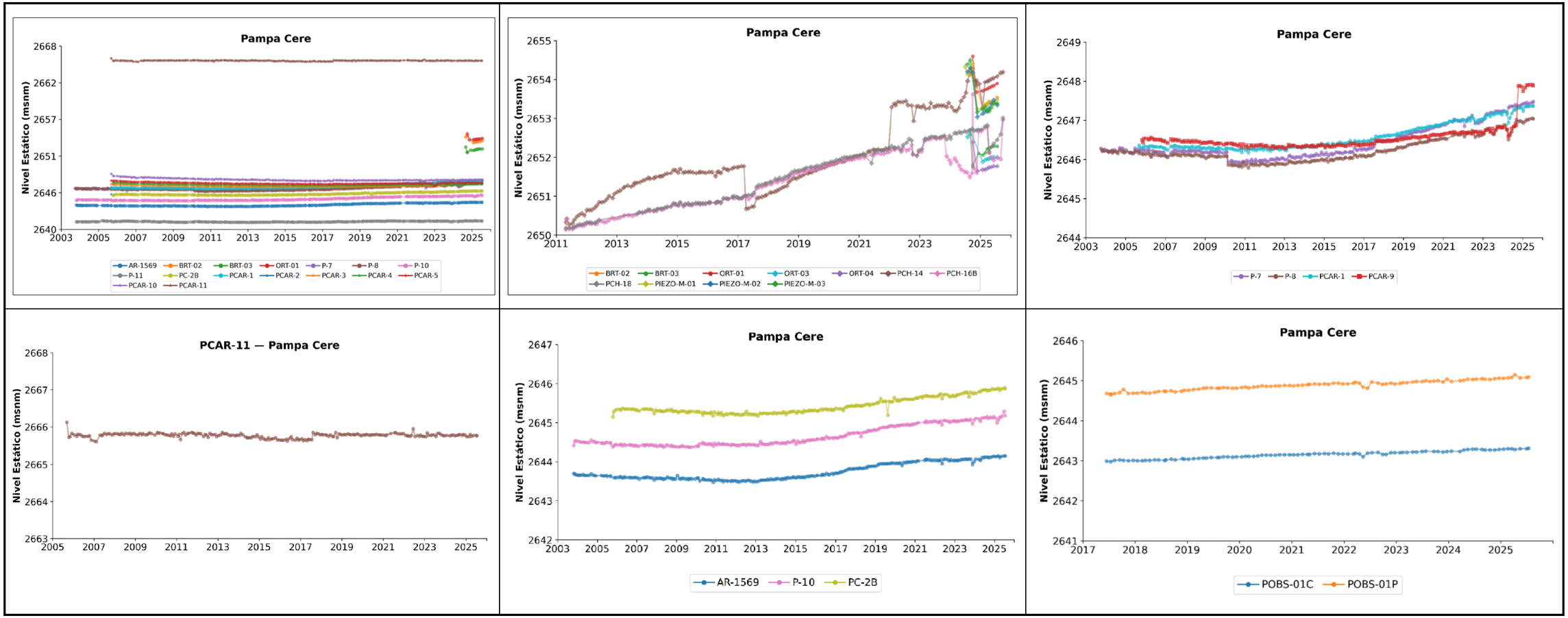
Los pozos PCAR-3, PCAR-4 y PCAR-5 registran un descenso de niveles a una tasa aproximada de 5 cm/año hasta 2015, a partir de la cual comienzan a recuperar sus niveles en torno a 10–15 cm hasta la fecha. Por su parte, el pozo PCAR-7 presenta un descenso continuo de aproximadamente 50 cm entre 2007 y 2014, seguido de un breve aumento a partir de mayo de 2014 y un nuevo descenso hasta finales de 2018; desde 2019 los niveles se mantienen relativamente estables, en torno a 2.645 msnm. En cuanto al pozo PCAR-7C, esta muestra un comportamiento estacional, con descensos durante el verano y ascensos en invierno, evidenciando un leve descenso acumulado de aproximadamente 10 cm entre 2007 y finales de 2023.

Figura 29. Ubicación de pozos para análisis de niveles



Fuente: Anexo 13 Actualización del Modelo Conceptual de la Adenda.

Figura 30. Niveles piezométricos de los pozos del sector Pampa Cere



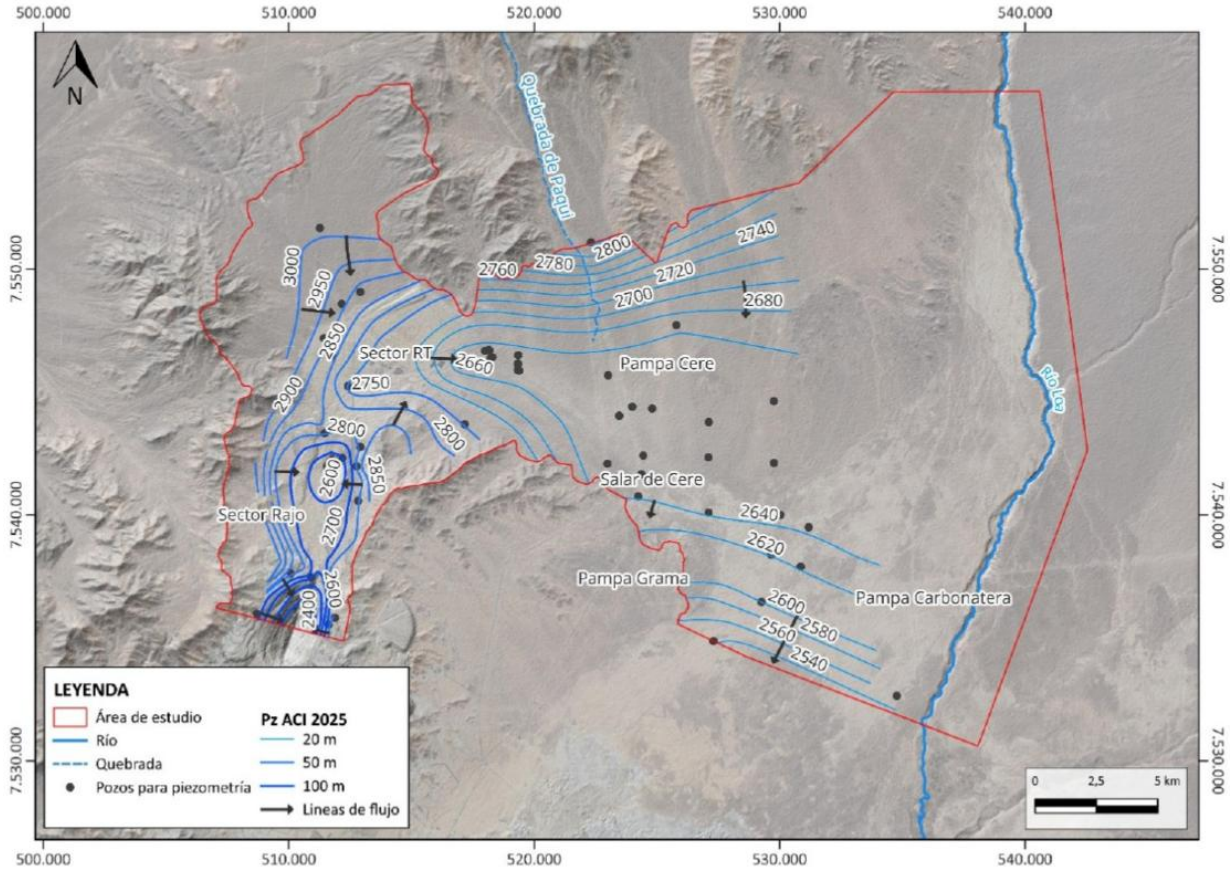
Fuente: Anexo 13 Actualización del Modelo Conceptual de la Adenda.

La Figura 31 muestra la piezometría realizada para el acuífero inferior (UH-5) en base a 56 puntos de monitoreo (pozos y sensores) con registros de nivel. Se utilizó el valor promedio considerando las mediciones efectuadas durante el 2025 en cada punto de monitoreo, ello en vista de las mínimas variaciones observadas en el registro de monitoreo durante dicho año.

Las curvas resultantes indican una dirección de flujo similar a lo descrito históricamente (NNW-SE), así como también gradientes hidráulicos que varían según la dirección del flujo. Los mayores gradientes locales se observaron en el sector aguas arriba de las instalaciones de RT hasta el sector de botaderos, identificando un gradiente hidráulico en torno al 4%; y entre el sector de pilas y botadero de ripios con un gradiente cercano a 3%. Posteriormente, al oeste de la Pampa Cere entre los pozos PCH-24 y PCH-18 dicho gradiente disminuye a un 1,4% aproximadamente, para continuar reduciéndose hacía el centro de la pampa donde alcanza hasta un 0,1%.

En menor medida, al SE del área de estudio se identificó que una fracción del flujo se moviliza con dirección NE-SW, desde el Salar Cere hacia el sector de Pampa Grama (fuera del dominio), con un gradiente estimado de 0,3%; mientras que la mayor parte de este continuaría su recorrido hacia el SE con un gradiente hidráulico promedio de 1,3% hacia la salida. En este sector (Pampa Carbonatera), el acuífero inferior tendría un carácter confinado, bajo el acuitardo detrítico asociado a la UH-4.

Figura 31. Piezometría Acuífero Principal (ACI) para el año 2025



Fuente: Anexo 13 Actualización del Modelo Conceptual de la Adenda.

2.5 Plan de monitoreo

2.5.1 El plan de monitoreo deberá ser coherente con la duración de las etapas del proyecto, con la obra de recarga artificial, con las características del acuífero a recargar y con el sector influenciado por la recarga.

El plan de monitoreo que se presenta a continuación consiste en el seguimiento de las variables niveles y calidad química de las aguas subterráneas del acuífero principal (UH-5). Los puntos de monitoreo (29) y su detalle se presentaron en el acápite 2.3.2, específicamente a través de la Figura 14 y Tabla 8. Estos puntos son parte del Plan de Vigilancia Ambiental (PVA) de la División Radomiro Tomic (DRT), y de acuerdo con el Apéndice A PVA, funcionarán en las fases de operación y cierre del proyecto, manteniendo sus mediciones hasta el fin del periodo de cierre (año 2060).

Cabe recordar que el funcionamiento de la BH se proyecta hasta el año 2042, y de acuerdo con los resultados del Modelo Numérico presentado en esta adenda (Anexo 25), que se describieron en el acápite 2.3.3, se consigue atenuar la concentración de sulfato por debajo de 500 mg/L en el pozo PCAR-1, tras 16 años de operación de la BH (2026 -2042), y resultan en concentraciones de sulfato por debajo de 300 mg/L en el pozo PCAR-1 al año 2071. En adición, el comportamiento esperado de las aguas del acuífero producto de la operación de la recarga artificial corresponde a una condición de control y atenuación de la pluma histórica de sulfatos, sin generación de alteraciones adversas adicionales sobre la calidad basal del acuífero principal UH-5. Luego, el monitoreo resulta coherente con la duración de las etapas del proyecto.

El plan de monitoreo también resulta coherente con la obra de recarga artificial, con las características del acuífero a recargar y con el sector influenciado por la recarga, en tanto que ambos tipos de pozos (monitoreo y BH) se encuentran habilitados, principalmente, en el mismo acuífero (UH-5), y el monitoreo controlará la calidad química en las cercanías a las obras de recarga como también en los sectores aguas arriba de esta como aguas abajo de la misma.

Finalmente, el plan de monitoreo también incluye el control de la calidad química de las aguas que se inyectarán al acuífero, mediante el cumplimiento de las concentraciones límites de la Tabla 5 de este documento.

2.5.2 El plan de monitoreo debe permitir verificar la efectividad de la recarga artificial del acuífero y la no afectación al medio ambiente, ello en términos de la no contaminación del acuífero. En este sentido, el plan de monitoreo deberá incluir el seguimiento de la calidad del agua a recargar y de la calidad del agua en el acuífero en el sector influenciado por la recarga.

La verificación de la efectividad de la recarga artificial del acuífero para la no afectación al medio ambiente se realizará mediante el Plan de Alerta Temprana (PAT), Apéndice D de este Anexo. El PAT utiliza un subconjunto de 6 pozos, que son parte del Plan de Monitoreo. Estos pozos son: PC-2B, POBS-01P, PCAR-3, PCAR-4, PCAR-7 y PCAR-7C.

En la Tabla 19 se presenta la información correspondiente a estos seis (6) puntos de monitoreo. Los pozos PC-2B, POBS-01P, PCAR-3, PCAR-4 y PCAR-7 se encuentran ranurados en las gravas del Acuífero Principal UH-5 (o acuífero inferior), por donde se propaga la pluma de sulfatos, mientras que el pozo PCAR-7C se encuentra ranurado en las calizas del Acuífero

Superior UH-2, con el fin de detectar eventuales variaciones anómalas en las concentraciones de sulfato derivadas de la conexión estimada entre ambos acuíferos en dicho sector.

Tabla 19. Pozos de Monitoreo del PAT

Punto Monitoreo	WGS84, Huso 19S		Tramos ranurados (m)	Litología	Unidad Hidrogeológica	Sector
	E (m)	N (m)				
PC-2B	524.445	7.542.418	48,5-105,7; 116,4-156,1; 173-201,3	Gravas	UH-5	Pampa Cere; aguas abajo del frente de pluma de SO4 al año 2023
POBS-01P	524.370	7.541.656	11-22,5;51-73,9;79,6-96,8;102,5-119,7;125,5-142,7	Gravas	UH-5	
PCAR-3	526.074	7.542.858	50-68;74-92;98-116;122-140;146-164;170-188;191-215	Gravas	UH-5	
PCAR-4	527.103	7.542.343	42-60; 63-87; 90-132	Gravas	UH-5	
PCAR-7	527.110	7.540.094	35-98	Gravas	UH-5	Salar de Cere
PCAR-7C	527.121	7.540.098	1,5-7,5	Calizas	UH-2	

Fuente: Información extraída del Apéndice D PAT del presente documento.

La Figura 32 muestra la ubicación de los pozos PAT, respecto a la ubicación de los pozos de la BH. Los pozos PAT se distribuyen entre el frente actual de la pluma y el objeto de protección (OdP): Humedal del Salar de Cere, siguiendo la dirección del flujo del acuífero. Los puntos de monitoreo del PAT más cercanos al OdP se encuentran ubicados a algunos kilómetros aguas arriba, lo que permitirá detectar de manera progresiva un eventual avance de la pluma, así como evaluar su evolución frente a la posible activación de la Barrera Hidráulica (BH).

El PAT establece umbrales de concentración de sulfato en los pozos PAT que permitirán anticipar efectos no previstos y actuar de forma oportuna ante la ocurrencia de un comportamiento no proyectado en la calidad de las aguas. El umbral más relevante corresponde al umbral límite, el cual representa una alerta crítica que requiere la implementación inmediata de acciones correctivas, tales como el aumento de la frecuencia de monitoreo de quincenal a semanal, la activación de la BH, junto con otras acciones de control que se describen en el PAT (Apéndice D del presente Anexo).

La Barrera Hidráulica (BH) se activará únicamente cuando al menos uno de los seis pozos de monitoreo del PAT registre concentraciones sobre el umbral límite durante tres (3) o más meses consecutivos, conforme a lo establecido en el PAT. Luego, su funcionamiento posterior estará condicionado al desempeño y efectividad de esta medida sobre la calidad de las aguas subterráneas del acuífero.

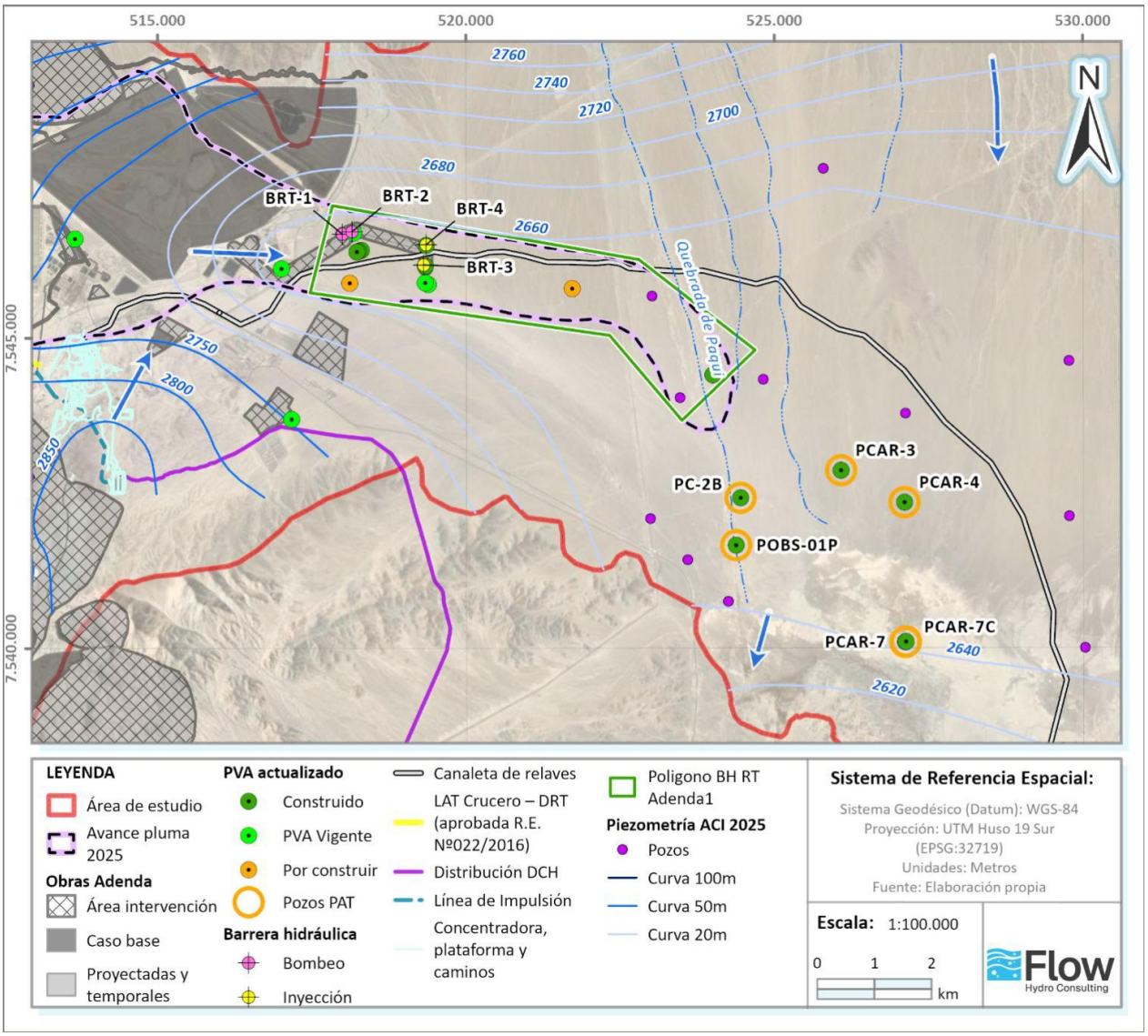
La Tabla 20 resume los umbrales intermedios y límites en cada pozo PAT y las acciones a tomar frente a eventuales superaciones negativas de dichos umbrales.

Tabla 20. Umbrales definidos para cada pozo PAT y sus respectivas acciones asociadas

Pozo	Umbral Intermedio (mg/L SO4)	Umbral Límite (mg/L SO4)
PC-2B	250	500
POBS-01P	250	500
PCAR-3	450	700
PCAR-4	250	500
PCAR-7	250	500
PCAR-7C	250	500
Acciones	• Informar a SMA y DGA en 30 días corridos, una vez por evento y pozo. • Aumentar frecuencia de monitoreo de mensual a quincenal. • Actualizar los modelos y analizar causalidad y desviación del pronóstico. Reportar en doce meses desde la activación intermedia.	• Informar a la SMA y a la DGA en 30 días corridos, una vez por evento y pozo. • Aumentar frecuencia de monitoreo de quincenal a semanal. • Activar el funcionamiento de la barrera hidráulica. • Actualizar el modelo hidrogeológico y simular la medida implementada. • Actualizar anualmente los modelos si la barrera opera más de un año continuo. • Entregar el informe de efectividad en el mes 14 desde el inicio efectivo de operación, evaluando el primer año (12 meses de datos) o el periodo efectivamente operado. • Desactivar conforme a los criterios de recuperación e informar a la SMA y a la DGA. • Retornar al monitoreo mensual cuando se cumpla la recuperación bajo los umbrales intermedios.

Fuente: Extraído desde el Apéndice D PAT adjunto en el presente documento.

Figura 32. Pozos PAT y BH



Fuente: Extraído desde el Apéndice D PAT del presente documento

Por otro lado, cabe mencionar que el plan de monitoreo contempla, efectivamente, el seguimiento de la calidad del agua a recargar y también el seguimiento de la calidad del agua en el acuífero en el sector influenciado por la recarga.

A saber:

1) Seguimiento de la calidad del agua destinada a la recarga:

El control de la calidad del agua destinada a la recarga se llevará a cabo en el punto de salida de la planta desaladora en las inmediaciones de la División Radomiro Tomic, asegurando que el agua a inyectar en el acuífero cumpla con los estándares establecidos en el apartado 2.2.2 del

presente Anexo. El Titular se asegurará que el agua destinada a recarga no supere los límites máximos establecidos en la Tabla 5.

2) Seguimiento de la calidad del agua en el acuífero en el sector influenciado por la recarga:

Tal como se mencionó en el apartado 2.5.1, se contempla un plan de monitoreo que realizará seguimiento a las variables niveles y calidad química de las aguas subterráneas del acuífero principal (UH-5), mediante el control de 29 puntos de monitoreo, que son parte del Plan de Vigilancia Ambiental (PVA) de la División Radomiro Tomic (DRT), y dentro de los cuales se incluye los pozos PAT. La ubicación de los pozos se monitoreo se presentó en la Figura 14 y su detalle en la Tabla 8. Estos pozos no solo monitorearán el sector influenciado por la recarga, sino que también los sectores aguas arriba y aguas abajo de la recarga, según dirección de flujo.

2.5.3 El plan de monitoreo debe indicar los parámetros a medir, frecuencia, lugares de medición, indicadores de cumplimiento o umbrales de comparación, metodologías para efectuar las mediciones y la toma de muestras de agua, los protocolos de análisis de los datos, y la frecuencia y contenidos de los informes de monitoreo. En el título 7 se presentan algunos criterios orientativos al respecto.

El plan de monitoreo que aquí se presenta, se encuentra articulado con el Plan de Vigilancia Ambiental del Proyecto (PVA), el cual se incluye en el Apéndice A del presente documento. Luego, los parámetros a medir, la frecuencia, lugares de medición se resume mediante la Tabla 21. La metodología para efectuar las mediciones y los protocolos para el análisis de los datos se enmarca en el procedimiento estándar ETFA.

Tabla 21. Plan de Monitoreo

<table>
<tr><th>Tipo</th><th>Parámetros por monitorear</th><th>Frecuencia</th><th>Puntos de Monitoreo / Ubicación</th><th>Indicadores de cumplimiento o umbrales de comparación</th><th>Reporte</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Agua para la recarga del acuífero</td><td>Caudal y volumen de recarga/descarga</td><td>Diaria, siempre y cuando la BH esté en operación.</td><td>Pozos de inyección/bombeo:
<table>
<tr><th rowspan="2">POZO</th><th rowspan="2">TIPO</th><th colspan="2">COORD. UTM WGS84 H19S</th></tr>
<tr><th>Este (m)</th><th>Norte (m)</th></tr>
<tr><td>BRT-3</td><td>Inyección (Recarga artificial)</td><td>519.312</td><td>7.546.176</td></tr>
<tr><td>BRT-4</td><td>Inyección (Recarga artificial)</td><td>519.353</td><td>7.546.503</td></tr>
<tr><td>BRT-1</td><td>Bombeo</td><td>517.994</td><td>7.546.672</td></tr>
<tr><td>BRT-2</td><td>Bombeo</td><td>518.152</td><td>7.546.714</td></tr>
</table></td><td>Caudal de recarga/descarga: total de 30 L/s (15 L/s por pozo de la BH: BRT-1, BRT-2, BRT-3 y BRT-4)
Volumen de recarga/descarga: 2592 m^3/día (1296 m^3/día por pozo de la BH: BRT-1, BRT-2, BRT-3 y BRT-4)</td><td>Reporte semestral del monitoreo mediante informe técnico.</td></tr>
<tr><td>Aluminio (Al), Arsénico (As), Boro (B), Cadmio (Cd), Cianuro (CN), Cobre (Cu), Cromo Total, Cromo hexavalente (Cr), Fluoruro (F), Hierro (Fe), Magnesio, Manganeso (Mn), Molibdeno (Mo), Níquel (Ni), Selenio (Se), Sulfuros (S), Zinc (Zn), Coliformes fecales, 2,4 – D*, DDT + DDD + DDE*, Lindano*, Metoxicloro*, Pentaclorofenol*, pH, Mercurio (Hg), Plomo (Pb), Escherichia coli, Nitrato (NO3), Nitrito (NO2), Cloruros (Cl), Sulfatos (SO4), SDT</td><td>Mensual, y cada vez que se cambie de fuente.</td><td>Pozos de monitoreo:
Agua desalada de Planta Desaladora del Distrito Norte de Codelco
DAA de Codelco o compra a terceros</td><td>Indicadores de cumplimiento:
<table>
<tr><th>PARÁMETRO</th><th>UNIDAD</th><th>MAGNITUD MÁXIMA</th></tr>
<tr><td>Aluminio</td><td>mg/L</td><td>≤ 0,81 (1)</td></tr>
<tr><td>Arsénico</td><td>mg/L</td><td>≤ 0,16 (1)</td></tr>
<tr><td>Boro</td><td>mg/L</td><td>≤ 14,2 (1)</td></tr>
<tr><td>Cadmio</td><td>mg/L</td><td>≤ 0,01 (1)</td></tr>
<tr><td>Cianuro</td><td>mg/L</td><td>≤ 0,05 (1)</td></tr>
<tr><td>Cobre</td><td>mg/L</td><td>≤ 0,1 (1)</td></tr>
<tr><td>Cromo Total</td><td>mg/L</td><td>≤ 0,02 (1)</td></tr>
<tr><td>Cromo hexavalente</td><td>mg/L</td><td>≤ 0,005 (2)</td></tr>
<tr><td>Fluoruro</td><td>mg/L</td><td>≤ 1,58 (1)</td></tr>
<tr><td>Hierro</td><td>mg/L</td><td>≤ 3,88 (1)</td></tr>
<tr><td>Magnesio</td><td>mg/L</td><td>≤ 19,51 (1)</td></tr>
<tr><td>Manganeso</td><td>mg/L</td><td>≤ 0,09 (1)</td></tr>
<tr><td>Mercurio</td><td>mg/L</td><td>≤ 0,01 (1)</td></tr>
<tr><td>Molibdeno</td><td>mg/L</td><td>≤ 0,17 (1)</td></tr>
<tr><td>Níquel</td><td>mg/L</td><td>≤ 0,01 (1)</td></tr>
<tr><td>Nitrato</td><td>mg/L</td><td>≤ 85,1 (1)</td></tr>
<tr><td>Nitrito</td><td>mg/L</td><td>≤ 3 (2)</td></tr>
<tr><td>Selenio</td><td>mg/L</td><td>≤ 0,01 (1)</td></tr>
<tr><td>Sulfuros</td><td>mg/L</td><td>≤ 0,01 (1)</td></tr>
<tr><td>Zinc</td><td>mg/L</td><td>≤ 0,11 (1)</td></tr>
<tr><td>Coliformes fecales</td><td>Col Fec NMP/100ml</td><td>≤ 23(1)</td></tr>
<tr><td>Eschericia Coli</td><td>-</td><td>Ausente (2)</td></tr>
<tr><td>2,4 – D*</td><td>mg/L</td><td>≤ 0,03 (2)</td></tr>
</table></td><td>Reporte semestral del monitoreo mediante informe técnico, donde los análisis químicos de las muestras de aguas serán realizados por un laboratorio acreditado bajo la norma NCh ISO 17.025, en cada uno de los parámetros analizados.</td></tr>
</table>

<table>
<tr><th>Tipo</th><th>Parámetros por monitorear</th><th>Frecuencia</th><th>Puntos de Monitoreo / Ubicación</th><th>Indicadores de cumplimiento o umbrales de comparación</th><th>Reporte</th></tr>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td>
<table>
<tr><td>DDT + DDD + DDE*</td><td>mg/L</td><td>≤ 0,002 (2)</td></tr>
<tr><td>Lindano*</td><td>mg/L</td><td>≤ 0,002 (2)</td></tr>
<tr><td>Metoxicloro*</td><td>mg/L</td><td>≤ 0,02 (2)</td></tr>
<tr><td>Pentaclorofenol*</td><td>mg/L</td><td>≤ 0,009 (2)</td></tr>
<tr><td>pH</td><td>Adimensional</td><td>7,0 - 8,5 (3)</td></tr>
<tr><td>Plomo</td><td>mg/L</td><td>≤ 0,2(1)</td></tr>
<tr><td>Cloruros</td><td>mg/L</td><td>< 300 (3)</td></tr>
<tr><td>Sulfatos</td><td>mg/L</td><td>≤ 200 (4)</td></tr>
<tr><td>SDT</td><td>mg/L</td><td>< 700 (3)</td></tr>
<tr><td colspan="3">(1) Rangos referenciales establecidos en función del percentil 75 de la base de datos hidroquímica del acuífero principal, determinado a partir de los registros del pozo PCH-14, PCH-18 y PCH-16B, todos ubicados en el sector de la recarga artificial. Los valores referenciales cumplen con ser de mejor o igual calidad que las aguas del acuífero principal en el sector de la BH (pluma de sulfatos existente); (2) Sin monitoreo del parámetro, valor referencial corresponde al límite de la NCh 409/2005, complementada con la Tabla 4 de la Circular N°2 DGA; (3) Valor establecido por diseño de la planta desaladora (Capítulo 1 del EIA RT Sulfuros). (4) Corresponde a la concentración de sulfatos establecida para la Simulación 5, que corresponde al caso con proyecto + operación de barrera hidráulica (Anexo 25 Modelo Hidrogeológico Numérico).</td></tr>
</table>
</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Monitoreo de la calidad de agua del acuífero</td>
<td>Niveles freáticos

Parámetros fisicoquímicos:

Iones Mayoritarios: Cationes: Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, NH_4^{+}; Aniones: HCO_3^{-}, CO_3^{2-}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, NO_3^{-}, PO_4^{3-}, F^{-}, S^{2-}

Metales (fracción total y disuelta): Al, As, B, Br, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Mo, Pb, Zn, Si

Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos: pH, Conductividad Eléctrica, Aceites y Grasas, Coliformes Totales, Detergentes, DBO5, DQO, HCT, SDT, SS, ST y Turbiedad.

Parámetros in situ: pH, conductividad eléctrica y Alcalinidad.

(*) Isotopos: 2H, 18O y 34S</td>
<td>Mensual (No aplica para isótopos).

(*) Semestral para isótopos (en pozos PCH-12, PCH-13, PCH-14, PCH-16B, PCH-18, PCH-20 y PCH-25, OPVA-1, OPVA-4, PC-2B, PCAR-7 y PCAR-7C).</td>
<td>
<table>
<tr><th>Pozo PVA</th><th>Ubicación</th><th>Este</th><th>Norte</th></tr>
<tr><td>PCH-12</td><td>Sector RT</td><td>511.435</td><td>7.547.189</td></tr>
<tr><td>PCH-13</td><td>Sector RT</td><td>511.762</td><td>7.546.441</td></tr>
<tr><td>PCH-14</td><td>Pampa Cere</td><td>518.180</td><td>7.546.692</td></tr>
<tr><td>PCH-15</td><td>Sector RT</td><td>512.416</td><td>7.545.237</td></tr>
<tr><td>PCH-16B</td><td>Pampa Cere</td><td>519.386</td><td>7.545.860</td></tr>
<tr><td>PCH-18</td><td>Pampa Cere</td><td>519.337</td><td>7.545.885</td></tr>
<tr><td>PCH-19</td><td>Pampa Cere</td><td>517.168</td><td>7.543.688</td></tr>
<tr><td>PCH-23</td><td>Aguas Arriba RT</td><td>522.316</td><td>7.551.087</td></tr>
<tr><td>PCH-24</td><td>Sector RT</td><td>513.660</td><td>7.546.598</td></tr>
<tr><td>PCH-25</td><td>Pampa Cere</td><td>517.006</td><td>7.546.115</td></tr>
<tr><td>OPVA-1</td><td>Aguas Arriba RT</td><td>511.976</td><td>7.553.078</td></tr>
<tr><td>OPVA-2</td><td>Aguas Arriba RT</td><td>510.993</td><td>7.550.451</td></tr>
<tr><td>OPVA-3</td><td>Aguas Arriba RT</td><td>510.714</td><td>7.549.004</td></tr>
<tr><td>OPVA-4</td><td>Aguas Arriba RT</td><td>511.553</td><td>7.548.120</td></tr>
<tr><td>OPVA-5</td><td>Aguas Arriba RT</td><td>512.127</td><td>7.547.963</td></tr>
<tr><td>OPVA-6</td><td>Pampa Cere</td><td>518.115</td><td>7.545.882</td></tr>
<tr><td>OPVA-7</td><td>Pampa Cere</td><td>521.720</td><td>7.545.792</td></tr>
<tr><td>PIEZO-M-01</td><td>Pampa Cere</td><td>518.300</td><td>7.546.413</td></tr>
<tr><td>PIEZO-M-02</td><td>Pampa Cere</td><td>518.251</td><td>7.546.393</td></tr>
<tr><td>PIEZO-M-03</td><td>Pampa Cere</td><td>518.227</td><td>7.546.385</td></tr>
<tr><td>ORT-03</td><td>Pampa Cere</td><td>519.339</td><td>7.546.156</td></tr>
<tr><td>ORT-04</td><td>Pampa Cere</td><td>519.351</td><td>7.546.488</td></tr>
</table>
</td>
<td>El indicador de cumplimiento está dado por los umbrales intermedios y límites definidos para la concentración de sulfatos en los pozos PAT:
<table>
<tr><th>Pozo PAT (*)</th><th>Umbral Intermedio (mg/L SO4)</th><th>Umbral Límite (mg/L SO4)</th></tr>
<tr><td>PC-2B</td><td>250</td><td>500</td></tr>
<tr><td>POBS-01P</td><td>250</td><td>500</td></tr>
<tr><td>PCAR-3</td><td>450</td><td>700</td></tr>
<tr><td>PCAR-4</td><td>250</td><td>500</td></tr>
<tr><td>PCAR-7</td><td>250</td><td>500</td></tr>
<tr><td>PCAR-7C</td><td>250</td><td>500</td></tr>
</table>
</td>
<td>Se reportará anualmente a la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA)</td>
</tr>
</table>

<table>
<tr><th>Tipo</th><th>Parámetros por monitorear</th><th>Frecuencia</th><th>Puntos de Monitoreo / Ubicación</th><th>Indicadores de cumplimiento o umbrales de comparación</th><th>Reporte</th></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td>
<table>
<tr><td>PCAR-1</td><td>Pampa Cere</td><td>523.995</td><td>7.544.399</td></tr>
<tr><td>PC-2B (*)</td><td>Pampa Cere</td><td>524.445</td><td>7.542.418</td></tr>
<tr><td>PCAR-4 (*)</td><td>Pampa Cere</td><td>527.103</td><td>7.542.343</td></tr>
<tr><td>PCAR-7 (*)</td><td>Pampa Cere</td><td>527.110</td><td>7.540.094</td></tr>
<tr><td>PCAR-7C (*)</td><td>Pampa Cere</td><td>527.121</td><td>7.540.098</td></tr>
<tr><td>PCAR-3 (*)</td><td>Pampa Cere</td><td>526.074</td><td>7.542.858</td></tr>
<tr><td>POBS-01P (*)</td><td>Pampa Cere</td><td>524.370</td><td>7.541.656</td></tr>
</table>
(*) Pozo PAT
</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Monitoreo del acuífero para la eficiencia de la Barrera Hidráulica</td><td>Niveles freáticos
Parámetros fisicoquímicos:
Iones Mayoritarios: Cationes: Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, NH_4^{+}; Aniones: HCO_3^{-}, CO_3^{2-}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, NO_3^{-}, PO_4^{3-}, F^{-}, S^{2-}
Metales (fracción total y disuelta): Al, As, B, Br, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Mo, Pb, Zn, Si
Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos: pH, Conductividad Eléctrica, Aceites y Grasas, Coliformes Totales, Detergentes, DBO5, DQO, HCT, SDT, SS, ST y Turbiedad.
Parámetros in situ: pH, conductividad eléctrica y Alcalinidad.
(*) Isotopos: 2H, 18O y 34S</td><td>Mensual, si es que no se han superado umbrales (No aplica para isótopos).
Quincenal, cuando se superan los umbrales intermedios.
Semanal, cuando se superan los umbrales límites.
(*) Semestral para isótopos, si es que no se han superado umbrales.</td><td>
<table>
<tr><th>Pozo PVA</th><th>Ubicación</th><th>Este</th><th>Norte</th></tr>
<tr><td>PC-2B (*)</td><td>Pampa Cere</td><td>524.445</td><td>7.542.418</td></tr>
<tr><td>PCAR-4 (*)</td><td>Pampa Cere</td><td>527.103</td><td>7.542.343</td></tr>
<tr><td>PCAR-7 (*)</td><td>Pampa Cere</td><td>527.110</td><td>7.540.094</td></tr>
<tr><td>PCAR-7C (*)</td><td>Pampa Cere</td><td>527.121</td><td>7.540.098</td></tr>
<tr><td>PCAR-3 (*)</td><td>Pampa Cere</td><td>526.074</td><td>7.542.858</td></tr>
<tr><td>POBS-01P (*)</td><td>Pampa Cere</td><td>524.370</td><td>7.541.656</td></tr>
</table>
(*) Pozo PAT
</td><td>El indicador de cumplimiento está dado por los umbrales intermedios y límites definidos para la concentración de sulfatos en los pozos PAT:
<table>
<tr><th>Pozo PAT (*)</th><th>Umbral Intermedio (mg/L SO4)</th><th>Umbral Límite (mg/L SO4)</th></tr>
<tr><td>PC-2B</td><td>250</td><td>500</td></tr>
<tr><td>POBS-01P</td><td>250</td><td>500</td></tr>
<tr><td>PCAR-3</td><td>450</td><td>700</td></tr>
<tr><td>PCAR-4</td><td>250</td><td>500</td></tr>
<tr><td>PCAR-7</td><td>250</td><td>500</td></tr>
<tr><td>PCAR-7C</td><td>250</td><td>500</td></tr>
</table>
</td><td>Reporte de análisis de causalidad a SMA y DGA en plazo de 12 meses desde la activación de umbral intermedio.
Entrega de Informe de efectividad a la SMA y la DGA en el mes 14 contado desde el inicio efectivo de operación de la barrera hidráulica. Esto ante la superación de umbral límite.</td></tr>
</table>

Fuente: Elaboración propia.

2.6 Plan de acción

2.6.1 Se requiere un plan de acción por riesgos ambientales relacionados a las distintas etapas del proyecto de recarga artificial considerando, por ejemplo, una eventual contaminación de las aguas subterráneas en el sector influenciado por la recarga artificial, lo cual puede traducirse en efectos sobre el medio ambiente o la población.

Se presenta a continuación un Plan de Acción, que establece las medidas de prevención, control y respuesta frente a la detección de cambios significativos en la calidad de las aguas subterráneas o contingencias que puedan afectar al sector influenciado directamente por la recarga artificial. Este plan se aplicará durante la operación de la Barrera Hidráulica (BH) y, cuando corresponda, durante la fase de cierre de las obras asociadas.

El plan identifica los principales riesgos ambientales asociados a la operación de la recarga artificial, incluyendo el uso de agua que no cumpla con los criterios de calidad definidos, la migración de contaminantes en el acuífero, la modificación de niveles freáticos, la falta de suministro de agua, fallas operativas, obstrucción de pozos y riesgos asociados al cierre de las obras.

Las medidas indicadas en la Tabla 22 consideran acciones de control, seguimiento, mantenimiento y comunicación a la autoridad, con el objeto de asegurar la protección del acuífero principal UH-5 y la efectividad de la BH.

Tabla 22. Plan de acción asociado a la BH en las distintas etapas del Proyecto

Fase	Riesgo	Medida de Control	Efecto Esperado	Plazo / Frecuencia	Indicador de efectividad	Oportunidad y vías de comunicación
Operación	Contaminación del acuífero por uso de agua a recargar con parámetros fuera de norma.	Usar agua a recargar que cumpla con los indicadores de cumplimiento establecidos en el Plan de Monitoreo.	Detener la pluma de sulfatos que avanza hacia el Salar de Cere.	Cada vez que se detecte que la calidad del agua a recargar no cumple con los indicadores de cumplimiento correspondientes a los parámetros establecidos en el Plan de Monitoreo.	Registros de calidad evidenciando cumplimiento y recuperación de parámetros de calidad de agua a recargar.	En caso de detectarse alteraciones en la calidad del acuífero, variaciones en sus niveles o cualquier riesgo asociado a fallas operativas, se notificará a la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA) de la Región de Antofagasta, mediante carta enviada a través de la plataforma web (http://www,sma,gob,cl), en un plazo máximo de 15 días contados desde la activación del Plan de Acción.
	Migración de contaminantes en el acuífero.	Refuerzo de caudales en BH negativa mediante bombeo correctivo.	Contención y reducción de anomalías.	Mientras dure la anomalía.	Informes de monitoreo evidenciando reducción de concentraciones.	
	Modificación de los niveles freáticos en la hidrogeología local.	Monitoreo piezométrico continuo; ajuste de caudales según respuesta del acuífero.	Mantener niveles bajo los umbrales límite indicados en el Plan de Monitoreo.	Permanente durante operación.	Informes de niveles freáticos dentro de rangos.	
	Falta de agua desde la planta desaladora.	Uso de fuentes complementarias de abastecimiento, tales como DAA vigentes del Titular o agua adquirida a terceros autorizados, siempre que cumplan previamente con los criterios de calidad.	Evitar interrupciones en la operación de la BH.	Permanente durante operación.	Comprobantes de adquisición de agua de terceros.	
	Falla de red de abastecimiento (roturas, filtraciones).	Mantenimiento preventivo de la red.	Evitar interrupciones en la operación de la BH.	1 vez al mes.	Informes de mantenimiento.	
	Falla de bombas de inyección o extracción.	Mantenimiento de bombas.	Evitar interrupciones en la operación de la BH.	1 vez al mes.	Informe de mantenimiento de bombas.	
	Obstrucción de pozos por colmatación u otras causas.	Limpiezas preventivas y mantenimiento.	Evitar interrupciones en la operación de la BH.	Cada 6 meses.	Informe de mantenimiento de pozos.	
Cierre	Contaminación del acuífero por pozos mal cerrados o intervenidos.	Sellado y mantención del cierre (reemplazo de tapas y/o candados).	Prevenir ingreso de contaminantes al acuífero.	1 vez al año, hasta 5 años posteriores al cierre.	Informe de mantención de pozos cerrados.	

Fuente: Elaboración propia.

2.6.2 El plan de acción debe señalar claramente, para cada riesgo identificado en las distintas etapas del proyecto, la(s) medida(s) a adoptar con el respectivo efecto esperado, los plazos de ejecución de las medidas y los indicadores de efectividad de éstas. Las medidas deberán ser consistentes con las características de las obras, con el acuífero a recargar y las zonas ambientales sensibles o la población eventualmente afectada dentro del sector influenciado por la recarga. Asimismo, el plan de acción deberá indicar la oportunidad y vías de comunicación a la Superintendencia del Medio Ambiente para la activación de dicho plan.

Se presenta en la Tabla 22 el Plan de Acción, que establece las medidas de prevención, control y respuesta frente a la detección de cambios significativos en la calidad de las aguas subterráneas o contingencias que puedan afectar al sector influenciado directamente por la recarga artificial. Este plan se aplicará durante la operación de la Barrera Hidráulica (BH) y, cuando corresponda, durante la fase de cierre de las obras asociadas.

El plan identifica los principales riesgos ambientales asociados a la operación de la recarga artificial, incluyendo el uso de agua que no cumpla con los criterios de calidad definidos, la migración de contaminantes en el acuífero, la modificación de niveles freáticos, la falta de suministro de agua, fallas operativas, obstrucción de pozos y riesgos asociados al cierre de las obras.

Las medidas indicadas en la Tabla 22 consideran acciones de control, seguimiento, mantenimiento y comunicación a la autoridad, con el objeto de asegurar la protección del acuífero principal UH-5 y la efectividad de la BH.

2.6.3 Durante la posterior tramitación sectorial, antes del inicio de la fase de construcción, se deberá presentar el plan de acción que incorpore las observaciones o condiciones indicadas por los OAECA.

El Titular se compromete a que, durante la posterior tramitación sectorial y previo al inicio de la fase de construcción, se presentará este plan de acción actualizado, incorporando todas las observaciones y condiciones establecidas por los OAECA. Asimismo, el titular se responsabiliza de garantizar el cumplimiento de dicho plan, asegurando que las medidas sean implementadas y verificables ante la autoridad competente.

Apéndice A Plan de Vigilancia Ambiental (PVA)

Anexo 2 - Actualización del PAS 158

EIA “Continuidad del Proceso de Lixiviación y Adecuaciones al Proyecto Minero División Radomiro Tomic”

Codelco Chile

16-11-2026

SLR

Apéndice B Interpretación de Ensayos Hidráulicos

Anexo 2 - Actualización del PAS 158

EIA “Continuidad del Proceso de Lixiviación y Adecuaciones al Proyecto Minero División Radomiro Tomic”

Codelco Chile

16-11-2026

SLR

Apéndice C Archivo KMZ

Anexo 2 - Actualización del PAS 158EIA “Continuidad del Proceso de Lixiviación y Adecuaciones al Proyecto Minero División Radomiro Tomic”

Codelco Chile

16-11-2026

Apéndice D Plan de Alerta Temprana (PAT)

Anexo 2 - Actualización del PAS 158

EIA “Continuidad del Proceso de Lixiviación y Adecuaciones al Proyecto Minero División Radomiro Tomic”

Codelco Chile

16-11-2026

SLR

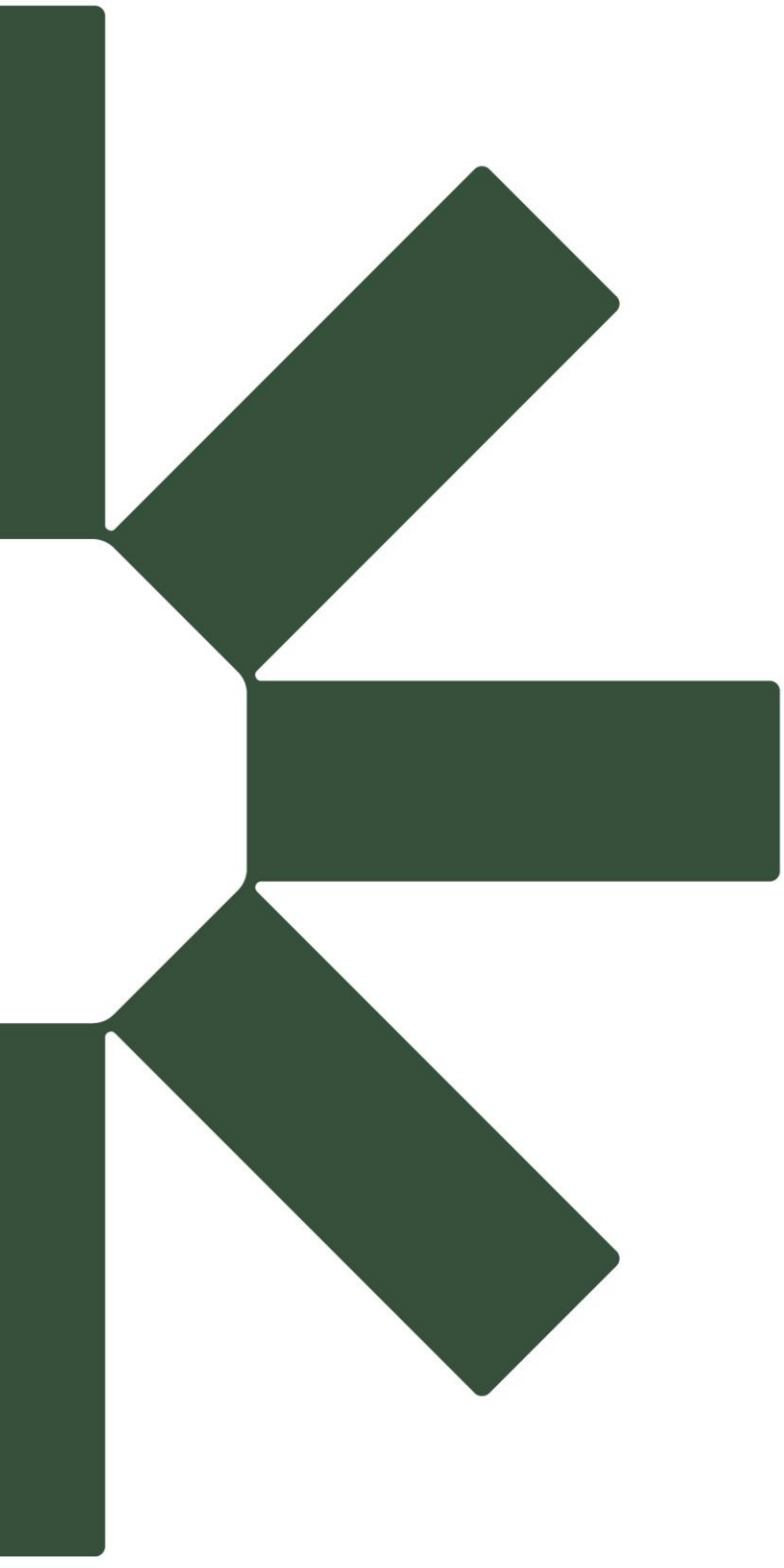
Apéndice E Plantilla Base de Datos

Anexo 2 - Actualización del PAS 158

EIA “Continuidad del Proceso de Lixiviación y Adecuaciones al Proyecto Minero División Radomiro Tomic”

Codelco Chile

16-11-2026



Making Sustainability Happen