

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Ingeniería Comercial

Departamento de Obras Civiles

ALTERNATIVAS PARA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS, EN EL SECTOR NORESTE DE LA COMUNA DE CALAMA

Manuel Alejandro Valdés Vera

MAGÍSTER EN GESTIÓN DEL AGUA

OCTUBRE 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☐ Memoria o trabajo de título ☒ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Alternativas para recarga artificial de acuíferos, en el sector noreste de la comuna de Calama.

Nombre del candidato(a): Manuel Alejandro Valdés Vera

Carrera / Grado: Magíster en Gestión del Agua – Master of Water Management

Campus: Vitacura **Departamento:** Ingeniería Comercial /Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, **Marcelo Bravo Fortune**, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 26-10-2026 Firma:

Estudiante o Candidato(a)

Fecha: 26-10-2026 Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

MAGÍSTER EN GESTIÓN DEL AGUA
MWM MASTER OF WATER MANAGEMENT

Departamento de Ingeniería Comercial

Departamento de Obras Civiles

ALTERNATIVAS PARA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS, EN SECTOR NORESTE DE LA COMUNA DE CALAMA

Tesis de magíster presentada por

Manuel Alejandro Valdés Vera

Como requisito para optar al Grado de

MAGÍSTER EN GESTIÓN DEL AGUA

Director de Tesis:

Mg. Marcelo Bravo Fortune

Octubre 2026

TÍTULO DE TESIS:

Alternativas Para Recarga Artificial de Acuíferos, en Sector Noreste de la Comuna de Calama

AUTOR:

MANUEL ALEJANDRO VALDÉS VERA

TRABAJO DE TESIS, presentando en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de MAGÍSTER EN GESTIÓN DEL AGUA – MASTER OF WATER MANAGEMENT de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Observaciones:

_____

_____

Mg. Marcelo Bravo Fortune.

Director de Tesis

Dra. Vivian Aranda Núñez.

Correferente Interno

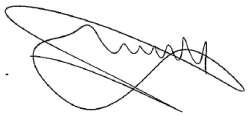
Mg. José Verdugo Cerón.

Correferente Externo

Santiago, Octubre 2026

Todo el contenido, análisis, conclusiones y opiniones vertidas en este estudio son de mi exclusiva responsabilidad.

Nombre: Manuel Alejandro Valdés Vera

Firma: 

Fecha: Santiago, octubre de 2026

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a mi familia, esposa y a todos los que de alguna otra forma me soportaron durante estas largas jornadas de trabajo

Agradecer a mi esposa quien a partir de sus sabios consejos me lanzaba al termino de mis metas

Dedicado a mi madre y abuela quienes son el faro heredado de esfuerzo, constancia y resiliencia que he aprendido a cultivar

A mis amigos y colegas cercanos quienes fueron testigos y apoyo de momentos incansables

Dedicado a todos mis sobrinos, presente y futuro que han de construir

Finalmente agradecer a mis compañeros de generación quienes con su energía y apoyo nos acogieron y empujaron siempre

RESUMEN EJECUTIVO

Esta investigación de tesina para optar al grado de Magíster en Gestión del Agua por la Universidad Técnica Federico Santa María evalúa y propone alternativas técnicas, hidrogeológicas, ambientales y de gobernanza para la selección de métodos de Recarga Artificial de Acuíferos (RAA) en el sector noreste de la comuna de Calama. La problemática se enmarca en una zona de alta influencia de procesos mineros y que enfrenta un desequilibrio hídrico del Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC) Calama, donde las recargas son naturalmente bajas, lo cual contrasta con derechos de aprovechamientos otorgados y las demandas comprometidas por el sistema de más de 31 millones de m^3/año frente a una oferta sustentable de solo 4,1 millones de m^3/año, lo que motivó su declaración como área de prohibición por parte de la Dirección General de Aguas (DGA). En este contexto, el proyecto "Desarrollo Futuro DMH" de Codelco (División Ministro Hales), aprobado mediante la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) N° 114/2026 para operar hasta el año 2054, asumió la implementación de barreras hidráulicas y un sistema de RAA bajo el Permiso Ambiental Sectorial PAS 158, destinado a mitigar los efectos del cono de depresión presupuestado por el desaguado del rajo mina, con el objeto de resguardar las nacientes del Río San Salvador y contener/diluir la pluma histórica de sulfatos proveniente del Complejo Industrial y del Tranque de relaves Talabre. El estudio analiza el marco regulatorio nacional e internacional respaldado por la Reforma al Código de Aguas de 2022 (Ley N° 21.435, arts. 66 bis, ter y quáter), que formalizó el uso de agua de mar desalinizada y la constitución de derechos de recuperación, así como la caracterización hidrogeológica del sector compuesta por el Acuífero Superior (ACS / Opache), el Acuitardo Central (ACT) y el Acuífero Inferior (ACI / Calama), los cuales presentan una calidad basal comprometida por altas concentraciones de Arsénico y Sulfatos. Mediante una propuesta de evaluación multicriterio, la presente tesis analiza y concluye que los métodos superficiales (piscinas y zanjas de infiltración) son altamente factibles de implementar en la Unidad mp1 (abanicos/piedemonte), mientras que los pozos de inyección profunda (ASR) son indispensables para alcanzar el ACI profundo (>80–100 m) y controlar directamente el cono de depresión del rajo mina. Asimismo, en base a los análisis realizados, se descartan los sectores Sur y Sur-poniente por su lejanía e hidrología compleja frente a la alta densidad de Grupos Humanos Pertenecientes a Pueblos Indígenas (GHPPI) y organizaciones civiles presentes, determinando que la estrategia óptima para Codelco es un esquema híbrido de inyección profunda ASR en el entorno inmediato de DMH combinado con piscinas en la unidad mp1 sobre terrenos de su propiedad minera, utilizando preferentemente agua desalinizada con un grado de tratamiento para evitar la colmatación por sulfatos o la movilización de arsénico basales, lo anterior integrando la operación dinámicamente al Plan de Alerta Temprana (PAT) y al Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) con foco en transparencia abierta a la comunidad.

ABSTRACT

This master's thesis research to qualify for the Master of Water Management degree at Universidad Técnica Federico Santa María evaluates and proposes technical, hydrogeological, environmental, and governance alternatives for selecting Managed Aquifer Recharge (MAR) methods in the northeastern sector of the municipality of Calama. The problem is framed within an area heavily influenced by mining operations and facing a severe water imbalance in the Calama Common Use Hydrogeological Sector (SHAC Calama), where natural recharge is extremely low, contrasting with granted water allocation rights and system-committed demands exceeding 31 million m^3/year against a sustainable supply of only 4.1 million m^3/year, which prompted its designation as a prohibition area by the National Water Directorate (DGA). In this context, Codelco's "Desarrollo Futuro DMH" project (Ministro Hales Division), approved under Environmental Qualification Resolution (RCA) No. 114/2026 to operate until the year 2054, undertook the implementation of hydraulic barriers and a MAR system under Sectoral Environmental Permit PAS 158, designed to mitigate the impacts of the drawdown cone projected from open-pit dewatering, aiming to protect the headwaters of the San Salvador River and contain/dilute the historical sulfate plume originating from the Industrial Complex and the Talabre Tailings Dam. The study analyzes the national and international regulatory frameworks backed by the 2022 Water Code Reform (Law No. 21,435, Arts. 66 bis, ter, and quáter), which formalized the use of desalinated seawater and the establishment of recovery rights, as well as the hydrogeological characterization of the sector comprising the Upper Aquifer (ACS / Opache), the Central Aquitard (ACT), and the Lower Aquifer (ACI / Calama), all of which exhibit baseline water quality compromised by high concentrations of Arsenic and Sulfates. Through a proposed multicriteria evaluation, this thesis analyzes and concludes that surface methods (infiltration basins and trenches) are highly feasible to implement in Unit mp1 (alluvial fans/piedemonte), whereas deep Aquifer Storage and Recovery (ASR) injection wells are essential to reach the deep ACI (>80–100 m) and directly control the open-pit drawdown cone. Furthermore, based on the analyses conducted, the Southern and Southwestern sectors are ruled out due to their distance and complex hydrology relative to the high density of Indigenous Human Groups (GHPPI) and civil organizations present, establishing that the optimal strategy for Codelco is a hybrid scheme combining deep ASR injection in the immediate vicinity of DMH with surface basins in Unit mp1 on Codelco-owned mining property, preferably utilizing desalinated water with an appropriate degree of treatment to prevent clogging by sulfates or the mobilization of baseline arsenic, dynamically integrating the operation into the Early Warning Plan (PAT) and the Environmental Monitoring Plan (PSA) with a focus on open transparency toward nearby communities.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN 13

2 ORIGEN, PROPÓSITO Y ALCANCES DEL ESTUDIO 14

3 OBJETIVOS 20

4 ALCANCE DEL ESTUDIO 22

4.1 ESTADO DEL ARTE 23

4.1.1 Revisión bibliográfica del estado del arte 23

4.1.2 Conocer y documentar la información desarrollada de las diferentes alternativas de Recarga Artificial de Acuíferos (RAA) 26

4.1.3 Proyectos y estudios de recarga artificial en Chile 30

4.1.4 Identificar y revisar el marco normativo actual en Chile y el mundo de la RAA 36

4.1.5 Identificar como se asocian los diferentes conocimientos adquiridos 40

4.1.6 Comprender y revisar los diferentes métodos existentes para efectuar una recarga artificial de acuíferos 42

4.2 SUJETO ESTUDIO 44

4.2.1 Descripción y caracterización general física de la zona de Calama 45

4.2.2 Red hidrográfica: Cuenca del río Loa 53

4.2.3 Sistema acuífero de Calama 55

4.2.4 Gobernanza hídrica y desafíos institucionales 59

4.3 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS Y BASE DE ESTUDIOS DGA 61

4.4 DIVISIÓN MINISTRO HALES DE CODELCO 63

4.4.1 Tramitación de Permiso Ambiental Sectorial (PAS) del artículo 158 del D.S. 67

4.5 MARCO TEÓRICO DEL ESTADO DEL ARTE 70

5 PROPUESTA METODOLOGICA DE TRABAJO 71

6 APLICACIÓN METODOLOGICA 76

6.1 BASES DE IMPLEMENTACIÓN 76

6.1.1 Identificación de métodos de recarga aplicables (información secundaria) 76

6.1.2 Análisis de parámetros de calidad de aguas e hidráulicos 85

6.1.3 Visualizar posibles brechas y desafíos de información en relación con la RAA 99
6.1.4 Definir criterios para seleccionar alternativas de sectores. Se busca detallar alternativas para efectuar una RAA en la zona de estudio. 105
6.2 EVALUACIÓN TÉCNICA CUANTITATIVA DE LOS MÉTODOS SELECCIONADOS 108
6.3 ANÁLISIS ESPACIAL DE MÉTODOS Y SU GRADO DE FACTIBILIDAD 112
6.4 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE ZONAS PARA IMPLEMENTAR LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS 118
7 RESULTADOS 122
7.1 RESULTADOS DE LOS MÉTODOS EVALUADOS 122
7.2 SECTORES FAVORABLES Y EXCLUYENTES 125
8 CONCLUSIONES 128
9 RECOMENDACIONES 130
10 BIBLIOGRAFÍA Y WEBGRAFÍA 134
11 GLOSARIO Y ACRONIMOS 138
12 ANEXOS 141
12.1 ANEXO: EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO DE CALAMA (SECTOR DMH) 141
12.2 ANEXO: FICHAS BIBLIOGRÁFICAS 144

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Origen, propósitos de la tesis 18
Tabla 2 Revisión Bibliográfica 23
Tabla 3 Proyectos de recarga internacionalmente Desarrollados 28
Tabla 4 Cuadro resumen de materiales relacionados con la RAA 41
Tabla 5 Métodos comunes de RAA 42
Tabla 6 Resumen general de condiciones climáticas Calama 52
Tabla 7 Principales ejes hídricos Calama 53
Tabla 8 Balance hídrico cuenca Calama. 53
Tabla 9 Características SHAC Calama 55
Tabla 10 Estudios de caracterización en la zona de Calama 61
Tabla 11 Medida DMH 68
Tabla 12 Parámetros de calidad del agua de inyección (Planta Desaladora) 69
Tabla 13 Cronograma de etapas y alcances del estudio 75
Tabla 14 Clasificación métodos recarga según CNR 77
Tabla 15 Cuadro Métodos Aplicables SHAC Calama 79
Tabla 16 Criterios para selección Métodos RAA 81
Tabla 17 Principales indicadores para selección de posibles zonas. 84
Tabla 18 Concentraciones acuífero superior de sectores hidrogeológicos de Calama. 88
Tabla 19 Concentraciones acuífero inferior de sectores hidrogeológicos de Calama. 89
Tabla 20 Comparación de normativas vs concentraciones en sectores hidrogeológicos de Calama. 90
Tabla 21 Valores representativos de conductividad hidráulica por acuífero de sectores hidrogeológicos en sectores de Calama. 96
Tabla 22 Valores representativos de almacenamiento por acuífero de sectores hidrogeológicos en sectores de Calama 99
Tabla 23 Evaluación de Métodos de Recarga Calama 109
Tabla 24 Cuadro resumen criterios 121

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Consumo proyectado de agua en la minería del cobre (2024-2034) según el informe de la Comisión Chilena del Cobre (2026) 17
Gráfico 2 Distribución de las solicitudes formales de proyectos de recarga artificial de acuíferos ingresadas a la DGA (2015–2023) por región del país. 34
Gráfico 3 Extracciones de aguas subterráneas en la ciudad de Calama. 92
Gráfico 4 Niveles de aguas subterráneas en la ciudad de Calama, acuífero superior. 94
Gráfico 5 Niveles de aguas subterráneas en la ciudad de Calama, acuífero inferior. 95
Gráfico 6 Conductividades (m/d) por sector en Calama, acuífero superior. 97
Gráfico 7 Conductividades (m/d) por sector en Calama, acuífero inferior. 98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama conceptual de los procesos de recarga y descarga de un acuífero 15
Figura 2 Zona alcance del estudio 22
Figura 3 Proyectos de recarga artificial de acuíferos internacionales 29
Figura 4 Barreras hidráulicas DMH 31
Figura 5 Pozos recarga Aguas Andinas, Lo Barnechea 33
Figura 6 Métodos de recarga 43
Figura 7 Ubicación geográfica Región de Antofagasta 46
Figura 8 Mapa geomorfológico local 49
Figura 9 Carta geológica Calama. 50
Figura 10 Mapa geológico y área de estudio 51
Figura 11 Cuencas hidrográficas Región de Antofagasta 54
Figura 12 SHAC Calama, región de Antofagasta 56
Figura 13 Niveles piezométricos acuífero superior 57
Figura 14 Niveles piezométricos acuífero inferior 58
Figura 15 Secciones hidrogeológicas DMH 58
Figura 16 Gobernanza de proyectos RAA en Chile 60
Figura 17 PSA DMH. 64
Figura 18 Barreras Hidráulicas DMH 65
Figura 19 Puntos de control PAT DMH 66
Figura 20 Pozos de inyección para recarga artificial y pozos de monitoreos DMH 69
Figura 21 Mapa Conceptual 70

Figura 22 Métodos de Recarga Artificial de Acuíferos Aplicados en Chile 78
Figura 23 Red de monitoreo hidroquímica subterránea Codelco. 86
Figura 24 Red de monitoreo hidroquímica subterránea Codelco. 87
Figura 25 Zona predefinida para ubicación de pozos de inyección. 87
Figura 26 Ubicación de pozos en el sector de Calama. 91
Figura 27 Ubicación de pozos y sondajes con información estratigráfica en Calama 92
Figura 28 Sectores de pozos con información niveles en el sector de Calama. 93
Figura 29 Sector DMH con pozos con información niveles en el sector de Calama, acuífero superior. ... 94
Figura 30 Sector DMH con pozos con información niveles en el sector de Calama, acuífero inferior. 96
Figura 31 Procedimiento para la identificación de zonas favorables 106
Figura 32 Zonas de restricción Calama 107
Figura 33 Usos del Suelo Calama 113
Figura 34 Viabilidad socioeconómica 115
Figura 35 Areas de restricciones ambientales, puntos de monitoreos 117
Figura 36 Unidades geológicas y área de estudio 123

1 INTRODUCCIÓN

La investigación tiene como propósito principal evaluar y proponer alternativas técnicas y ambientales para la implementación de la Recarga Artificial de Acuíferos (RAA) en el sector noreste de la comuna de Calama, respondiendo a la situación crítica de disponibilidad hídrica y al agotamiento del recurso en el Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC) Calama. El estudio se fundamenta en la necesidad de mitigar los impactos generados por la actividad minera, específicamente asociados al proyecto "Desarrollo Futuro DMH" de Codelco, el cual requiere el uso de barreras hidráulicas de inyección para controlar el descenso de los niveles freáticos y mejorar la calidad química del acuífero frente a contaminantes como sulfatos y arsénico. Los objetivos centrales se enfocan en identificar alternativas de métodos aplicables que existen en la actualidad —como pozos de inyección y piscinas de infiltración entre otros y definir criterios de selección de zonas basados parámetros críticos y objetivos como la transmisividad, capacidad de almacenamiento y factores de viabilidad socioambiental.

Como resultados esperados, la tesis busca entregar un marco de criterios sistematizados que incluya una matriz multicriterio que sirva como una herramienta para las orientaciones y una escala de valoración de sectores con mayor potencial de recarga, proporcionando así herramientas técnicas que sustenten la toma de decisiones que asegure la sustentabilidad hídrica de la región hasta el año 2054.

Para alcanzar los fines expresados anteriormente, el informe se estructura descriptivamente en secciones que abarcan, en primer lugar, el origen, propósito y alcances del estudio, seguido por la definición de objetivos y un exhaustivo estado del arte que sistematiza experiencias nacionales e internacionales en conjunto con el marco normativo vigente. Posteriormente, se establece el sujeto de estudio mediante la caracterización física y de gobernanza que se mantiene en torno al acuífero de Calama, además se integra un marco teórico que sustenta el modelo conceptual de la investigación basado en las fuentes secundarias recabadas principalmente de informes públicos emitidos en procesos ambientales por Codelco e información técnica emitida por las autoridades.

Para la fase operativa del informe, se desarrolla a través de una propuesta metodológica que identifica métodos aplicables y analiza datos hidroquímicos e hidráulicos para detectar brechas de información, lo que deriva en la aplicación metodológica donde se realiza la evaluación cuantitativa de métodos y la zonificación de factibilidad. Finalmente, el documento presenta y analiza los resultados consolidados y sus posibles efectividades, las conclusiones integran variables económicas, ambientales y sociales, y las recomendaciones profesionales para orientar la toma de decisiones.

2 ORIGEN, PROPÓSITO Y ALCANCES DEL ESTUDIO

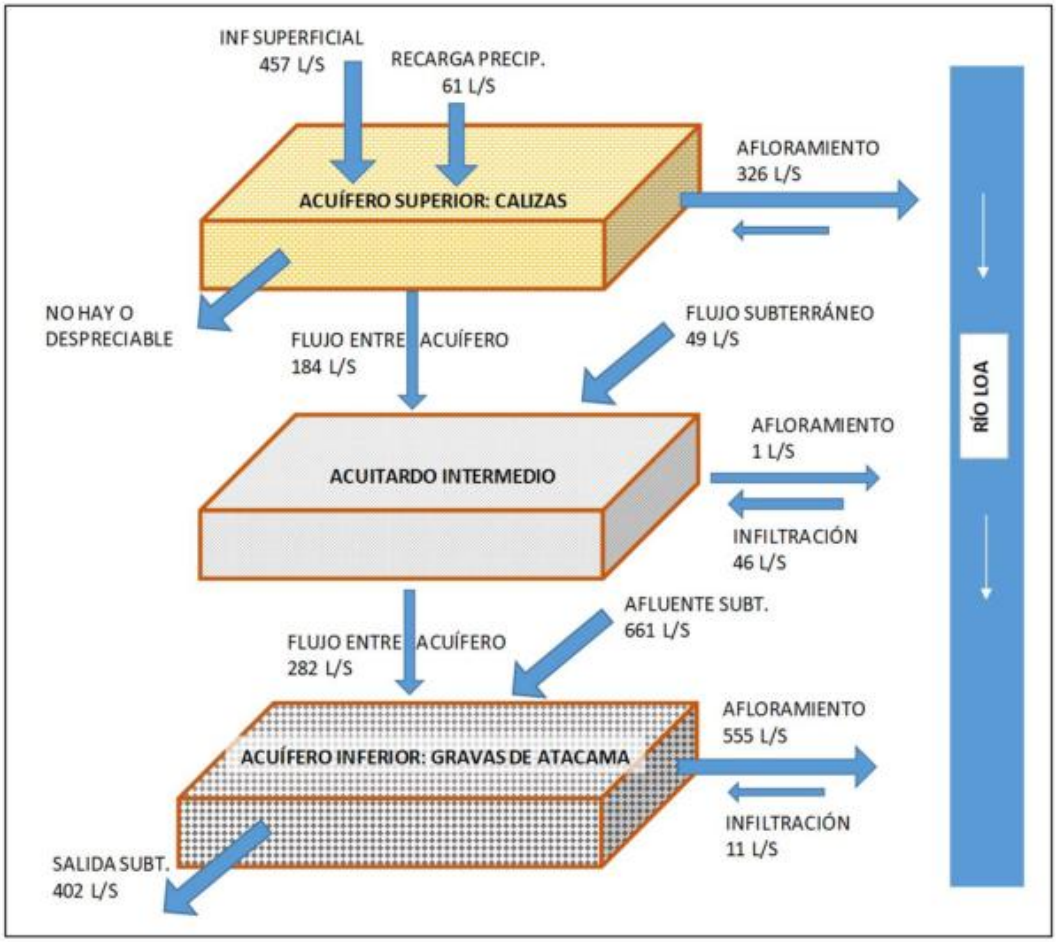
La ciudad de Calama ubicada en la región de Antofagasta cuenta con un alto grado de desarrollo de operaciones y proyectos mineros, lo cual ha arrastrado consecuencias de tipo positivas como efectos negativos en términos ambientales, uno de estos efectos ha sido detrimento de niveles freáticos y calidades del recurso hídrico subterráneo existente por efecto de las labores de faena actuales y de situaciones históricas. Debido a ello, en la actualidad se cuenta con la necesidad de contar con alternativas para implementar acciones inmediatas e idóneas que puedan ser una solución a la problemática ambiental planteada. Debido a ello, se ha planteado desarrollar en la actualidad un estudio y análisis especifico con un enfoque técnico ambiental que evalué las posibles alternativas aplicables y sus resultados, aportando con ello a la adecuada toma de decisiones. El enfoque del presente estudio es de tipo descriptivo que reúne la necesidad de caracterizar variables de tipo técnicas hidrogeológicas en conjunto con un enfoque de tipo causal, donde se considerará la revisión de antecedentes e informes realizados.

Para una mejor comprensión de la zona de estudio, el sector de Calama se localiza en el norte de Chile, en la cuenca del río Loa (región de Antofagasta), una zona extremadamente árida y con recursos hídricos escasos en la que la minería, la agricultura y el crecimiento urbano ejercen una intensa presión sobre las aguas subterráneas. El informe de la Dirección General de Aguas (DGA) de 2014 denominado como "*Evaluación Hidrogeológica del Acuífero de Calama y del río Salado, usando Herramientas Isotópicas" señala* que el río Loa es el único curso de agua permanente del área y que en la última década la demanda de agua ha aumentado por la evolución de los sectores productivos, principalmente la minería, llevando la situación de los recursos hídricos subterráneos a un estado crítico. La autoridad DGA advierte que el sistema río–acuífero es muy delicado indicando que el acuífero se compone de un nivel freático superior (formación Opache**)**, de unos 50 m de espesor, con alta conexión hidrológica al río Loa, y un acuífero basal más profundo (formación Calama), de unos 150 m de espesor y más antiguo, con escasa permeabilidad y desconexión por la presencia de estratos confinados (DGA, 2014). La principal recarga natural procede de flujos subsuperficiales provenientes de la cuenca del río Salado y de aportes desde la cuenca del río Loa aguas arriba del embalse Conchi. Estas condiciones limitan la capacidad de renovación de las aguas subterráneas, especialmente en las unidades más antiguas, y hacen necesario un manejo cuidadoso para impedir la degradación del recurso.

Estudios técnicos recientes han cuantificado la recarga de tipo difusa en el Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC) Calama. Como datos de contexto, la consultoría de la DGA (Hídrica Consultores, 2017) identificó que la recarga directa es muy baja, a partir de las lluvias escasas que se precipitan sobre la cuenca, en promedios anuales se estiman aportes de alrededor de 0,32 mm/año en la estación de Calama (12,1 L/s), 0,63 mm/año en Chiu Chiu (13,7 L/s) y 1,71 mm/año en Conchi Embalse (7,8 L/s), lo que asciende a un total de 33,5 L/s sobre una superficie de 1.620 km², lo que soporta esta afirmación. El mismo estudio cuantificó los derechos de aprovechamiento

de aguas subterráneas reconocidos en el SHAC Calama, sumando alrededor de 560 L/s. La diferencia entre la recarga natural (aprox. 33,5 L/s) y los derechos otorgados (560 L/s) muestra una brecha significativa que explica el agotamiento del acuífero. De hecho, la DGA declaró en 2025 la zona como área de prohibición para nuevas extracciones de aguas subterráneas, debido a que demanda comprometida suman más de 31 millones de m³/año, mientras que la oferta sostenible o sustentable del acuífero se estima en 4,1 millones de m³/año (diariooficial.interior.gob.cl). Esta resolución prohibió otorgar nuevos derechos permanentes en el SHAC Calama y restringió las dotaciones provisionales a volúmenes muy reducidos (diariooficial.interior.gob.cl), evidenciando la severa descompensación entre oferta y demanda. La Figura 1 ilustra diagrama conceptual de recarga y descarga acuífero en el SHAC Calama por la autoridad en su último informe técnico (DGA, 2024). Este esquema muestra la infiltración difusa y focalizada de la precipitación y de cursos superficiales, así como la descarga a ríos, manantiales y zonas de evapotranspiración; la recarga natural suele ser limitada respecto de las extracciones humanas, por lo que la gestión adaptativa y la RGA son estrategias clave (bibliotecadigital.ciren.cl).

Figura 1 Diagrama conceptual de los procesos de recarga y descarga de un acuífero



Fuente: Hídrica Consultores, 2017

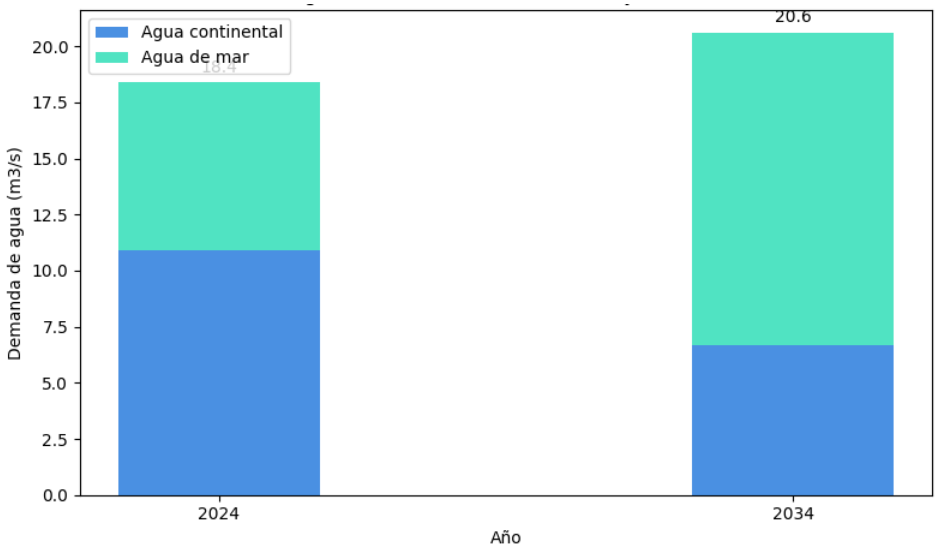
El acelerado desarrollo minero ha sido un factor central en la creciente presión sobre las aguas subterráneas. La tesina de Ignacio Bulboa (2017) identifica tres flujos regionales que alimentan la subcuenca de Pampa Llalqui al noreste de Calama, un flujo desde la Cordillera de los Andes que influye tanto en los acuíferos superior e inferior en las proximidades de la División Ministro Hales (DMH) y Minera Centinela ubicada hacia al noroeste de la región, un segundo flujo proveniente del río Tatio y un tercer flujo mixto que combina los aportes anteriores, indicando la compleja recirculación y la desconexión hidráulica parcial del acuífero inferior respecto del acuífero principal de la cuenca de Calama. Diversos estudios hidrogeológicos han descrito la relación dinámica entre el río Loa y el acuífero de Calama en áreas como Yalqui al este de la ciudad, el acuífero descarga sus aguas al río mediante manantiales y exfiltraciones difusas; mientras que en la parte oriental y meridional de Calama recibe agua del río Loa y la descarga hacia el río San Salvador y el manantial de Ojo de Apache, mostrando un sistema de flujo bidireccional que depende del gradiente hidráulico y de la operación de las captaciones (DGA, 2024).

El impacto minero en las aguas subterráneas ha sido considerable. La concentración de grandes operaciones cupríferas como Chuquicamata, Radomiro Tomic, Ministro Hales y Centinela ha incrementado la demanda y ha alterado los balances de recarga y descarga de la cuenca, como también sus calidades. De acuerdo con lo señalado en estudio de Evaluación Hidrogeológica del Acuífero de Calama y del río Salado de la DGA (2014), el crecimiento de los sectores productivos, especialmente mineros, ha intensificado la explotación del acuífero, reduciendo el caudal base del río Loa y poniendo en peligro ecosistemas asociados. Por otro lado, se verifica que varios proyectos mineros han integrado medidas de mitigación y uso sostenible, la evaluación ambiental del citado proyecto de la División Ministro Hales aprobada en 2026 indica precisamente que el proyecto, destinado a extender la vida útil de la mina hasta 2054, contempla abastecerse exclusivamente con agua de mar desalinizada y de terceros, y construir barreras hidráulicas para proteger el río San Salvador y el acuífero Calama–Yalquincha (SGA, 2025). Si bien estas prácticas muestran una desvinculación de las fuentes continentales, el desafío persiste para otras operaciones y captaciones históricas que siguen usando agua subterránea del SHAC.

Las tendencias del consumo de agua en la minería del cobre evidencian tanto la magnitud del problema como los esfuerzos de diversificación de fuentes. Según el informe “Proyección de la Demanda de Agua en la Minería del Cobre 2025-2034” publicado por la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO) en 2026, el consumo total de agua de la minería aumentará de 18,5 m³/s en 2024 a 20,6 m³/s en 2034, impulsado por proyectos de extracción de sulfuros y expansiones mineras (cochilco.cl). Sin embargo, la fuente de suministro está cambiando; el uso de agua de mar crecerá según estimaciones en alrededor de *7,5 m³/s a 13,9 m³/s*, mientras que el uso de agua continental disminuirá de *10,9 m³/s a 6,7 m³/s* (reporteminero.cl). Esto implica que la participación del agua de mar pasará del 40,7 % al 67,6 % del total consumido, llegando a aportar más de dos tercios del agua minera en 2034, con un 75 % de esa fracción procedente de desaladoras. La transición hacia fuentes marinas pretende reducir la presión sobre los acuíferos continentales, aunque la construcción de desaladoras y tuberías de agua de mar se concentra principalmente en el extremo norte del país, igualmente se estima que

el SHAC Calama seguirá enfrentando tensiones asociadas a captaciones históricas, sobreasignación de derechos y requerimientos de agua para nuevos proyectos. En Gráfico 1 de la Proyección de la demanda hídrica en la minería del cobre al 2034 elaborado a partir de los datos publicados por Cochilco, se observa en detalle el incremento de la demanda total (de 18,5 m³/s a 20,6 m³/s) y el notable desplazamiento desde agua continental hacia agua de mar desalinizada, que supondrá más del 67% del suministro en 2034 (Cochilco.cl; reporteminero.cl).

Gráfico 1 Consumo proyectado de agua en la minería del cobre (2024-2034) según el informe de la Comisión Chilena del Cobre (2026)



Fuente: elaboración propia, datos COCHILCO, 2026.

En este contexto, el propósito de la investigación es evaluar la viabilidad de aplicar alternativas para una Recarga Artificial de Acuíferos (RAA) en la zona el noreste de la ciudad de Calama a través de la revisión secundaria de fuentes que permitan verificar alternativas de medidas para mitigar en parte el desequilibrio hídrico y de calidad existente en la cuenca de Calama. Específicamente, este estudio busca enmarcarse dentro de los compromisos que debe llevar adelante la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO) en su proyecto calificado ambientalmente con una Resolución de Calificación Ambiental (RCA) 114/2026 llamado “Desarrollo Futuro DMH”, el cual se comprometió entre otros, implementar un sistema de recarga artificial de acuíferos como una medida de mitigación ambiental dentro de su operación hasta el año 2054 y que se estima permitirá controlar la calidad y descensos de niveles del acuífero de Calama cercanas al proyecto precisamente provocados por la explotación de esta operación. El actual enfoque se fundamenta en la bibliografía sobre recuperación de acuíferos y en experiencias internacionales de recarga de acuíferos, las cuales destacan la importancia de conjugar una estricta planificación y gestión de extracciones, con fuentes alternativas de recarga para alcanzar la sostenibilidad del recurso.

Dado este complejo contexto situacional del estado del acuífero Calama y los intensivos usos de recursos que plantean las operaciones mineras en el norte del país, se declaran en la Tabla 1 los orígenes, propósitos de la tesis.

Tabla 1 Origen, propósitos de la tesis

	EXPLICACIÓN
Características de la idea de la tesina o trabajo de postgrado	1. “Alternativas para la implementación de una recarga artificial de acuíferos en sector noreste de la ciudad de Calama”. Objetivo General Proponer alternativas de recarga artificial de acuíferos, en los alrededores de la ciudad de Calama durante el año 2026. Se Identificarán métodos actualmente implementados, y evaluando sus resultados en base a la información de campo disponible. El propósito es orientar la toma de decisiones para la ejecución de estos proyectos, ofreciendo diversas opciones.
Porque es una idea original, que es propia del alumno	La ciudad de Calama, ubicada en la región de Antofagasta, presenta un alto grado de desarrollo de labores y proyectos mineros. Esto ha generado tanto impactos positivos como negativos, siendo uno de los principales aspectos negativos lo relacionado con problemas de descenso de los niveles freáticos y la calidad del recurso hídrico subterráneo, consecuencia procedente tanto de las operaciones actuales como de condiciones históricas antrópicas. Dado lo anterior, existe la necesidad de implementar acciones mitigatorias inmediatas y adecuadas que puedan dar solución a esta problemática ambiental. Actualmente, no se dispone de estudios específicos con enfoque ambiental que detallen y evalúen alternativas factibles y sus resultados en términos de implementación, lo cual dificulta la correcta toma de decisiones.
Motivos personales o profesionales motivación por desarrollar el tema	Aportar información sistematizada y variables relevantes que permita ser utilizada en la toma de decisiones en este tipo de proyectos. Adicionalmente, la presente evaluación cuenta con una fuerte componente ambiental que aportaría beneficios concretos al ser aplicada en términos de sustentabilidad.
Objetivo es posible de lograr es un tema realista o aplicado	Se plantea un objetivo posible de realizar dado que existe bibliografía y datos de campo recientes al respecto que permiten evaluar su aplicabilidad. En términos de contexto, actualmente se cuenta con un compromiso ambiental para la implementación de este tipo de medidas, siendo una barrera hidráulica positivas (pozos de inyección) la única opción evaluada con bajo nivel de ingeniería y detalles, lo cual representa un alto riesgo para la Corporación en caso de que los resultados esperados al momento de su implementación no se adecuados ni suficientes en base a lo esperado.
Atractivo tema para la Gestión del Agua vinculado con el objetivo del magister del agua	El actual tema de análisis se vincula con la gestión y administración de aguas de forma aplicada a los proyectos, específicamente con los contenidos abordados en los módulos de “Evaluación de los Recursos”, “Gestión de la Captación y Tratamiento de Aguas” e “Innovación y Gestión de Proyectos”. Debido a aquello, se pretende

El problema investigado servirá para resolver un tema aplicado desde la perspectiva profesional	Se intenta resolver de forma específica identificar alternativas adicionales a los compromisos ya asumidos por una empresa y con ello aportar a la experiencia profesional en estas materias de forma aplicada
Otras características	Estudios hidrogeológicos precedentes se cuenta con información que describen el sector a ejecutar la recarga como heterogéneo, lo cual dificulta posibles pronósticos de resultados
	El análisis tomara datos secundarios bibliográficos con la finalidad de revisar casos aplicados y que cuenten como una posible alternativa al objetivo planteado
	Se espera que el estudio proporcione un conjunto de alternativas posible mediante orientaciones y criterios que sirvan de base para la toma de decisiones en proyectos mineros de recarga artificial de acuíferos en Calama.

Fuente: Elaboración propia.

3 OBJETIVOS

En atención a la identificación del problema se identifican posibilidades de análisis de opciones para realizar una recarga artificial de acuíferos (RAA) en la zona norte de la ciudad de Calama, lo anterior basado en fuentes secundarias tales como bibliografía, estudios existentes y desarrollados a la fecha, datos de campo existentes. Esta revisión permite evaluar de forma aplicada los distintos métodos existentes de acuerdo con literatura y que puedan ser factibles de implementar en la zona de estudio, asegurando con ello, que los proyectos que contengan este tipo de soluciones cuenten con orientaciones sistematizadas tanto de información técnica actualizada como en la experiencia local aplicada.

El análisis abordará los compromisos ambientales de la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) de la División Ministro Hales (Codelco). Actualmente, la propuesta del titular se limita a una barrera hidráulica mediante pozos de inyección (de tipo positiva) con un nivel de ingeniería preliminar que requiere fortalecimiento. En este contexto, se señalan el objetivo general y objetivos específicos para el desarrollo del estudio.

- **OBJETIVO GENERAL**

Proponer alternativas de recarga artificial de acuíferos (RAA), en la comuna de Calama, analizando integralmente los métodos existentes, su aplicabilidad y resultados, así como su relación con las zonas en uso que permitan genera orientar la toma de decisiones en la ejecución de este tipo de proyectos, considerando los compromisos ambientales asumidos por la Corporación Codelco durante la evaluación de su proyecto para la División Ministro Hales.

- **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

1. **Conocer** y documentar la información desarrollada a nivel nacional e internacional de las diferentes alternativas de recarga artificial (RAA)
2. **Revisar** el marco normativo actual en Chile y experiencias internacionales más relevantes
3. **Asociar** los diferentes conocimientos adquiridos del Magister en Gestión del Agua
4. **Comprender** y revisar los diferentes métodos existentes para efectuar una recarga artificial de acuíferos
5. **Inventariar y caracterizar** la información desarrollada en el SHAC de Calama
6. **Recopilar** la información técnica y sus resultados en relación con parámetros de calidad y niveles en el sector de interés de la investigación

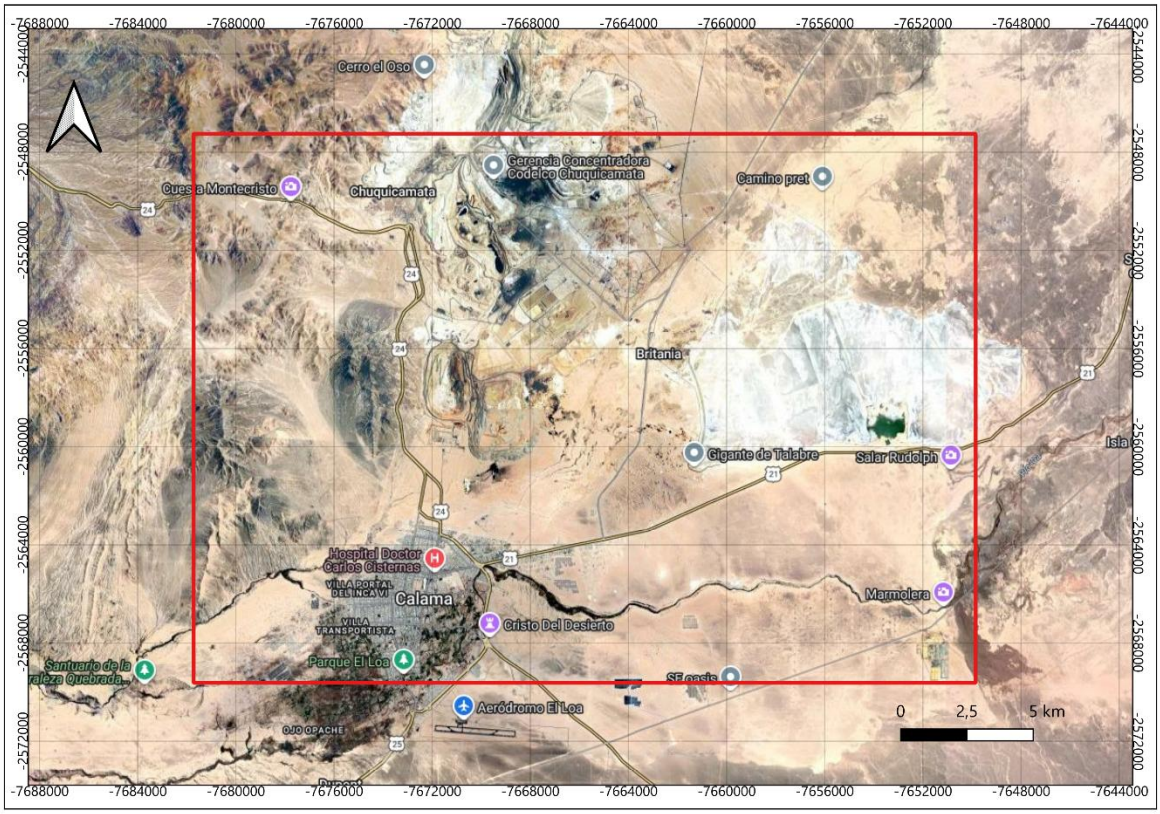
7. **Conocer y sistematizar** las experiencias desarrolladas de recarga artificial de acuíferos en la zona
8. **Formular** un marco teórico con todos los antecedentes del estado del arte
9. **Analizar** todos los datos existentes de parámetros técnicos hidroquímicos e hidráulicos de la zona hidrogeológica.
10. **Visualizar** las principales brechas de información existentes
11. **Definir** criterios que permitan seleccionar las mejores alternativas y sectores hidrogeológicos para realizar una RAA en el área de estudio definida
12. **Realizar** una evaluación cuantitativa de los métodos seleccionados
13. **Analizar** distintos métodos y su grado de factibilidad para implementar la recarga artificial de acuíferos
14. **Proponer** distintas opciones de zonas con factibilidad para implementar la recarga artificial de acuíferos
15. **Analizar** los diferentes resultados obtenidos mediante aplicación metodológica para los métodos evaluados
16. **Analizar** los diferentes resultados obtenidos mediante aplicación metodológica para las zonas evaluadas
17. **Concluir** en base a los resultados obtenidos de alternativas para métodos y sectores para efectuar recarga artificial en el sector de Calama
18. **Recomendar** los criterios y orientaciones que deben ser considerados para implementar estas alternativas evaluadas

4 ALCANCE DEL ESTUDIO

La investigación es de carácter descriptivo y correlacional. Caracteriza parámetros y variables tomadas desde estudios existentes asociadas a información hidrogeológica. En términos geográficos se enfoca como zona de estudio en la ciudad de Calama y sus alrededores, considerando principalmente los limites hidrogeológicos definidos por diversos estudios desarrollados. Se circunscribe al ámbito del sector minero, donde la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO) cuenta con gran parte de sus faenas productivas de cobre, en específico la División Ministro Hales, la cual recientemente ha impulsado la aprobación ambiental de su Proyecto “Desarrollo Futuro DMH” incorpora dentro de las medidas de mitigación realizar recarga artificial de agua en el acuífero Calama (sector Yalquincha) para robustecer y complementar la medida comprometida en su Resolución de Calificación Ambiental (RCA) Nº 311/2005 que se enmarca dentro del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones (PSCI).

A continuación, se presenta en Figura 2 zona alcance estudio, es delimitado cuadro en rojo que enmarca la zona donde se extraerán desde fuentes secundarias los datos y parámetros específicos y contenidos que serán objeto de análisis. Estos serán abordados de forma específica en el Capítulo 5 de Aplicación Metodológica

Figura 2 Zona alcance del estudio



Fuente: Elaboración propia.

El objetivo de estas medidas cuenta con dos ejes de aplicación, por una parte, es mejorar la calidad de las aguas subterráneas afectadas por las infiltraciones del tranque de relaves Talabre perteneciente a la División Chuquicamata en conjunto con la pluma histórica de sulfato proveniente del Complejo Industrial, siendo esta última, producto de operaciones mineras históricas. Por otra parte, se busca mantener los caudales superficiales del curso de aguas superficial llamado como Naciente del Río San Salvador y mitigar la posible disminución de los niveles del acuífero de Calama debido a la profundización del rajo de DMH y a la operación de las barreras hidráulicas del sector.

4.1 ESTADO DEL ARTE

Para conocer los principales estudios e información desarrollada en el área de estudio se procederá a sistematizar metodológicamente como se indica a continuación:

- Revisión Bibliográfica del estado del arte
- Conocer y documentar la información desarrollada de las diferentes alternativas de recarga artificial (RAA)
- Identificar y revisar el marco normativo actual en Chile y el mundo
- Identificar como se asocian los diferentes conocimientos adquiridos el Magister en Gestión del Agua.
- Comprender y revisar los diferentes métodos existentes para efectuar una recarga artificial de acuíferos

4.1.1 Revisión bibliográfica del estado del arte

Se desarrollo una revisión bibliográfica que abordo la revisión de los estudios y proyectos de recarga artificial desarrollados a la fecha que permitan levantar información secundaria para una base conceptual. Adicionalmente se desarrolló la búsqueda de informes y estudios complementarios. El resume se indica en la Tabla 2.

Tabla 2 Revisión Bibliográfica

N°	Lecturas Fundamentales	DESCRIPTOR/OBJETIVO
1	Bouwer, H. (2002). Artificial recharge of Groundwater: Hidrogeología and engineering. Hidrogeología Journal, 10, 121–142.	Revisión técnica clásica sobre métodos de recarga artificial, criterios hidrogeológicos y manejo de colmatación.
2	Dillon, P. (2005). Future management of aquifer recharge. Hidrogeología Journal, 13, 313–316.	Perspectiva sobre la gestión de recarga (MAR), tipos de MAR y recomendaciones para implementación y gobernanza.
3	Natural Resource Management Ministerial Council; Environment Protection and Heritage Council; National Health and Medical Research Council. (2009). Australian Guidelines for Water Recycling: Managed Aquifer Recharge (NWQMS Document 24).	Guía nacional australiana con criterios de selección de sitios, requisitos de calidad del agua y etapas de proyecto MAR.

4	Zheng, Y., Ross, A., Villholth, K. G., & Dillon, P. (Eds.). (2021). Managing Aquifer Recharge: A Showcase for Resilience and Sustainability. UNESCO.	Compendio de 28 estudios de caso internacionales y lecciones sobre gobernanza, calidad y beneficios de MAR.
5	U.S. Environmental Protection Agency. (2023). Enhanced Aquifer Recharge Research. EPA.	Investigación y directrices sobre recarga intencional (EAR/MAR), riesgos de calidad y prácticas de monitoreo en EE. UU.
6	IGRAC. (s. f.). Global Inventory of Managed Aquifer Recharge Schemes. IGRAC MAR Portal.	Inventario global de esquemas MAR; recurso para casos de estudio y mapas de idoneidad.
7	ASCE/EWRI. (2020). Standard Guidelines for Managed Aquifer Recharge (ASCE/EWRI 69-19). ASCE.	Estándar técnico para planificación, diseño, operación y cierre de proyectos MAR.
8	Comisión Nacional de Riego (CNR) y CSIRO. (2020). Guía metodológica: marco cooperativo para proyectos de recarga artificial de acuíferos.	Guía metodológica práctica para proyectos RAG en el sector agrícola en Chile.
9	Dirección General de Aguas (DGA). (2025). Circular y resoluciones sobre aplicabilidad y permisos para recarga artificial en Chile.	Documentación normativa y administrativa reciente sobre permisos PAS y requisitos técnicos en Chile.
10	Aguas Andinas. (2025). Proyecto pionero de recarga artificial del acuífero Mapocho Alto.	Caso práctico de recarga artificial urbana con autorización DGA y objetivos de seguridad hídrica.
11	Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO). (2023). Reglamentación y fichas técnicas sobre recarga gestionada en España.	Marco normativo y fichas técnicas para identificación de zonas potenciales y gobernanza en España.
12	Calderon, C. (2019). Aspectos jurídicos sobre la Recarga Artificial de Acuíferos (RAA). Revisión desde el derecho de aguas chileno, con referencia a España y Australia	Mirada jurídica de RAA
13	NRMMC-EPHC-NHMRC. (2009). AUSTRALIAN GUIDELINES 24 FOR WATER RECYCLING: MANAGING HEALTH AND ENVIRONMENTAL RISKS (PHASE 2), Managed Aquifer Recharge	Guías y lineamientos de MAR en Australia
14	SGMA. (2024). Sustainable Groundwater Management Act	Guia California (EEUU) para la gestión y protección de acuíferos
15	El Independiente. (2025). Israel, el paradigma de la reutilización de agua que ha acabado con la escasez	Israel, como caso y experiencia internacional
16	DGA. (2024). Circular N°3	Circular normativa que actualiza los criterios y requisitos técnicos de la RAA
17	DGA. (21 octubre, 2025). DGA expuso sobre recarga artificial de acuíferos en el Water Congress 2025 de Santiago	Se abordó la normativa existente, el procedimiento de solicitud de recarga y los desafíos para implementar esta solución basada en la naturaleza para asegurar la disponibilidad hídrica
18	Portal Frutícola. (2025). Recarga de acuíferos: la estrategia que gana terreno frente al estrés hídrico en Chile	Datos de escasez hídrica en chile actualizados
19	Ecured. (2018) Comuna de Calama	Datos geográficos de la ciudad de Calama
20	CIREN. (2021). RECURSOS NATURALES COMUNA DE CALAMA	Datos característicos físicos de la ciudad de Calama

21	CENSO. (2024). Resultados Región de Antofagasta Censo 2024	resultados estadísticos poblacionales de la ciudad de Calama
22	Sitrural.cl (2021). Sistema de información territorial rural, informes comunales	Características demográficas y de recursos naturales Calama
23	Gree, E. (2024). Comunidades de aguas subterráneas: el primer paso para la gestión integral de cuencas JVRE	Gobernanza de recursos hídricos subte arréenos en Chile
24	SGA Gestión Ambiental S.A. (2025). ACTUALIZACIÓN 2023 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL (Chile).	Evaluación ambiental de proyecto Desarrollo Futuro DMH
N.º	**Lecturas Complementarias y Sujeto Estudio**	**Objetivo del estudio**
1	CORFO & DGA. (1976). Investigación de los recursos hidráulicos en el Norte Grande. Santiago: CORFO/DGA.	Inventariar recursos hídricos regionales y establecer bases cartográficas iniciales.
2	IPLA & DGA. (1986). Mapa hidrogeológico nacional. Santiago: DGA.	Mapear unidades hidrogeológicas a escala nacional.
3	DGA. (1987). Balance hídrico de Chile. Santiago: Ministerio de Obras Públicas.	Estimar balances hídricos nacionales y metodologías de recarga.
4	Álamos, R., & Peralta, J. (1995). Estudio hidrogeológico sector Calama. Informe para Minera Leonor.	Describir arquitectura hidrogeológica local mediante trabajo de campo.
5	IPLA & DGA. (1995). Análisis de extracciones Calama–Quillagua (SIT Nº20). Santiago: DGA.	Cuantificar extracciones históricas y evaluar impacto sobre acuífero.
6	DARH & DGA. (2000). Solicitud de declaración de agotamiento Río Loa y afluentes. Santiago: DGA.	Documentar evidencia técnica-administrativa de agotamiento.
7	DEP & DGA. (2003). Evaluación de recursos hídricos Calama y Llalqui (SIT Nº85). Santiago: DGA.	Modelar recarga y caudales explotables sostenibles.
8	DEP & DGA. (2003). Modelación hidrogeológica Pampa Llalqui (SDT Nº152). Santiago: DGA.	Desarrollar modelos conceptuales y numéricos de dinámica acuífera.
9	Cade Idepe & DGA. (2004). Diagnóstico y clasificación de cursos y cuerpos de agua, cuenca Río Loa. Santiago: DGA.	Integrar caracterización de aguas superficiales y subterráneas.
10	DGA. (2014). Evaluación hidrogeológica del acuífero de Calama y del río Salado. Santiago: DGA.	Actualizar diagnóstico hidrogeológico y estado de explotación.
11	SGA Gestión Ambiental S.A. (2016). Experiencia de recarga gestionada de acuíferos en la cuenca de Santiago (Chile). Santiago: Universidad de Chile.	Documentar experiencias y lecciones aprendidas de proyectos de recarga gestionada.
12	Hídrica Consultores & DGA. (2017). Sectorización de acuíferos y estudio de recarga. Santiago: DGA.	Cuantificar recarga difusa y comparar con derechos reconocidos.
13	Bulboa, I. (2017). Tesina hidrogeológica local: Pampa Llalqui. Universidad de Chile.	Analizar circulación subterránea y desconexiones hidráulicas locales.
14	ALHSUD & SGA Gestión Ambiental S.A. (2019). Anexos: experiencias y comunicaciones sobre recarga artificial. Santiago: ALHSUD.	Recopilar experiencias internacionales y criterios de factibilidad.
15	AMPHOS21 & DGA. (s.f.). Recarga artificial de acuíferos: Diagnóstico de metodología para presentación y análisis de proyectos. Santiago: DGA.	Establecer metodología y criterios técnicos para proyectos de recarga artificial.

16	CNR & CSIRO. (2020). Marco operativo para proyectos de recarga artificial en acuíferos – Informe final (Anexos). Santiago: Comisión Nacional de Riego.	Detallar especificaciones técnicas para modelación, monitoreo y evaluación de RAA.
17	Valdés Vera, M. A. (2026). Alternativas para la implementación de recarga artificial de acuíferos en el sector noreste de Calama. Tesina de Magíster, Universidad Técnica Federico Santa María.	Evaluar factibilidad técnica y normativa de recarga artificial en Calama.
18	Codelco (14 de enero de 2026). Autoridad ambiental aprueba de manera unánime el proyecto que extiende la vida útil de la División Ministro Hales hasta 2054	Aprueba RCA extensión vida útil DMH
19	Bouwer, H. (2002). Artificial recharge of Groundwater: hidrogeología and engineering. Hidrogeología Journal, 10(1), 121–142.	Fundamenta riesgos de colmatación, diseño de caudales y prácticas MAR aplicadas a piscinas, zanjas y atrapamiento ribereño
20	Comisión Nacional de Riego (CNR) & CSIRO. (2020). Marco operativo para proyectos de recarga artificial de acuíferos – Ficha RAG y anexos. Santiago: CNR.	Guías metodológicas para proyectos de recarga artificial en Chile; rangos de diseño y caudales; aplicable a piscinas, zanjas y ASR
21	Dirección General de Aguas (DGA). (2014). Evaluación hidrogeológica del acuífero de Calama y del río Loa. Ministerio de Obras Públicas.	Datos de línea base piezométrica, niveles ACS/ACI y caracterización hidrogeológica; aplicable a todos los métodos
22	Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1998). Physical and Chemical Hidrogeología (2nd ed.). Wiley.	Fundamentos de transmisividad y propagación lateral de recarga; aplicable a piscinas, zanjas y atrapamiento ribereño
23	Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). Groundwater. Prentice-Hall.	Fundamentos de permeabilidad y flujo en medios porosos; aplicable a piscinas, zanjas y pozos vadose
24	Kruseman, G. P., & de Ridder, N. A. (1994). Analysis and Evaluation of Pumping Test Data (2nd ed.). International Institute for Land Reclamation and Improvement.	Metodología para estimar capacidad de almacenamiento y parámetros hidráulicos; aplicable a pozos vadose y ASR
25	Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural Waters. Applied Geochemistry, 17(5), 517–568.	Fundamenta riesgos por arsénico en aguas subterráneas; condiciona todos los métodos y obliga a tratamiento previo
26	Kruseman, G. P., & de Ridder, N. A. (1994). Analysis and Evaluation of Pumping Test Data (2nd ed.). International Institute for Land Reclamation and Improvement.	Metodología para estimar capacidad de almacenamiento y parámetros hidráulicos; aplicable a pozos vadose y ASR
27	Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural Waters. Applied Geochemistry, 17(5), 517–568.	Fundamenta riesgos por arsénico en aguas subterráneas; condiciona todos los métodos y obliga a tratamiento previo

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Conocer y documentar la información desarrollada de las diferentes alternativas de Recarga Artificial de Acuíferos (RAA)

La recarga artificial de acuíferos (RAA), conocida internacionalmente como Managed Aquifer Recharge (MAR), se define como “la introducción intencional de agua al subsuelo para incrementar la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos o

mejorar su calidad". En otras palabras, consiste en intervenir el ciclo hidrológico para almacenar agua en los acuíferos de forma planificada, sea con fines de extracción futura o para lograr un beneficio ambiental (p.ej., recuperar niveles freáticos, evitar la intrusión salina). A nivel global, la RAA se ha consolidado como una herramienta clave de gestión hídrica ante la escasez creciente de agua. Países como Alemania, Estados Unidos, Australia e Israel la emplean desde finales del siglo XIX –por ejemplo, la ciudad de Düsseldorf se abasteció 100% con agua recargada artificialmente– evidenciando que la RAA puede mejorar significativamente la seguridad hídrica durante sequías prolongadas (Amphos, 21, 2014). En términos de objetivos, las iniciativas de recarga artificial se han enfocado en buscar los siguientes objetivos:

Almacenar agua superficial excedente en épocas húmedas en el subsuelo, reduciendo pérdidas por evaporación y ampliando la disponibilidad en épocas secas;

Trasvasar agua de un lugar a otro usando el acuífero como medio de transporte natural;

Crear barreras hidráulicas que contrarresten problemas hidrogeológicos, como frenar el descenso de niveles freáticos, impedir la intrusión marina en zonas costeras, frenar la expansión de conos de depresión por bombeo minero, y

Prevenir la subsidencia del terreno asociada a la sobreexplotación. Entre los beneficios destacados de la RAA está el aprovechar la enorme capacidad de almacenamiento natural de los acuíferos (similar a grandes embalses) con menores costos y menor impacto ambiental que las represas tradicionales. Asimismo, al almacenar el agua bajo tierra, se minimiza la evaporación y se puede **mejorar la calidad** del agua gracias a la filtración natural en el suelo (remoción de sedimentos, nutrientes y patógenos). No obstante, la implementación exitosa de la recarga requiere condiciones técnicas adecuadas: acuíferos con suficiente porosidad y permeabilidad para aceptar el agua, fuentes hídricas de calidad apropiada (p.ej. aguas libres de contaminantes que puedan obstruir o degradar el acuífero) y monitoreo constante para evitar **colmatación** (obstrucción de poros) o contaminación del acuífero (CSIRO, 2020).

A continuación, se presenta en Tabla 3 los proyectos de recarga internacionalmente desarrollados que denotan la evolución de las principales iniciativas internacionales de recarga artificial de acuíferos desarrolladas y recopiladas en base a la información bibliográfica reciente analizada, esta incorpora el análisis desde los años 2000 en adelante ya que se visualiza es donde se acelera la evolución de políticas, lineamientos y desarrollo de iniciativas (AIH, 2005). Se evidencia que los objetivos más buscados fueron la gestión de la escasez hídrica, la protección de acuíferos, la reutilización de aguas y la resiliencia climática, mientras que los métodos utilizados consistieron en infiltración superficial, pozos de inyección, recarga con aguas residuales tratadas, entre otros.

Tabla 3 Proyectos de recarga internacionalmente Desarrollados

Año	Tipo de proyecto	Lugar	Tipo de recarga	Objetivos	Condiciones ambientales
2005	Estratégias de MAR em zonas semiáridas	Programa UNESCO – varios países	Infiltración superficial y pozos de inyección	Desarrollar lineamientos para implementar MAR en regiones áridas y semiáridas	Climas áridos, escasez hídrica, alta variabilidad estacional
2007	Inventario global de recarga artificial	IGRAC, Países Bajos	Diversos métodos (infiltración, pozos, estanques)	Catalogar proyectos de recarga artificial en el mundo	Diversidad de climas y tipologías de acuíferos
2010	Proyecto RECLAIM WATER	Estados Unidos, México, Israel, China, Singapur, Australia	Recarga con aguas residuales tratadas	Evaluar tecnologías de recarga con aguas residuales y procesos híbridos	Ambientes urbanos e industriales, presión hídrica creciente
2012	Inventario de sitios MAR en Europa	Alemania, España, Países Bajos	Infiltración controlada y recarga indirecta	Analizar desarrollo histórico y perspectivas de MAR en Europa	Climas templados y semiáridos, alta demanda agrícola
2014–2015	Proyecto MARSOL	España, Italia, Grecia	Infiltración superficial y recarga por canales	Demostrar MAR como solución a la escasez y sequías	Regiones mediterráneas semiáridas, sobreexplotación de acuíferos
2016–2019	Proyecto AquaNES	Alemania, India, Israel	Filtración en bancos y humedales artificiales	Integrar procesos naturales (MAR, filtración, humedales) con ingeniería	Diversidad climática: templado, árido y semiárido
2018	Inventario de 224 proyectos MAR en Europa	23 países europeos	Infiltración superficial y pozos de recarga	Proveer agua para consumo humano e irrigación	Climas templados y fríos, presión agrícola e industrial
2019	Proyecto Ezousa	Chipre	Recarga con aguas residuales tratadas	Recarga para uso agrícola y control de intrusión salina	Clima mediterráneo semiárido, alta presión hídrica
2020	MAR en Castilla y León	España	Infiltración por balsas y zanjas	Combatir sobreexplotación de acuíferos en Los Arenales	Clima mediterráneo continental, sobreuso agrícola

2022	Recarga con agua desalinizada	Israel	Inyección directa en acuíferos costeros	Evaluar infiltración de agua de mar desalinizada	Zona costera árida, riesgo de intrusión salina
2023	LIFE REWAT	Italia	Recarga controlada con aguas superficiales	Proyecto piloto de recarga con aguas fluviales	Clima mediterráneo, presión agrícola y urbana
2024	Proyecto en Bangladesh	Bangladesh	Infiltración por pozos y estanques	Evaluar MAR para agua potable en deltas salinos	Clima monzónico, alta salinidad y presión demográfica

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3 se logra visualizar geográficamente los proyectos de recarga artificial de acuíferos que demuestra las amplias características y extensiones que se logran escalar con estos proyectos.

Figura 3 Proyectos de recarga artificial de acuíferos internacionales



Fuente: Elaboración Copilot IA.

4.1.3 Proyectos y estudios de recarga artificial en Chile

A pesar de su desarrollo incipiente, Chile cuenta con diversos proyectos y estudios piloto de RAA en marcha o finalizados, impulsados principalmente por la gran industria (minería) y por empresas sanitarias, con algunas experiencias también en el sector agrícola. Muchos de estos proyectos han surgido como respuestas locales a conflictos socio hídricos – por ejemplo, para mitigar el impacto de la extracción de agua por parte de una mina, o para aumentar la seguridad de abastecimiento de una ciudad – lo que ha motivado soluciones innovadoras ajustadas a cada contexto. En términos de contexto general, a continuación, se describen ejemplos destacados de iniciativas de recarga artificial de acuíferos con especial atención en lo desarrollado en minería y de acuerdo con bibliografía revisada:

- **Proyecto recarga artificial para mitigar impacto minero (BHP Cerro Colorado, Tarapacá):**

La Compañía Minera Cerro Colorado (operada por BHP) extraía intensivos volúmenes de agua subterránea del acuífero de Pampa del Tamarugal (Región de Tarapacá) para sus procesos mineros, lo que posiblemente impactaba ambientalmente con secar el bofedal de Lagunillas, un humedal altoandino de importancia ecológica. Como medida de mitigación impuesta en su permiso ambiental (*RCA N°13/2022*), la minera implementó un Sistema de Recarga Artificial (SRA) el que consiste en inyectar constantemente 25 L/s de agua al acuífero de Lagunillas mediante dos pozos de inyección que descargan en pozas de infiltración en el sector del bofedal. Este caudal inyectado compensa la extracción de la mina, manteniendo la disponibilidad de agua para el ecosistema y evitando la desecación del humedal. Inspecciones realizadas por la DGA y la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA) en 2021–2022 confirmaron que el sistema operaba conforme a lo comprometido, logrando mantener los niveles freáticos del bofedal dentro de rangos seguros (Reporte Minero, 2023). Este caso emblemático – primer SRA funcionando bajo la nueva regulación– demuestra cómo la recarga artificial puede usarse *de forma compensatoria* en minería, restituyendo al acuífero parte del agua extraída para proteger ambientes vulnerables (en este caso un oasis de altiplano).

- **Proyecto recarga para reponer acuíferos en condición de sobrexplotación (Compañía Minera Candelaria, Copiapó):**

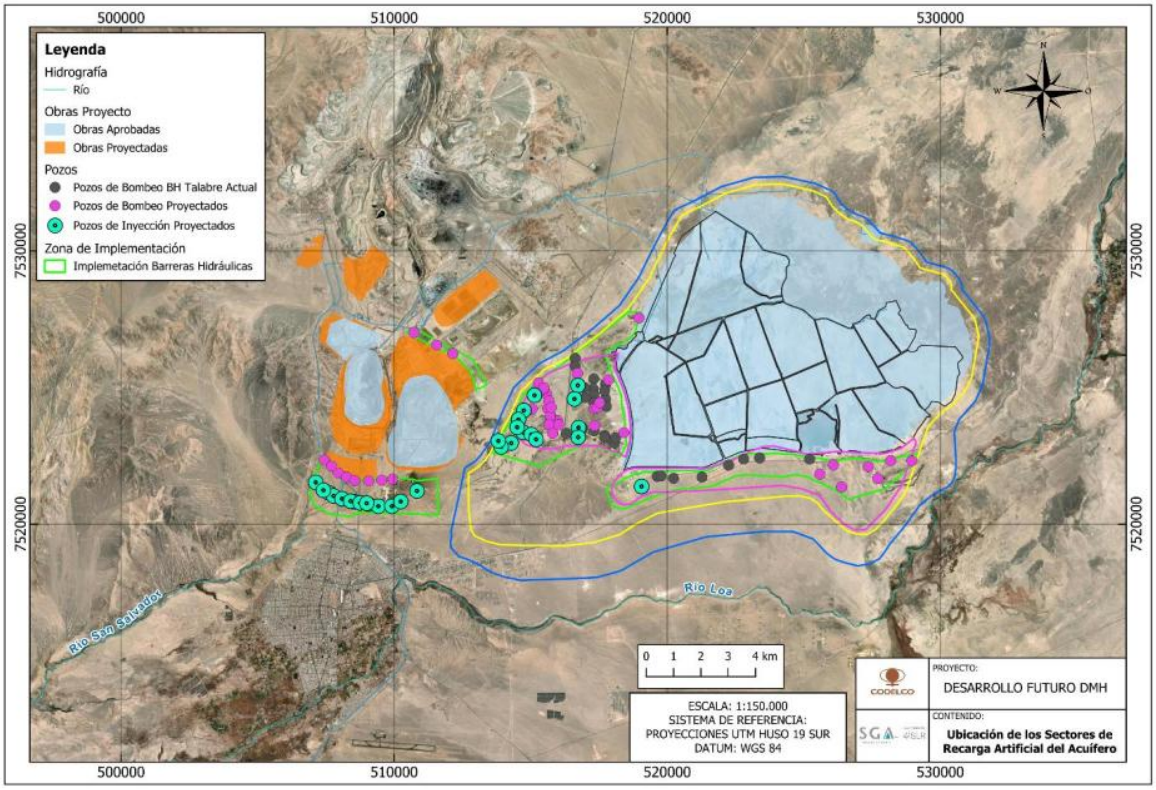
En la cuenca del Río Copiapó (Región de Atacama), la condición temporal de sobre extracción por la minería y agricultura agotaron el acuífero y secaron tramos del río (Primer Tribunal Ambiental, 2025). La Compañía Minera Candelaria acordó, como parte de una conciliación por el daño ambiental, realizar recarga artificial para reabastecer el acuífero del Río Copiapó. En 2023 se inauguró, juntamente con la Junta de Vigilancia local, un proyecto que conduce aguas superficiales desde la cordillera hasta un punto del cauce en el Parque Kaukari (Copiapó), con el objetivo de infiltrar 6,3 millones de m³ al acuífero en 10 a 15 años. Se aprovechó infraestructura existente (canales y tuberías) para llevar un caudal continuo del río que se descarga en el lecho para que

infiltre de manera natural en el tramo urbano. Esta iniciativa público-privada no solo busca recargar el acuífero y restaurar el flujo del río Copiapó, sino también aportar al paisaje urbano (mantención del parque). El proyecto opera con las autorizaciones de la DGA y la Dirección de Obras Hidráulicas, y es ejemplo de cómo la recarga artificial se integra en acuerdos de compensación ambiental para revertir la sobreexplotación histórica de acuíferos críticos.

- **Proyecto recarga con aguas desalinizadas para barreras hidráulicas (Codelco, Calama):**

La minería del cobre en el Desierto de Atacama enfrenta doble desafío hídrico: escasez de agua dulce y riesgo de contaminación de acuíferos por relaves. En la división Ministro Hales (Codelco), ubicada en Calama (Región de Antofagasta), se está implementando un sistema de recarga innovador, la inyección de agua desalinizada en el acuífero Calama–Yalquincha para cumplir dos objetivos, diluir una pluma de aguas con alta concentración de sulfatos (proveniente de infiltraciones de un depósito de relaves cercano) y sostener manantiales naturales del río San Salvador afectados por la extracción minera. El proyecto, en evaluación ambiental (Permiso PAS 158 solicitado), contempla varios pozos duales capaces tanto de inyectar como extraer agua, formando una “barrera hidráulica” alrededor del sector del relave. En condiciones normales, estos pozos bombearán el agua subterránea contaminada para tratamiento, pero cuando sea necesario, podrán reinyectar agua de mejor calidad (desalada) creando un frente que detenga el avance de la contaminación y estabilice el nivel del acuífero. Este enfoque preventivo/protector utilizado en otras faenas del norte muestra la versatilidad de la RAA, aquí no se busca extraer luego el agua recargada, sino emplearla in situ como escudo ambiental. Cabe destacar que el uso de agua de mar desalinizada en recarga es posible gracias a la reciente reforma legal, que explicitó su autorización. Con cada vez más plantas desaladoras operando en Chile (23 en 2023, con 12 proyectos adicionales en desarrollo), esta modalidad de “recarga con desalación” apunta a reducir la presión sobre acuíferos frescos y prevenir conflictos con otros usuarios, empleando una fuente no convencional de agua (SGA, 2025). Estas barreras hidráulicas se logran visualizar en Figura 4.

Figura 4 Barreras hidráulicas DMH



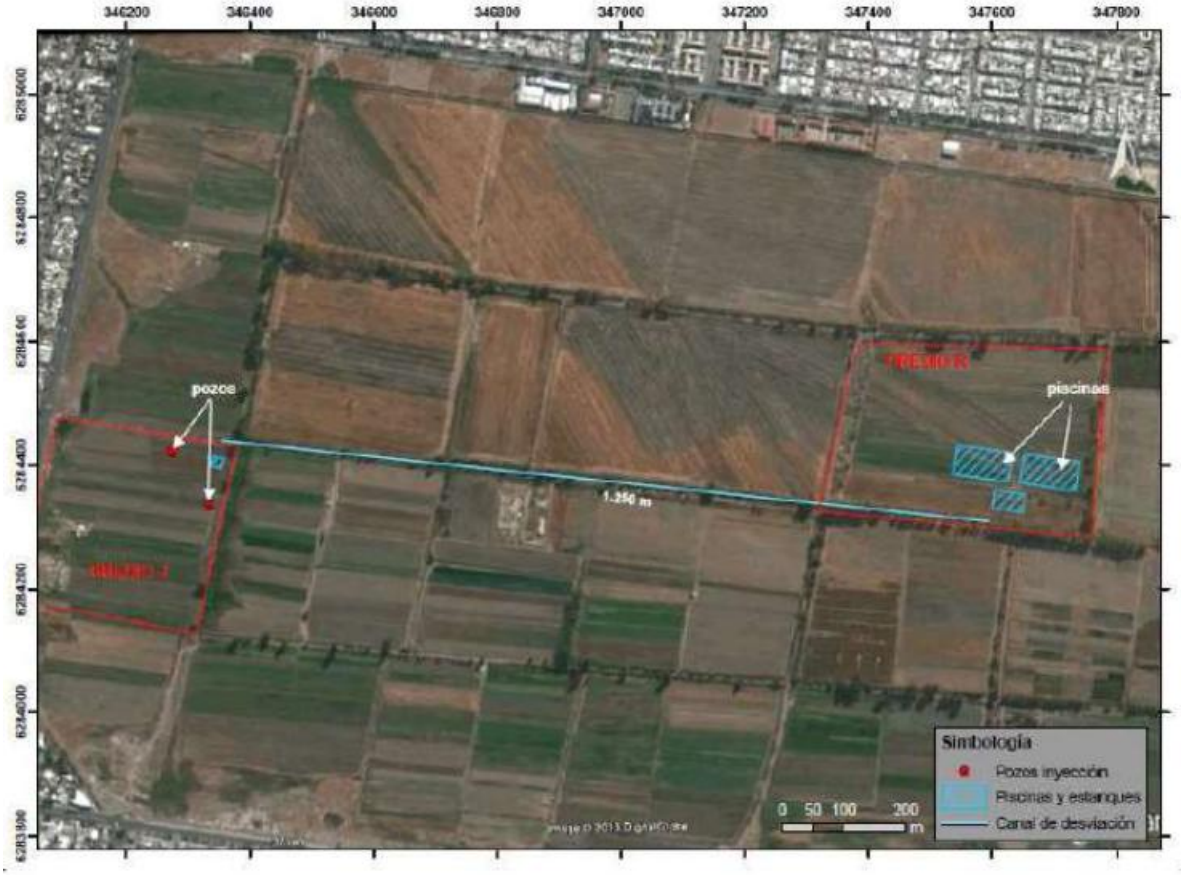
Fuente: SGA, 2025.

- **Proyectos de recarga para seguridad hídrica urbana (Aguas Andinas, Santiago):**

En la Región Metropolitana, la empresa sanitaria Aguas Andinas inauguró en 2025 el primer proyecto de recarga artificial de gran escala para consumo humano en Chile. Denominado “Recarga del Acuífero Mapocho Alto – Los Trapenses”, este proyecto piloto consiste en inyectar agua potable tratada excedentaria durante años húmedos en el acuífero Mapocho Alto, al oriente de Santiago, para almacenarla y recuperarla en años secos. Se implementaron pozos de inyección en el sector de Lo Barnechea, aprovechando infraestructura existente (plantas y tuberías) para conducir el recurso cuando hay superávit de producción de agua potable. La capacidad de recarga anunciada es de 950 millones de litros anuales (0,95 hm³/año), equivalente al consumo mensual de aproximadamente 47 mil hogares. Este volumen se infiltrará principalmente durante inviernos lluviosos o deshielos abundantes, almacenándose en el acuífero para su posterior extracción en veranos secos, contribuyendo a la seguridad de abastecimiento de más de 8 millones de habitantes de Santiago. El proyecto obtuvo en marzo de 2025 la autorización de la DGA, convirtiéndose en el primer sistema de recarga operado por una sanitaria con permisos tanto de infiltración como de extracción de agua recargada (AIDIS, 2025). Su exitosa tramitación ha sido un precedente regulatorio que allana el camino para futuros proyectos MAR urbanos a gran escala. A nivel operativo, la recarga se realiza a través de 4 pozos de inyección ubicados cerca de la Planta La Dehesa, con caudales de aproximadamente 60 L/s durante 6 meses al año, totalizando 0,8 hm³ por ciclo de recarga. El agua inyectada proviene del excedente de producción de agua potable en meses húmedos, por lo que tiene calidad de bebida humana; tras

almacenarse en el acuífero y recuperarse posteriormente por otros pozos cercanos, se envía a la planta de tratamiento para su potabilización final antes de distribuirla. Este proyecto, además de aumentar el stock estratégico de agua contra la sequía, sirve de banco de pruebas para tecnologías de monitoreo en tiempo real de recarga (sensores de nivel, calidad y flujo) y sistemas de gestión inteligente del agua infiltrada. Su lanzamiento público con la presencia de la ministra de Obras Públicas– subrayó la importancia de la RAA como solución basada en la naturaleza para la resiliencia hídrica de las ciudades (Aguas Andinas, 2025). En Figura 5 se logra identificar la zona de implementación de los pozos de recarga.

Figura 5 Pozos recarga Aguas Andinas, Lo Barnechea



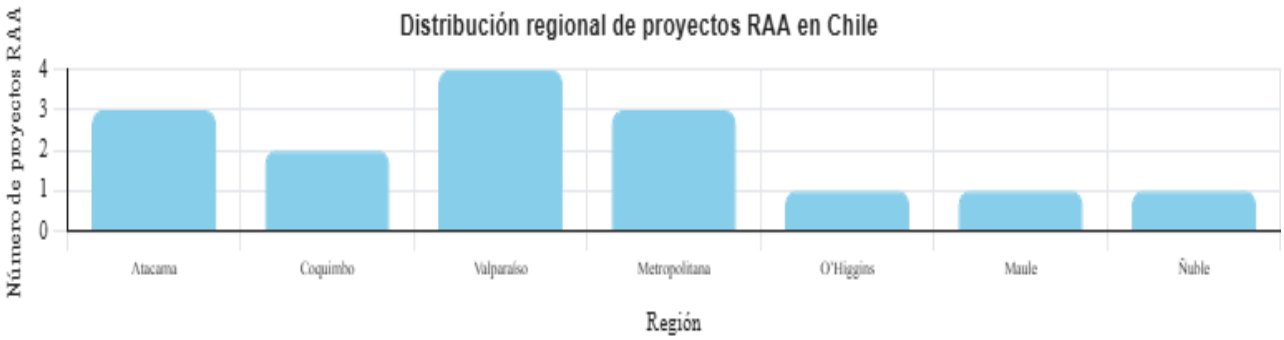
Fuente: PRA, 2013.

Otras experiencias y estudios piloto que existen como iniciativas de menor escala o en etapas de estudio en distintas regiones. La Sociedad del Canal de Maipo (SCM), asociación de regantes en la RM, ha explorado la recarga del acuífero de Santiago mediante *piscinas de infiltración* en el lecho del río Maipo durante crecidas invernales, para luego usar esa agua en riego en temporadas secas como se menciona anteriormente. Pero existen otras experiencias relevantes como es en la Región de Coquimbo, académicos locales y regantes han implementado un piloto de recarga por infiltración en el Valle de Elqui, aprovechando el modelo israelí de recarga en canales y

zanjas para mejorar la disponibilidad de agua de riego (proyecto piloto con apoyo de la Universidad de O'Higgins). También en el norte, la empresa SQM desarrolló un sistema de recarga en el Salar de Llamara (Tarapacá), como parte del Plan de Seguimiento Ambiental de su operación de yodo/nitratos a través de *"pozos infiltradores en puquios"* se reinyecta periódicamente agua al acuífero salino del salar, con el fin de mantener manantiales (ojos de agua) que son cruciales para la vegetación de tamarugos en la Pampa del Tamarugal. Este esquema, monitoreado por 136 puntos de observación hidrogeológica, ha mostrado que los niveles piezométricos en los pozos cercanos a los bosques de tamarugo se han estabilizado, sin superar los umbrales de alarma definidos en el plan de alerta temprana (Hidroestudios, 2024). Asimismo, algunas compañías mineras en Atacama y Valparaíso (p.ej. proyectos Cerro Negro en Petorca, Continental Gold en Tierra Amarilla) han propuesto en sus EIA´s la construcción de barreras hidráulicas mediante extracción y posible reinyección de agua para controlar eventuales filtraciones contaminantes de depósitos de relaves (MYMA, 2022). Estas propuestas han debido incorporar el PAS 158 en sus trámites ambientales, evidenciando la consolidación de la recarga artificial como medida de gestión hídrica y ambiental en la evaluación de nuevos proyectos.

A continuación, en Grafico 2 se visualiza la distribución por regiones en Chile de proyecto de recarga artificial en chile presentados formalmente ante la autoridad central Dirección General de Aguas (DGA) para sus correspondientes tramitaciones y posteriores aprobaciones. Se puede eviidenciar que la mayoría de las iniciativas provienen del norte grande (Tarapacá) y de la zona central (Región Metropolitana), principalmente impulsadas por la minería y proyectos piloto de recarga urbana; mientras que en el resto del país la aplicación de RAA ha sido prácticamente nula hasta la fecha (DGA, 2025).

Gráfico 2 Distribución de las solicitudes formales de proyectos de recarga artificial de acuíferos ingresadas a la DGA (2015–2023) por región del país.



Fuente: Elaboración propia, en base a datos DGA 2025.

4.1.3.1 Experiencias internacionales comparadas

La recarga artificial de acuíferos es una práctica consolidada en numerosos países, donde ha sido adoptada con distintos objetivos: gestionar excedentes hídricos estacionales, potabilizar y almacenar aguas regeneradas, frenar la intrusión salina en acuíferos costeros, revertir la sobreexplotación y constituir reservas estratégicas frente a sequías, entre otros. A continuación, se revisan brevemente algunas experiencias internacionales relevantes que sirven de referencia para Chile:

Australia: Es considerado un líder en MAR debido a su fuerte enfoque en políticas hídricas innovadoras frente a la escasez. Australia implementó un claro marco regulatorio desde inicios de los 2000 que reconoce derechos sobre el agua infiltrada y promueve proyectos piloto, lo que ha incentivado notablemente el desarrollo de la RAA. Cuentan con guías técnicas nacionales (NRMMC-EPHC-NHMRC, 2009) que abordan la gestión de riesgos de calidad del agua y salud pública, permitiendo recargar acuíferos con fuentes diversas, incluyendo aguas residuales altamente tratadas. Ciudades como Adelaida en Australia Meridional operan una multitud de proyectos MAR: por ejemplo, sistemas de ASR (recarga y recuperación con pozos) donde almacenan agua de lluvia o efluentes tratados en acuíferos durante el invierno para extraerla en verano. También existen esquemas comunitarios: cooperativas de regantes en zonas rurales de Queensland inyectan aguas superficiales en pozos para reponer acuíferos sobreutilizados. La extensa experiencia australiana muestra la efectividad de la RAA para aumentar la seguridad hídrica urbana e industrial, a la vez que destaca la importancia de una regulación robusta y de integrar a las comunidades en la gobernanza del agua recargada (Calderon, 2019).

Estados Unidos: La recarga artificial se practica desde hace más de un siglo en estados áridos del oeste. California y Arizona son referentes, con amplios programas de “bancos de agua subterránea”. En Arizona, por ejemplo, opera la Arizona Water Banking Authority, que gestiona la recarga de excedentes del Río Colorado en acuíferos como un mecanismo de almacenamiento de largo plazo para garantizar suministros urbanos frente a futuras sequías. En California, la reciente ley de gestión sustentable de aguas subterráneas (SGMA, 2014) impulsa a los distritos locales a aumentar la recarga para balancear sus acuíferos sobreexplotados. Se han construido grandes campos de estanques de infiltración en el Valle Central de California y en Los Ángeles, capturando aguas de tormenta y deshielo para recargar acuíferos que luego abastecen a la agricultura y a las ciudades. También son comunes las prácticas de recarga in-lieu, entregar agua superficial a usuarios (por ejemplo, agricultores) para que reduzcan su bombeo subterráneo, permitiendo que los acuíferos recuperen nivel. Las experiencias estadounidenses evidencian el valor de la RAA en macro gestión, se la utiliza para almacenar millones de m^3 en periodos húmedos, conformando un “colchón” que se extrae en épocas de sequía, con arreglos institucionales que permiten asignar créditos de agua a quienes financiaron la recarga (Calderon, 2019).

Israel: Es un caso emblemático en el aprovechamiento de la recarga artificial acoplada a la reutilización de aguas. Con un 60% de su territorio desértico, Israel ha logrado superávit hídrico mediante dos pilares, desalinización y reutilización.

Actualmente reúsa 90% de sus aguas residuales en agricultura, muchas de las cuales pasan antes por procesos de recarga en acuíferos. El sistema Shafdan en la región de Dan es uno de los mayores del mundo: trata las aguas servidas de Tel Aviv y luego las infiltra mediante enormes campos de pozos y estanques en el desierto de Neguev; tras percolar y permanecer unos meses en el acuífero (lo que mejora la calidad por filtración natural), el agua se extrae para riego agrícola. De este modo, “Israel recarga toda su agua residual en macrosistemas de recarga artificial, renaturalizándola y volviéndola a usar”, señala un experto del Instituto de Hidrología de Cataluña, resaltando que prácticamente 100% del agua disponible pasa por un ciclo de reutilización en Israel. Esto, sumado a la masificación del riego por goteo y la eficiencia en la distribución (pérdidas menores al 3%), ha permitido a Israel superar la escasez de agua crónica, convirtiéndose en modelo mundial de gestión hídrica. La experiencia israelí demuestra la viabilidad de inyectar aguas no convencionales (residuales altamente depuradas) a los acuíferos de manera segura, siempre que exista un riguroso control de calidad y una estructura institucional sólida para la operación y mantenimiento de los sistemas de recarga (El Independiente, 2023).

España: Se encuentra en un estrés hídrico en zonas semiáridas (Calderon et al., 2019) (sureste, cuenca del Segura, etc.), la adopción de la RAA ha sido más limitada y reciente en comparación con los casos anteriores. No obstante, se han desarrollado proyectos piloto y normativas técnicas en años recientes. Un ejemplo es el proyecto Life+ENSAT en Cataluña, donde se construyeron piscinas de infiltración para inyectar agua de lluvia y ríos en el acuífero del delta del Llobregat, con el fin de frenar la intrusión salina costera y proveer agua de mejor calidad a Barcelona. Asimismo, en la provincia de Alicante (sureste español) se han implementado sistemas de recarga por drenajes urbanos: una red de pozos y balsas que captan escorrentías pluviales para infiltrar en acuíferos sobreexplotados, aumentando la disponibilidad para riego. A nivel legal, España no cuenta con una figura de “derecho sobre agua recargada” como Australia o Chile; sin embargo, la Directiva Marco del Agua de la UE exige lograr buen estado de las aguas subterráneas, lo que ha empujado a los gestores a considerar MAR como medida para recuperar acuíferos deprimidos. La experiencia española muestra que la viabilidad de la recarga depende también de factores institucionales: en algunos casos, confusiones legales han surgido (p.ej., si la recarga de un tercero genera agua adicional, cómo asignar esos volúmenes), lo que resalta la importancia de un marco jurídico claro para evitar disputas (Calderon, 2019).

Otros países como la India han implementado RAA a gran escala principalmente mediante pequeñas estructuras de recarga dispersas (diques) principalmente, dado su bajo coste y rápida implementación entre otros factores que condicionan su viabilidad.

4.1.4 Identificar y revisar el marco normativo actual en Chile y el mundo de la RAA

Históricamente, la recarga artificial de acuíferos careció de un reconocimiento explícito en la normativa chilena. La Ley 19.300/1994 (Ley de Bases del Medio Ambiente) no incluía las obras de recarga artificial en el listado de proyectos que deben someterse

obligatoriamente al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Esto generó por años un vacío regulatorio y los proyectos de RAA no estaban claramente sujetos a evaluación ambiental ni existían procedimientos específicos para su autorización, más allá de requisitos generales del Código de Aguas (DGA, 2024).

En 2012 se publicó el *Reglamento del SEIA* (D.S. Nº40 del MMA, 2013), que estableció por primera vez un Permiso Ambiental Sectorial (PAS) Nº158 para la ejecución de obras de recarga artificial de acuíferos, bajo competencia de la DGA. El PAS 158 se concibe como un permiso *"mixto"* (con contenidos técnicos ambientales y otros propios del Código de Aguas) y su requisito fundamental es "conservar y proteger el acuífero" durante la recarga. Dado que la ley ambiental no listaba estos proyectos, el PAS 158 actuó como mecanismo para evaluar obras de recarga dentro del SEIA cuando forman parte de otro proyecto mayor. Por ejemplo, si una minera incluía un sistema de recarga como medida ambiental, debía demostrar en su Estudio de Impacto Ambiental el cumplimiento del PAS 158, lo que implica satisfacer exigencias técnicas de la DGA para garantizar que la recarga no contaminará el acuífero ni causará colmatación de este. La Circular DGA N°4/2016 interpretó la normativa vigente en ese entonces, concluyendo que: todas las obras cuyo objetivo sea aumentar deliberadamente la disponibilidad de aguas subterráneas deben tramitar el PAS 158 en el SEIA (si el proyecto global ingresa al SEIA); que las fuentes de agua permitidas para recarga incluyen aguas superficiales, aguas subterráneas previamente extraídas y aguas tratadas (potables, desalinizadas o servidas tratadas), siempre que no se produzca contaminación ni colmatación del acuífero; y que obteniendo el PAS 158 se acredita el cumplimiento de la normativa ambiental vigente respecto a la protección del acuífero. Es decir, el PAS 158 brinda certeza de que la obra de recarga está bien diseñada para no dañar las aguas subterráneas, en cuyo caso la DGA emite un pronunciamiento favorable dentro del SEIA (DGA, 2024).

Por otra parte, independientemente del SEIA, la ejecución de obras de recarga ha estado sujeta a la normativa sectorial de aguas. El Código de Aguas (1981), en su texto original, contemplaba la figura de "derechos provisionales" asociados a recarga: permitía, bajo ciertas condiciones, que quien introducía aguas al acuífero pudiera extraer un volumen equivalente en el futuro, previa autorización (antiguo art. 67, hoy derogado). Además, el Reglamento de Aguas Subterráneas (D.S. MOP Nº203/2014) estableció en su artículo 47 que *"cualquier persona podrá ejecutar obras de recarga artificial, previa autorización de la DGA"*, indicando en los artículos siguientes los contenidos que debe tener la solicitud (memoria técnica con descripción del proyecto, características hidrogeológicas, calidad de aguas a infiltrar, planes de monitoreo, etc.) y que la DGA aprobará la obra siempre que cumpla dichos contenidos y no provoque la colmatación ni contaminación del acuífero. Asimismo, se reguló que, para ejercer un derecho provisional de agua por recarga, la obra debe estar aprobada y operando efectivamente, es decir, demostrar que se infiltró el agua. (DGA, 2024).

La Reforma al Código de Aguas 2022. Un hito trascendental fue la modificación al Código de Aguas mediante la Ley 21.435, publicada en abril de 2022, que por primera vez incorporó disposiciones específicas sobre recarga artificial de acuíferos. Se introdujeron tres nuevos artículos: 66 bis, 66 ter y 66 quáter. En resumen:

El Artículo 66 bis establece que “cualquier persona podrá ejecutar obras para recargar artificialmente un acuífero”, previo informe favorable de la DGA sobre que la recarga no afecta extracciones de agua para consumo humano y resguarda la calidad de las aguas. Es decir, no se exige someterse al SEIA por defecto, pero sí obtener un informe técnico de la DGA antes de recargar. Este artículo define la recarga natural (infiltración de aguas lluvia, ríos, etc. sin intervención humana, la cual no requiere informe de la DGA) y distingue la recarga artificial intencional. Además, explicita que la recarga artificial podrá realizarse con distintos fines, tales como “preservación ecosistémica y sustentabilidad del acuífero, evitar intrusión salina, aprovechar la capacidad depuradora del subsuelo, infiltrar agua desalinizada o residuos líquidos tratados, y utilizar el almacén subterráneo para reutilización posterior”. Esta enumeración en la ley reconoce legalmente usos innovadores, por ejemplo, la posibilidad de recargar con agua de mar desalinizada –lo cual era un debate técnico– quedó autorizada explícitamente. El 66 bis también indica que quien recarga un acuífero y luego desee reutilizar esa agua infiltrada (en el mismo u otro punto), podrá pedir a la DGA autorización para extraerla, considerando las pérdidas del proceso, la sustentabilidad del acuífero y derechos de terceros. Esto crea el marco para los llamados “derechos de recuperación” de aguas recargadas.

El Artículo 66 ter dispone que, si un proyecto de recarga usa aguas de otra cuenca o busca constituir nuevos derechos de aprovechamiento, entonces requiere la aprobación formal de la DGA. En la práctica, esto alinea la recarga con el proceso de otorgamiento de derechos de aguas: si la intención es aumentar la oferta para nuevos derechos consuntivos, se debe tramitar como si fuese una nueva fuente, siguiendo artículos 130 y siguientes del Código (lo que implica estudios y posiblemente ir a un proceso concursal).

El Artículo 66 quáter prohíbe operar una obra de recarga causando perjuicio a terceros; si ocurre daño (por ejemplo, elevar excesivamente el nivel freático inundando sótanos, o movilizar contaminantes hacia pozos vecinos), el responsable debe indemnizar. Este principio resalta la responsabilidad del recargador de no afectar derechos ajenos. Además, señala que si se requieren obras urgentes para evitar daños (por ejemplo, detener una recarga descontrolada), serán de cargo de quien opera la recarga.

Estos cambios de 2022 dotaron de certeza jurídica la práctica de la RAA en Chile, al delinear cómo se autoriza y en qué condiciones. Sumado a ello, el Código reformado en su artículo 292 bis enfatiza la necesidad de implementar nuevas fuentes y soluciones basadas en la naturaleza (como la recarga artificial) en los Planes Estratégicos de Recursos Hídricos por Cuenca para enfrentar la escasez con prioridad en consumo humano (DGA, 2025). Guías técnicas y circulares recientes. Tras la reforma legal, la DGA

actualizó sus lineamientos. En junio de 2024 emitió la Circular DGA N°3/2024 que reemplaza la Circular N°4/2016, adecuando los criterios del PAS 158 al nuevo Código de Aguas. Entre las aclaraciones importantes está que las obras de infiltración de aguas lluvias (zanjas de drenaje urbano, pozos absorbentes para lluvia) se consideran recarga natural y no requieren PAS 158 ni informe DGA, tal como lo indica el inciso del 66 bis. En cambio, toda recarga *intencional gestionada* (sea con aguas superficiales, desalinizadas o tratadas) sí debe tramitarse. La circular actualiza también la relación con el SEIA: si un proyecto mayor incluye RAA con el objetivo de aumentar disponibilidades o mejorar calidad de aguas subterráneas, sigue aplicando el PAS 158 dentro de su evaluación ambiental; pero si la recarga tiene otro fin (no aumentar recurso, p.ej. una obra menor para control de polvo o similar), podría no requerir PAS 158 aunque igualmente se evaluarán sus impactos ambientales caso a caso. Se refuerza que obtener el PAS 158 en el SEIA acredita el cumplimiento de la normativa ambiental respecto a RAA, especialmente en términos de no contaminar el acuífero (la protección contra colmatación se ve en el proceso sectorial de autorización, más que en el SEIA). Asimismo, se recalca la necesidad de que, si un proyecto de RAA no ingresa al SEIA por sí mismo, igualmente debe obtener la autorización sectorial de la DGA según el Código de Aguas (art. 66 bis/ter) fuera del SEIA. En paralelo a la circular, la DGA publicó una Minuta Técnica (DCPRH N°12/2024) con orientaciones internas para sus funcionarios sobre cómo evaluar estos proyectos bajo la nueva ley.

Adicionalmente, la Comisión Nacional de Riego (CNR) en conjunto con expertos internacionales (CSIRO de Australia, Universidad de California-Davis) desarrolló el estudio *“Marco operativo para proyectos de recarga artificial en acuíferos”* (publicado en 2020), que incluye una Guía Metodológica de Recarga de Acuíferos Gestionada enfocada en proyectos agrícolas. Esta guía identifica mejores prácticas internacionales, propone una metodología de evaluación por fases (viabilidad, diseño piloto, escalamiento) y sugiere criterios de selección de métodos, control de riesgos sanitarios y ambientales, y análisis costo-beneficio para proyectos de recarga**. Aunque centrada en riego agrícola, sus recomendaciones (p.ej. gestión de la calidad del agua, escalonamiento de proyectos, participación de usuarios) son aplicables de forma general. La difusión de estas guías y las instancias de capacitación asociadas han buscado promover la implementación de RAA entre usuarios de aguas, reduciendo la incertidumbre técnica y demostrando vías de bajo riesgo para emprender proyectos a pequeña y gran escala (CSIRO, 2020).

En síntesis, el marco regulatorio chileno de la RAA ha avanzado sustancialmente en el último quinquenio. Hoy existe un respaldo legal expreso en el Código de Aguas para realizar recargas artificiales con diversas fuentes (incluyendo aguas desaladas y tratadas) y para garantizar derechos sobre el agua recargada. Paralelamente, se han establecido procedimientos claros tanto en la vía ambiental (PAS 158 en el SEIA) como en la sectorial (informe o aprobación DGA vía Código de Aguas) para evaluar y autorizar estas iniciativas, con exigencias técnicas destinadas a proteger los acuíferos y terceros

usuarios. Las guías técnicas nacionales más recientes, alimentadas por la experiencia internacional, complementan este marco al brindar a los proponentes herramientas prácticas para el diseño, operación y monitoreo de proyectos de recarga, reduciendo las barreras al desarrollo de soluciones basadas en acuíferos en Chile.

4.1.5 Identificar como se asocian los diferentes conocimientos adquiridos

En esta sección de analiza los principales entregados durante el “Magister en Gestión del Agua” y como sus contenidos fueron aportantes al objetivo del presente estudio y son aspectos orientadores en relación con los resultados esperados.

Es así como en un contexto introductorio Madrid Aris, M. (2019) profesor del magister y antecedentes bibliográficos como el de Santibáñez Quezada, F. (2017) afirman que la gestión de los recursos hídricos en el siglo XXI enfrenta desafíos sin precedentes debido al crecimiento demográfico, el aumento de la demanda para la producción de alimentos y energía, y los efectos agudos del cambio climático. En Chile, este escenario se ha manifestado a través de una megasequía prolongada y el agotamiento de aproximadamente 110 acuíferos cuya demanda comprometida supera su recarga natural.

Ante esta crisis, la Recarga Artificial de Acuíferos (RAA) —también denominada Recarga Gestionada de Acuíferos (MAR)— surge como una Medida, Acción y Solución (MAS) estratégica para el almacenamiento de excedentes superficiales, la recuperación de niveles freáticos y la mejora de la calidad hídrica. En relación con el contexto internacional y marcos de gestión a nivel internacional, bibliografía proporcionada del magister de Laboratorio de Análisis territorial. (2017) indica que la recarga de acuíferos se integra en marcos de seguridad hídrica y gestión de contaminantes. Organismos como la EPA (Estados Unidos) y la Comisión Europea enfatizan la protección de las fuentes de agua como la primera barrera de defensa en sus estrategias de control. En países como Estados Unidos, China e Israel, se han implementado tecnologías complementarias como la "siembra de nubes" para inducir precipitaciones que alimenten embalses y favorezcan la escorrentía para procesos de recarga.

Otro soporte bibliográfico como el de la OCDE (2018) recomienda que las políticas hídricas promuevan la gestión conjunta de la cantidad y calidad del agua, adaptándose a las condiciones locales y fomentando la innovación tecnológica para reducir el vertido de contaminantes. Estos marcos internacionales subrayan que la RAA no solo es una técnica de almacenamiento, sino una herramienta de gobernanza para mitigar riesgos y desastres asociados al agua. En cuanto a los desafíos técnicos y de monitoreo, uno de los principales obstáculos para el éxito de los proyectos de RAA en Chile es la brecha de información y monitoreo. La Dirección General de Aguas (DGA) reconoce un déficit teórico de 1,140 pozos de monitoreo a nivel nacional, lo que equivale a 17 veces el tamaño de la red actual. Sin una red de monitoreo robusta que caracterice la condición

natural y detecte cambios antrópicos, la interpretación de los datos de recarga resulta insuficiente para una gestión operativa. Además, se requiere un conocimiento acabado de la hidrogeología local y de las fuentes de contaminación difusa (como pesticidas y nitratos) antes de iniciar procesos de infiltración masiva. La Tabla 4 incluye un cuadro resumen con las materias o documentos que incorporan la RAA.

Tabla 4 Cuadro resumen de materiales relacionados con la RAA

Material / Documento	Conceptos Claves	Aporte en relación con la RAA	Año	Principales Aportes en RAA
Transición Hídrica: El futuro del agua en Chile	MAS, Brecha Hídrica, Infiltración artificial.	Categoriza la RAA como una solución clave para la migración a nuevas fuentes.	2019	Análisis de beneficios, costos y externalidades socio-ambientales de la recarga.
Agricultura Chilena: Reflexiones y Desafíos al 2030	Escorrentía, Inyección de napas, Estrés hídrico.	Plantea la RAA como necesidad técnica para la sostenibilidad agrícola.	2017	Propone sistemas de inyección y recarga de napas para enfrentar el déficit en el norte y centro.
Diagnóstico y Desafíos de la Red de Calidad de la DGA	Déficit de pozos, Acuíferos sobreexplotados.	Define la infraestructura necesaria para vigilar procesos de recarga.	2017	Identifica la necesidad de densificar la red para sustentar técnicamente la gestión del agua subterránea.
Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH)	Gestión de la oferta, Almacenamiento, Reciclaje.	Inserta la recarga en el ciclo de gestión integral de cuencas.	2019	Esquematiza la infiltración como un proceso de gestión de la oferta frente a la demanda.
Manejo Sostenible de Cuencas	Infiltración, Intercepción, Bosque vs Suelo desnudo.	Analiza los factores naturales que favorecen la infiltración basal.	2019	Explica cómo la cobertura vegetal favorece la infiltración natural, principio base de la RAA.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.6 Comprender y revisar los diferentes métodos existentes para efectuar una recarga artificial de acuíferos

Existen diversas técnicas de recarga artificial de acuíferos (RAA) y su viabilidad depende de múltiples factores entre ellos, las condiciones hidrogeológicas locales y la fuente de agua disponible para efectuar la recarga. En la Tabla 5 se resumen los métodos comunes de RAA implementados, con su descripción básica y características, en base a información de "Marco operativo para proyectos de recarga artificial en acuíferos" (CSIRO, 2020).

Tabla 5 Métodos comunes de RAA

Método de RAA	Descripción básica	Características clave
Piscinas o estanques de infiltración	Desvío de agua superficial hacia estanques excavados sobre suelos permeables, fuera del cauce de ríos. El agua se infiltra verticalmente a través de la zona no saturada hasta el acuífero subyacente.	Método simple y económico, ampliamente utilizado. Requiere gran superficie de terreno y un mantenimiento regular para remover sedimentos o biopelículas que puedan colmatar el lecho. Suele presentar crecimiento de algas, por lo que se gestiona con ciclos de llenado-secado.
Zanjas o galerías de infiltración	Construcción de zanjas largas y estrechas rellenas de material filtrante (gravas) a poca profundidad. El agua se distribuye a lo largo de la zanja y percola lateral y verticalmente hacia el acuífero.	Requieren menos superficie que las piscinas, pues aumentan el área de contacto en profundidad. Son menos susceptibles a obstrucción por algas en la superficie, aunque su capacidad de infiltración es menor que un estanque grande. Adecuadas para terrenos planos con alto nivel freático.
Pozos de inyección (recarga por pozos)	Inyección directa del agua en el acuífero mediante pozos especialmente habilitados. Puede aplicarse a acuíferos profundos o confinados, o cuando se dispone de poco terreno superficial.	Permite recargar estratos profundos y controlar mejor la dirección/volumen de agua. *Requiere agua de alta calidad* (filtrada y desinfectada) para evitar la colmatación química o biológica del pozo. Inversión inicial y costos de energía altos (bombeo), pero menor requerimiento de terreno. Adecuado en zonas urbanas o industriales.
Recarga gestionada usando aguas residuales tratadas (SAT)	Infiltración de efluentes depurados en estanques someros sobre suelos permeables, aprovechando la capacidad filtrante del suelo para pulir aún más el agua. Tras un tiempo de residencia subterránea, el agua se recupera mediante pozos para uso (usualmente riego).	Conocido como Soil-Aquifer Treatment (SAT). Permite reutilizar aguas residuales de manera segura, eliminando contaminantes restantes por procesos naturales durante la infiltración. Implementado ampliamente en zonas áridas con escasez de agua dulce (p.ej. en Israel con el sistema Shafdan). Requiere monitoreo riguroso de la calidad de agua y control de cargas orgánicas para evitar obstrucciones.
Recarga inducida (infiltración ribereña)	Estimular la infiltración desde un río o cuerpo de agua superficial hacia el acuífero subyacente, sea mediante barreras transversales en el cauce o mediante la operación de pozos de bombeo cercanos para inducir flujo desde el río.	Aprovecha cauces naturales como fuente de recarga. Por ejemplo, se pueden construir diques filtrantes o canales laterales para que el agua del río infiltre en los bancos. Método usado para mejorar la calidad de agua (filtración natural) y almacenar agua de crecidas. Depende del caudal disponible y la conductividad del lecho del río.

Fuente: Elaboración propia, en base a CSIRO, 2020.

Según la bibliografía (Amphos21, 2014: CSIRO, 20020) estos métodos se pueden asociar en clasificaciones de tipo superficiales, subsuperficiales y subterráneos, a continuación, en la Figura 6 se elaboró de forma simplificada una imagen que contiene los distinto tipos.

Figura 6 Métodos de recarga



Fuente: Elaboración propia Copilot adaptado de CSIRO, 2020.

En Chile, la motivación por emplear la recarga artificial surge de la grave crisis hídrica de las últimas décadas. El país ha sufrido una de las sequías más severas de su historia reciente, con déficits pluviométricos continuos desde 2008 que configuran una *"megasequía"* sin precedentes. Esta escasez ha expuesto la fragilidad de la gestión hídrica tradicional basada en aguas superficiales, llevando a sobreexplotar acuíferos para suplir la demanda. "Las aguas subterráneas suministran cerca del 40% del agua a nivel nacional y más del 70% en algunas regiones" (portal frutícola, 2025, parr.4). Sin embargo, numerosos acuíferos presentan descensos críticos en sus niveles debido a extracciones que exceden la recarga natural, con impactos ambientales (desecación de humedales, ríos y vegas), sociales y económicos. En la zona centro-norte del país, varios acuíferos se encuentran en estado de agotamiento estructural, declarados *"áreas de*

restricción o prohibición" para nuevos derechos de agua (DGA, 2025). Esto ha impulsado a autoridades y usuarios a explorar la recarga artificial como solución basada en la naturaleza para restaurar reservas subterráneas y aumentar la resiliencia hídrica.

Diversas instituciones como la Dirección General de Aguas (DGA), la Comisión Nacional de Riego (CNR), empresas sanitarias y el sector minero, entre otras han realizado estudios piloto de RAA desde aproximadamente 2012 (CSIRO, 2020). Estos estudios han permitido estimar las oportunidades de recarga en distintas cuencas, los costos de las obras y las barreras técnicas y administrativas a enfrentar. No obstante, hasta la fecha, pocos proyectos de recarga han alcanzado una escala operacional completa en Chile la mayoría han sido iniciativas experimentales de corta duración o componentes de proyectos mayores – por lo que la adopción de la RAA aún se considera incipiente a nivel nacional. Entre las principales limitaciones históricas se cuentan la *desconfianza* hacia esta tecnología (por escasez de referencias locales exitosas), la *ausencia de un marco regulatorio específico* y dificultades técnicas como la obstrucción de sistemas de infiltración y la incertidumbre sobre la recuperación del agua infiltrada. Estas brechas han comenzado a abordarse en años recientes mediante cambios legales y la elaboración de guías metodológicas que buscan dar certeza jurídica y técnica a los interesados en implementar recarga artificial (ver Capítulo 4.2).

4.2 SUJETO ESTUDIO

En esta sección se caracteriza y contextualiza el área geográfica de estudio, que posee zonas con alta presión sobre el uso del recurso hídrico, fuertemente influido por la actividad minera, donde existe una combinación de escasa recarga natural, sobre otorgación de derechos del acuífero, deterioro de calidad del agua y restricciones legales. Se describirán los principales atributos que características el sistema hídrico e hidrogeológico, tales como:

- **Ubicación geográfica:** Calama se ubica en la Región de Antofagasta, dentro de la cuenca del río Loa, en una zona desértica del norte de Chile.
- **Condiciones climáticas extremas:** presenta un clima **desértico frío**, con precipitaciones muy bajas, gran amplitud térmica y alta radiación solar.
- **Geomorfología y relieve:** se describe un entorno marcado por cuencas, cordones montañosos y depósitos sedimentarios que condicionan el comportamiento del agua subterránea.
- **Sistema hidrográfico:** el **río Loa** aparece como eje hídrico principal, junto con tributarios como el río Salado y el río San Salvador.
- **Características hidrogeológicas del SHAC Calama:** se identifican unidades como el **acuífero superior, acuitardo y acuífero inferior**, con distintos niveles de permeabilidad, conexión hidráulica y capacidad de almacenamiento.

- **Baja recarga natural:** se destaca que la recarga del acuífero es muy limitada, lo que agrava la vulnerabilidad del sistema.
- **Presión por usos del agua:** la minería concentra la mayor parte de los derechos de aprovechamiento, generando una fuerte competencia con usos urbanos, agrícolas y ecosistémicos.
- **Problemas de calidad del agua:** se mencionan contaminantes naturales y antrópicos, como **arsénico y sulfatos**, que afectan la calidad del recurso.
- **Descenso de niveles freáticos y agotamiento:** se evidencia una situación de **sobreexplotación**, con restricciones crecientes impuestas por la autoridad.
- **Infraestructura hídrica y proyectos asociados:** se incluyen elementos como embalses, pozos, plantas de tratamiento, desalación y proyectos de recarga artificial vinculados a la actividad minera.

4.2.1 Descripción y caracterización general física de la zona de Calama

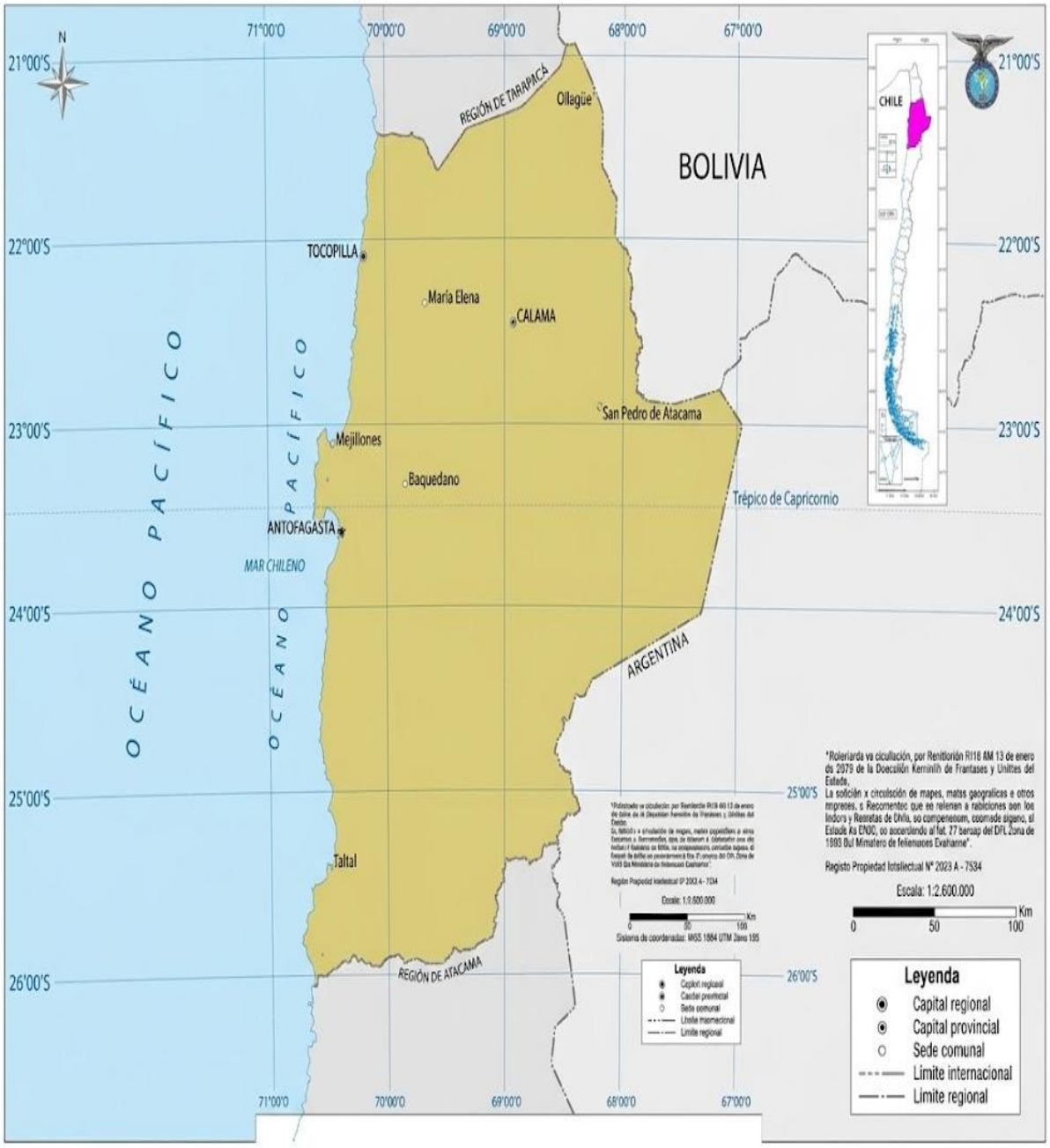
En este capítulo se abordará la caracterización de la zona de estudio de Calama, respecto de sus componentes relevantes como su ubicación, geografía, relieve, clima, geología e hidrogeología y la red hidrográfica, en el contexto de las alternativas de recargas.

- **Ubicación Geográfica**

Calama es una ciudad y comuna del Norte Grande de Chile, capital de la Provincia de El Loa en la Región de Antofagasta, ubicada a 240 km al noreste de la ciudad de Antofagasta (Figura 7). La comuna abarca una superficie de 15.596,9 km² (BCN, 2025). La ciudad es considerada la capital provincial y un centro estratégico de la minería del cobre, con influencia directa de yacimientos como Chuquicamata y Ministro Hales.

En términos demográficos, la comuna registró 166.334 habitantes en el Censo 2024, con una proyección de aumento de 0,3% con relación al último esfuerzo censal realizado durante el año 2017 (INE, 2024).

Figura 7 Ubicación geográfica Región de Antofagasta



Fuente: Instituto Geográfico Militar (IGM), 2026.

- **Relieve y geomorfología**

Calama se inserta en la unidad morfoestructural del macizo andino, en la zona correspondiente a la precordillera, que asciende lentamente desde los 1.600 hasta los 3.000 metros de altitud en las primeras estribaciones andinas, cubriendo con extensos pediplanos el sector oriental de la depresión intermedia. Al norte de la ciudad destacan la Precordillera del río Loa con las Sierra Moreno, Cerros de Chuquicamata y Cerros de Montecristo; la altitud máxima en este sector la alcanza el Cerro Poquis (4.589 m s.n.m.) (Ecured, 2018). Al sur se levantan las estribaciones de la Cordillera de Domeyko (Sierra de Limón Verde y Cordón Barros Arana), un cordón paralelo a los Andes que se interrumpe frente a Calama con cumbres en torno a 3.500 m (Sitrural, 2021).

Hacia el oriente, la Cordillera de los Andes exhibe cumbres volcánicas que superan los 5.000 m: San Pedro (6.145 m s.n.m.), San Pablo (6.092 m), Panire (5.946 m), Inacaliri (5.626 m) y Morro de Cablor (4.453 m), todas visibles desde Calama dada la extrema sequedad del aire. El paso del río Loa de este a oeste deja un llano donde se asienta la ciudad y el oasis de Calama, mientras que entre la precordillera y los Andes, el curso norte-sur del Loa y su confluencia con el río Salado forman la Depresión del Loa Superior (Sitrural, 2021).

En la zona específica de estudio de Calama (zona estudio) la geomorfología local se caracteriza por presentar relieves pronunciados y amplias depresiones, con variaciones de altura desde los 1.700 msnm a más de 3.800 msnm, Precordillera de Domeyko, con altas pendientes y alturas promedio de 3.500 msnm. Al noreste del área se encuentra el cordón montañoso Sierra del Medio, con alturas entre los 2.700 y 4.500 msnm, estos corresponden a una serie de cerros aislados como el cerro Negro ubicado justo al costado oeste del rajo DMH. Adyacente a estos cerros se ubica la unidad Piedemonte, relacionados a depósitos aluviales antiguos y actuales, y depósitos de piedemonte (depósitos acumulados al inicio de la montaña). Al centro del área se ubica la Depresión del Loa que corresponde a una llanura que varía en altura entre 2.300 y 3.000 msnm, alcanza una extensión oeste-este de 50 km, donde es cruzada por los ríos Loa y Salado que generan grandes incisiones. La unidad Terrazas, se ubica en el límite suroeste del área, esta corresponde a depósitos fluviales generados a partir de la depositación del río Loa. De acuerdo con lo anteriormente mencionado, el Proyecto estaría emplazado sobre distintas unidades geomorfológicas. En primer lugar, el rajo actual y la ampliación de este estarían ubicados en la unidad geomorfológica Piedemonte al límite con la unidad Depresión del Loa (SGA, 2025). El botadero ubicado al oriente del rajo DMH, con una altura entre 2.300 y 2.400 msnm, estaría localizado en la Depresión de Loa al igual que el tranque Talabre que se ubica a 2.500 msnm aproximadamente. Por último, el canal del relave cruzaría desde la unidad Piedemonte, pasando por la Sierra del Medio hasta la Depresión del Río Loa (DGA, 2014). En Figuras 8 a la 10 se visualizan las principales formaciones geomorfológicas (SGA, 2025) y el mapa geológico con el recuadro en rojo que denota el área en estudio. Lo anterior en el marco de denotar las principales características de la zona de estudio.

- **Geología**

La cuenca de Calama está rellena por depósitos sedimentarios continentales cenozoicos de gran espesor, que incluyen secuencias de gravas, areniscas, calizas, conglomerados y diatomitas con intercalaciones de cenizas volcánicas. Estas se organizan en las formaciones Calama, El Loa, Chiu-Chiu y Quebrada Opache. Hidrogeológicamente, se reconocen dos formaciones acuíferas principales: la Formación Calama (gravas y arenas) y la Formación Loa (compuesta de techo a base por calizas, areniscas calcáreas y una capa de arcillas y limos arenosos que actúa como capa confinante).

El basamento rocoso (BAS) está constituido por rocas intrusivas y metamórficas de muy baja permeabilidad, que afloran en el Cerro Milagro (contacto por la falla inversa Milagro), al oeste del Muro Oeste del DR Talabre y en los bordes de la cuenca. La Falla Chintoraste provoca el acuñamiento del Acuífero Inferior (ACI) al oeste de Calama (SGA, 2025).

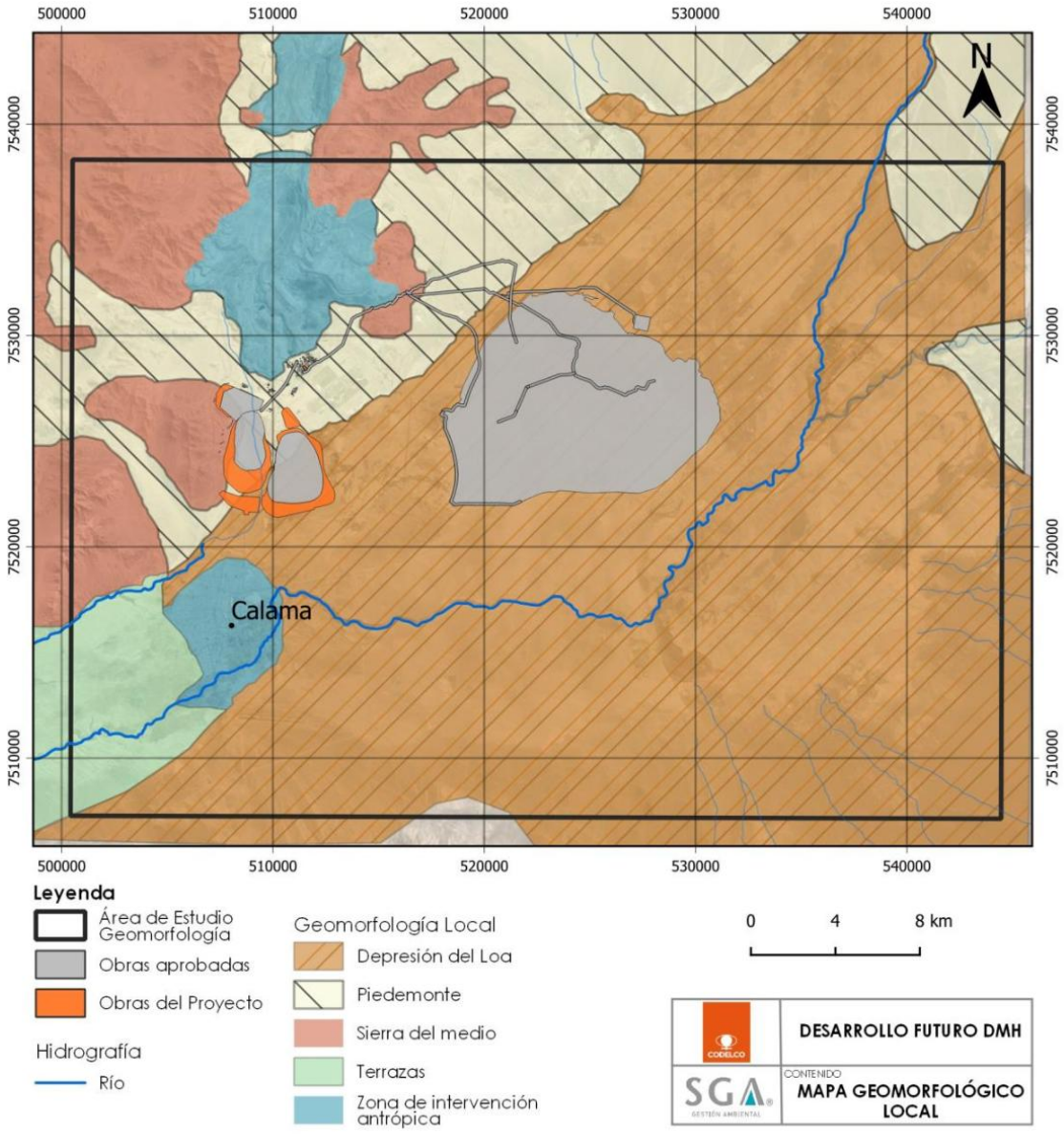
Los suelos del valle del Loa en torno a Calama presentan texturas franco-arenosas a arenosas, con estrata franco-limosa en profundidad; los mejores suelos se ubican en los márgenes inmediatos del río. Hacia el norte y oeste, la calidad decrece por la presencia de nivel freático alto, salinidad y perfiles turbosos que dificultan la habilitación agrícola sin obras de drenaje (DGA, 2013).

En la Figura 9 a través de la carta geológica de Chiu-Chiu se puede visualizar las características geológicas principales de la zona estudio.

Para un mayor detalle, se visualiza (ver Figura 10) un detalle de las principales formaciones geológicas con ampliación a la zona de estudio.

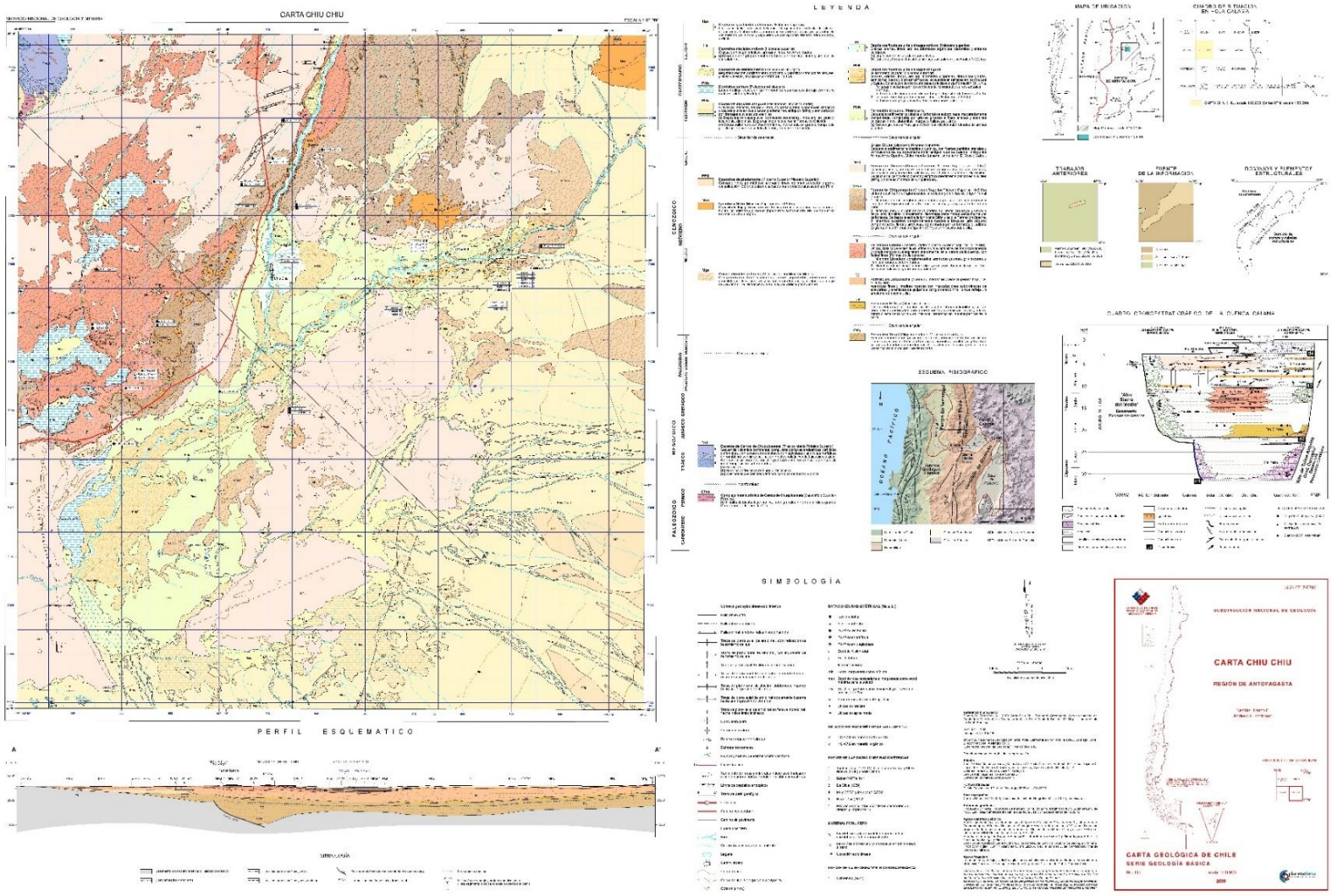
La geología local superficial, condiciona enormemente las condiciones y factibilidades de realizar proyectos de recarga artificial de forma general, en el entorno de Calama, esto cobra mayor relevancia debido a que las formaciones caracterizadas cuentan con bajas capacidades hidráulicas en general (SGA, 2025).

Figura 8 Mapa geomorfológico local



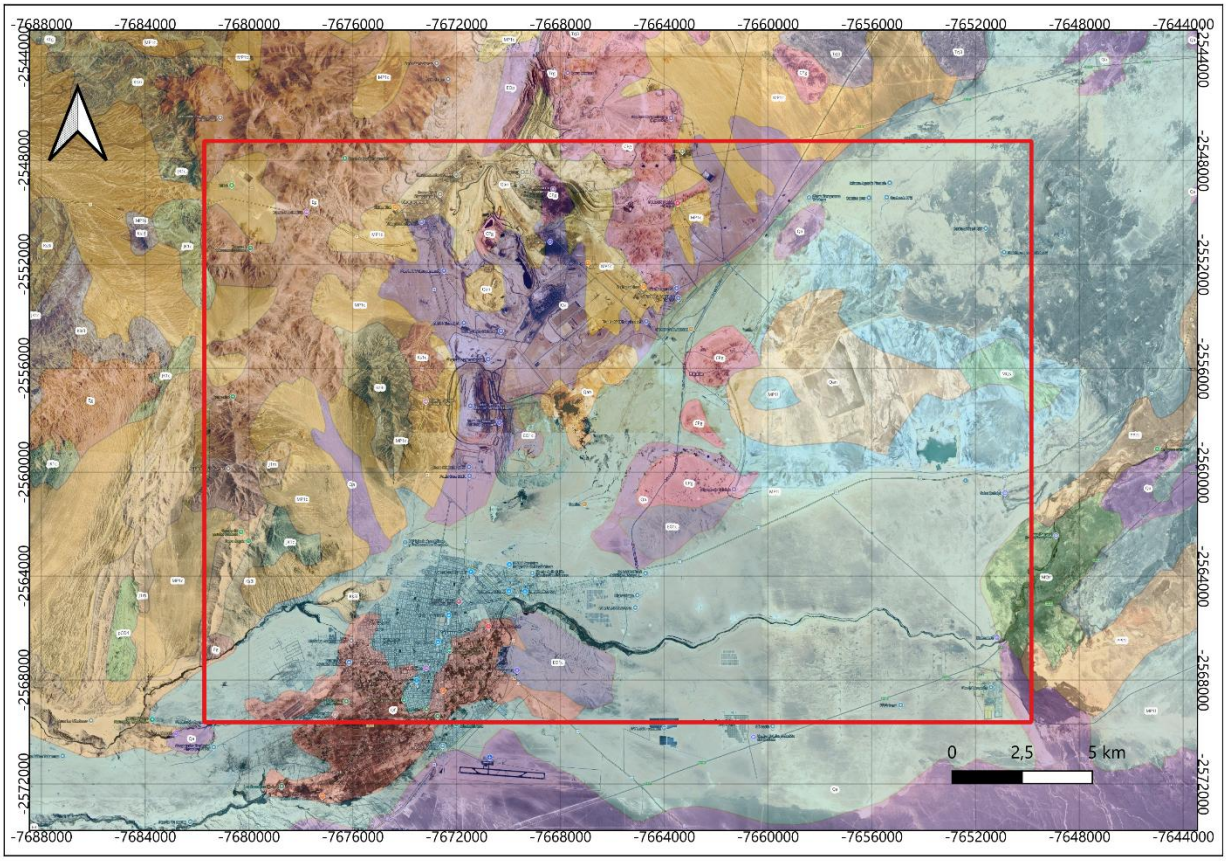
Fuente: SGA, 2025.

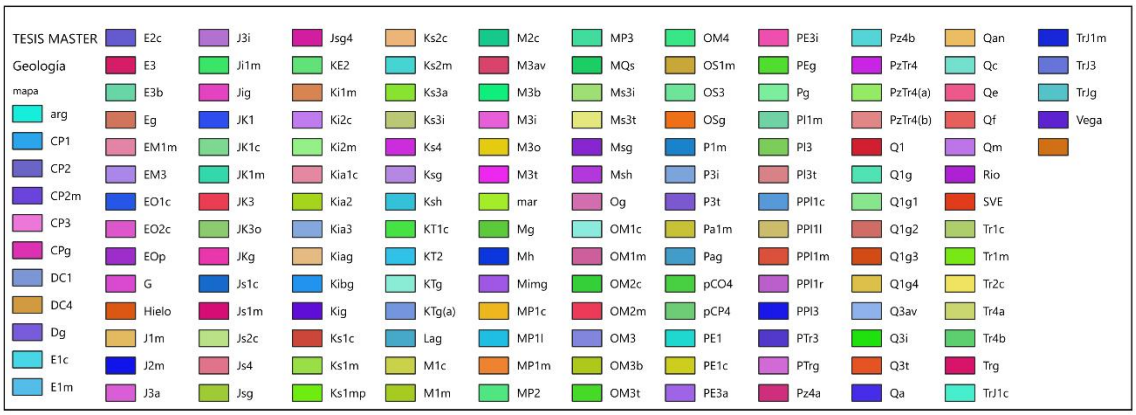
Figura 9 Carta geológica Calama.



Fuente: Servicio Nacional de geología y minería (SNGM), 2009.

Figura 10 Mapa geológico y área de estudio





Fuente: Elaboración propia, datos Sernageomin, 2024.

- **Clima**

El clima de Calama es desértico frío (Bwk'), con precipitaciones anuales que no superan los 75 mm y una temperatura media anual cercana a 13 °C. La amplitud térmica es elevada, con mínimas de hasta –15 °C en invierno y máximas superiores a 30 °C en verano (Municipalidad de Calama, 2010; Sitrural, 2021). En sectores sobre los 3.000 m.s.n.m., se presenta un clima de tundra de altura con precipitación estival (ETHw), asociado al fenómeno del "Invierno Boliviano", que puede aumentar las precipitaciones hasta cerca de 100 mm/año. La precipitación media anual registrada en la comuna es de apenas 4,5 mm, lo que confirma su condición hiperárida (DGA, 2013). A continuación, en Tabla 6 se muestra un resumen de los parámetros característicos del clima en Calama.

Tabla 6 Resumen general de condiciones climáticas Calama

Parámetro	Valor
Precipitación media anual (ciudad)	4,5 mm
Precipitación media anual (sitio DMH, 5 km al norte)	37,1 mm/año
Límite máximo de precipitación (años excepcionales)	<100 mm (Invierno Boliviano)
Temperatura media anual	11,2 °C (ciudad, 2.000–3.000 m s.n.m.)
Amplitud térmica diaria	>20 °C
Máximas verano / Mínimas invierno	25–28 °C / hasta -10 °C

Fuente: Elaboración propia, datos Ecured, 2018.

Por encima de 3.000 m s.n.m., el clima transiciona a Tundra por Efecto de Altura con Precipitación Estival (ETHw), con lluvias concentradas entre noviembre y marzo; la temperatura media allí es de 13,3 °C. Sobre los 3.500 m s.n.m. domina un clima de estepa de altura (zona altiplánica o puna), con temperatura media anual de apenas 2 °C y precipitaciones estivales que no superan los 100 mm. Los eventos hidrometeorológicos extremos son esporádicos pero devastadores: como referencia a ello, el 11 de febrero de 2012 (800 personas afectadas), el 3 de febrero de 2018 (deslizamiento en sector de Caspana) y el 9 de febrero de 2019 (12 mm aprox. en tres horas).

- **Aspectos hidrológicos e hidrogeológicos**

Durante esta sección se abordarán y caracterizarán a nivel general los aspectos más relevantes con que cuenta la región de Calama y en específico la zona de estudio donde se enmarca el presente análisis de forma de contar con un contexto adecuado a las evaluaciones objetivo a realizar.

4.2.2 Red hidrográfica: Cuenca del río Loa

El río Loa constituye el eje hídrico de la zona y es el río más largo de Chile, con aproximadamente 440 km de longitud y una hidrográfica de 33.570 km². Nace en los Ojos del Miño (falda norte del volcán Miño, a ~5.651 m s.n.m.) y fluye inicialmente hacia el sur por un profundo cañón durante unos 150 km hasta el oasis de Chiu-Chiu. En ese trayecto recibe dos tributarios mayores, ambos por el oriente (Tabla 7). En la Figura 11 (DGA, 2021) se puede identificar y visualizar la extensa red hidrográfica

Tabla 7 Principales ejes hídricos Calama

Tributario	Longitud	Cuenca (km²)	Origen
Río San Pedro (Inacaliri)	30 km (tramo visible)	**1087**	Aguada de Inacaliri, alta cordillera
Río Salado	80 km	**2210**	Géiseres del Tatio, 4.200 m s.n.m.
Río San Salvador	56 km (hasta junta con Loa en Chacauce)	**619**	Quebradas al norponiente de Calama y Quebrada Opache

Fuente: elaboración propia, datos DGA 2013.

El régimen del Loa es predominantemente pluvial de altura: solo el 20% de la superficie de cuenca capta precipitaciones significativas y las bajas temperaturas limitan el deshielo, por lo que no se verifica recarga significativa de origen nival en invierno. Desde Chiu-Chiu, el Loa gira al oeste pasando por Calama, donde se le une el río San Salvador, y luego prosigue hacia el norte por aproximadamente 80 km hasta Quillagua, para finalmente desembocar en el Pacífico en caleta Huelén (Sitrural, 2021). Un balance hídrico de tramo elaborado para el SHAC de Calama cuantifica los flujos del río Loa a su paso por la ciudad. En la Tabla 8 se detallan los caudales y balances de la zona.

Tabla 8 Balance hídrico cuenca Calama.

Tramo	Fuente de datos	Caudal (m³/s)	Sub-balance (m³/s)
Aguas arriba Calama	Estaciones Escorial / Yalquincha	1,776	—
Demanda de Calama	DGA (2014b)	−1,066 (Canales)	0,71
Aguas abajo Calama (junta San Salvador / Loa)	Aforos	0,631	—
Aporte río San Salvador	Estación + aforos	−0,343	0,288
Infiltración estimada al acuífero SHAC	Balance total	—	0,422 (422 L/s)

Fuente: Elaboración propia, información SIT Nº 421DGA, 2017.

Este resultado indica que en el tramo Calama, el Loa pierde unos 422 L/s por infiltración hacia el acuífero, valor coherente con los 311 L/s de infiltración estimados por el modelo numérico (DGA, 2014), considerado referencial dada la incerteza en las variables).

Figura 11 Cuencas hidrográficas Región de Antofagasta



Fuente: SIT. N° 472 DGA, 2021.

4.2.3 Sistema acuífero de Calama

El acuífero de Calama, definido oficialmente como Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC) Calama, presenta una arquitectura multicapa descrita por la autoridad (DGA, 2014) y estudios posteriores, en Tabla 9 se detallan las características del SHAC Calama.

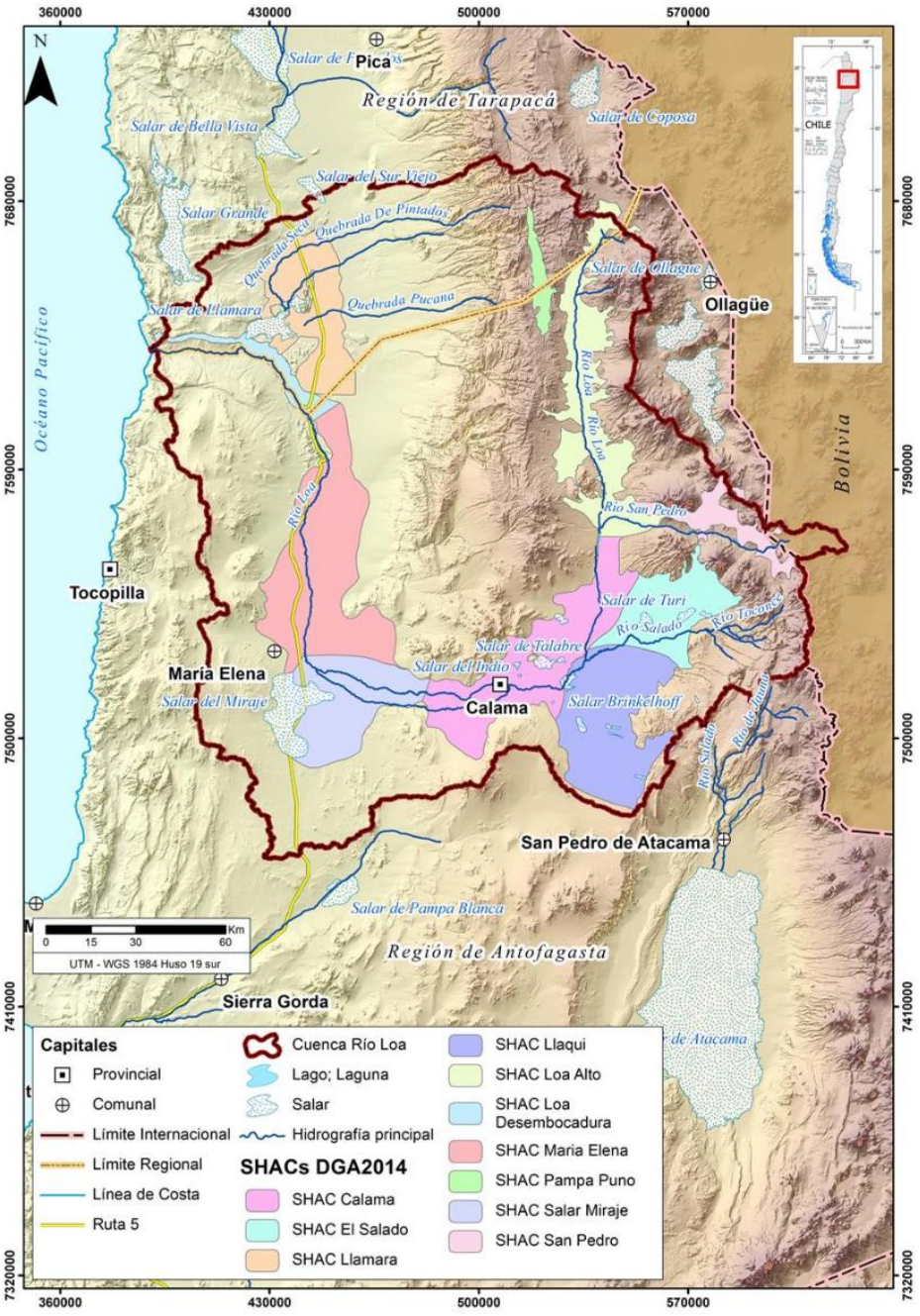
Tabla 9 Características SHAC Calama

Unidad hidrogeológica	Formación	Espesor	Tipo	Características
Acuífero Superior (ACS)	Opache / Loa (calizas)	50 m	Libre	Alta conexión con el río Loa, la extensión continua en la parte central de la cuenca, se acuña hacia el rajo DMH, Industrial Chuquicamata y sur
Acuitardo (ACT)	Arcillas y limos arenosos	Variable	Confinante	Se extiende ampliamente en la parte central; se acuña hacia el este y desaparece localmente al poniente del muro sur y aguas abajo del muro oeste del DR Talabre, poniendo en contacto ACI con ACS
Acuífero Inferior (ACI)	Calama (gravas y arenas)	150 m	Confinado (sur/este) a libre (NO/O)	Baja permeabilidad, escasa renovación. Se acuña al oeste de Calama por alzamiento del basamento (Falla Chintoraste). Libre al sur del cerro Milagro y en cerro Calama donde aflora en superficie
Basamento (BAS)	Rocas intrusivas y metamórficas	—	Impermeable	Unidad basal; aflora en cerro Milagro, cerro la Cruz (al oeste de Calama) y bordes de cuenca

Fuente: elaboración propia, información SIT Nº 421 DGA, 2017.

A continuación, se visualiza en Figura 12 el SHAC Calama actualizado y delimitado mediante información reciente que cuenta la autoridad en la zona a partir de datos propios y de terceros (SIT N°421 DGA, 2017).

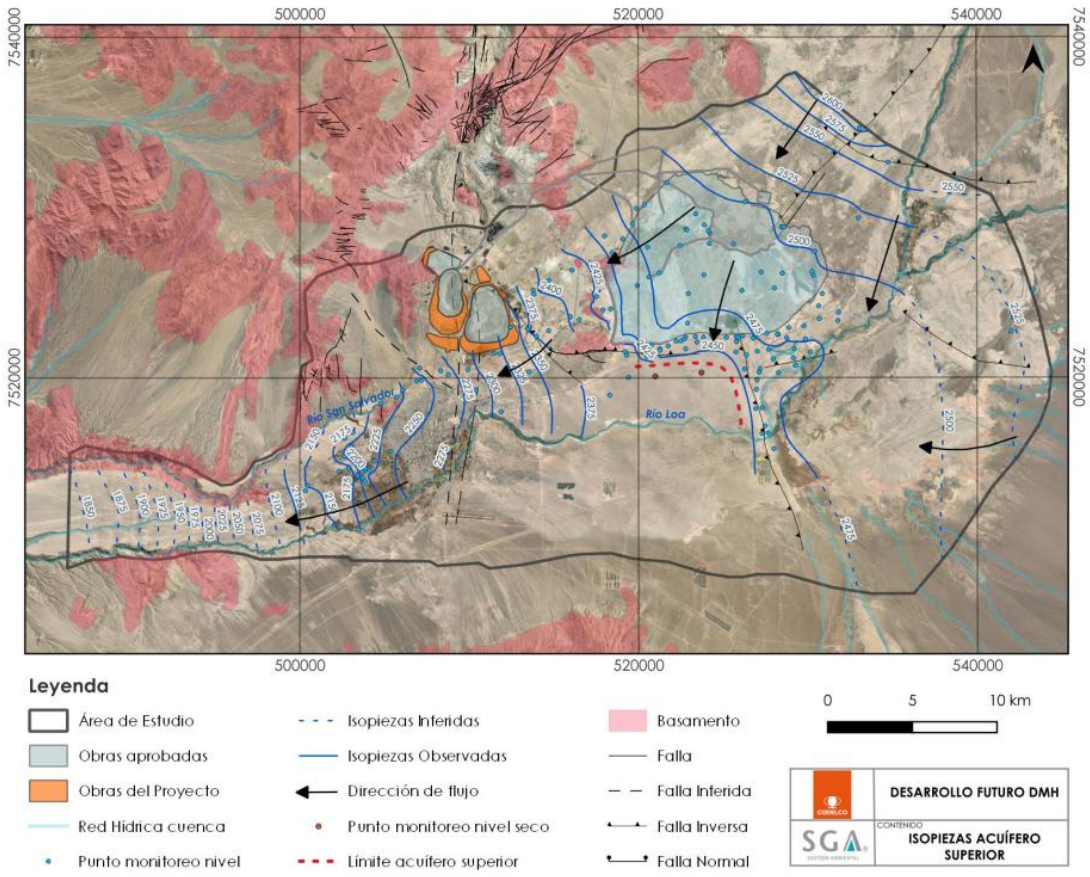
Figura 12 SHAC Calama, región de Antofagasta



Fuente: SIT Nº 421 DGA, 2017.

En términos de niveles piezométricos, la información actualizada es la expuesta en el proceso ambiental de DMH donde se exponen las isopiezas por cada sector acuífero como se visualiza en Figura 13 de niveles piezométricos para el acuífero inferior.

Figura 13 Niveles piezométricos acuífero superior

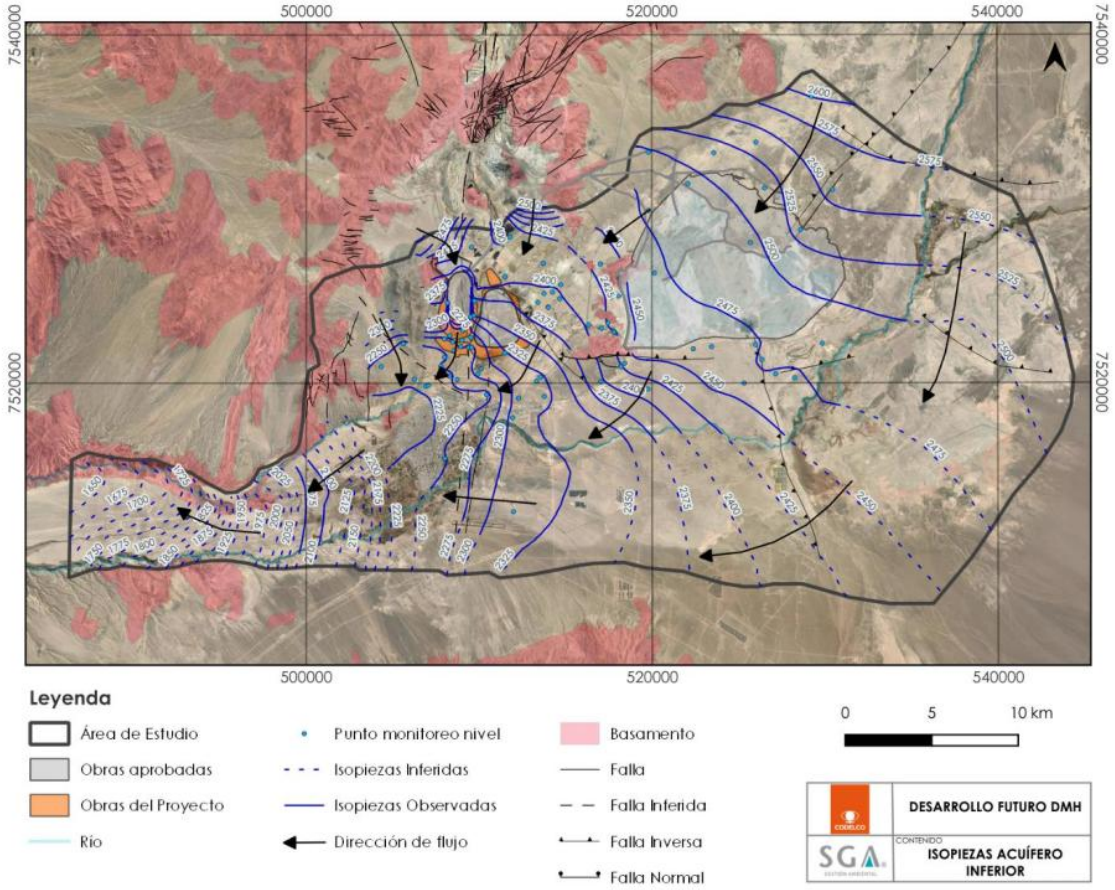


Fuente: SGA, 2025.

Se puede denotar que los niveles de agua en este acuífero son variados, teniendo zonas donde los niveles son someros que van oscilando desde los 5 a 15 metros como en el denominado salar del indio, y profundidades que pueden legar a los 80 metros en algunos sectores (SGA, 2025). A continuación, en Figura 14, se presentan los niveles piezométricos para el acuífero inferior.

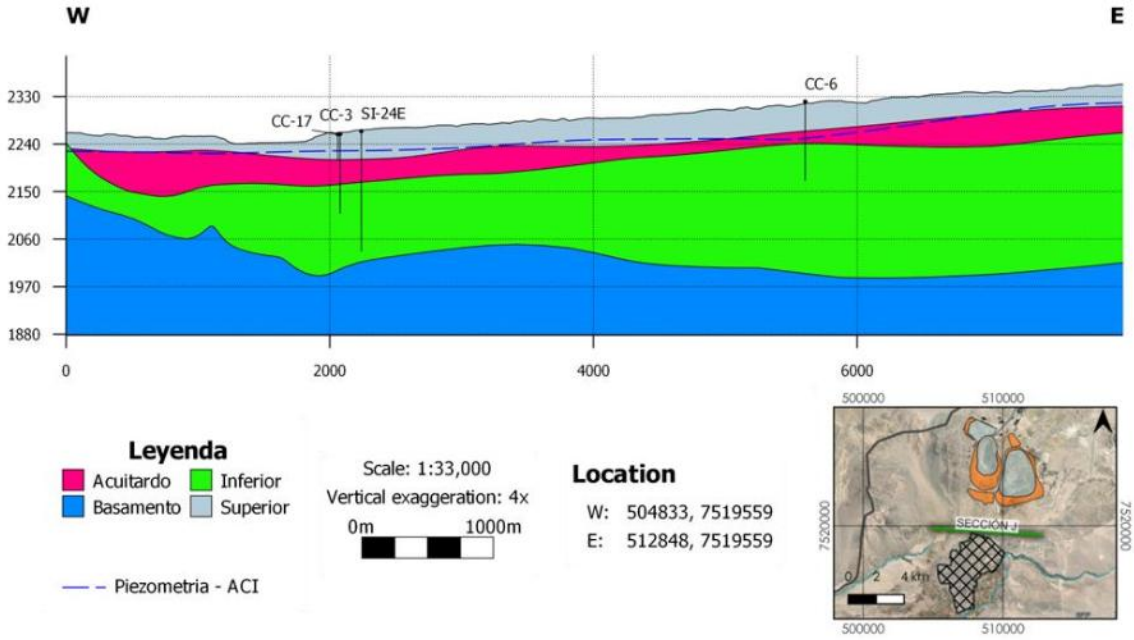
Este acuífero en términos de profundidades del nivel acuífero alcanza potencias mucho más elevadas que el acuífero inferior de 100 metros o más en algunos sectores de la zona norte principalmente, lo anterior en base a la conceptualización presentada por SGA en el modelo hidrogeológico conceptual de la zona (SGA, 2025). Otro punto relevante marca que, además de ser subyacente al acuífero superior y acuitardo en gran parte de la zona donde se plantean focalizar las medidas de mitigación por Codelco. Lo anterior se expone de mejor forma en la Figura 18 de secciones hidrogeológicas señalada por el mismo estudio.

Figura 14 Niveles piezométricos acuífero inferior



Fuente: SGA, 2025.

Figura 15 Secciones hidrogeológicas DMH



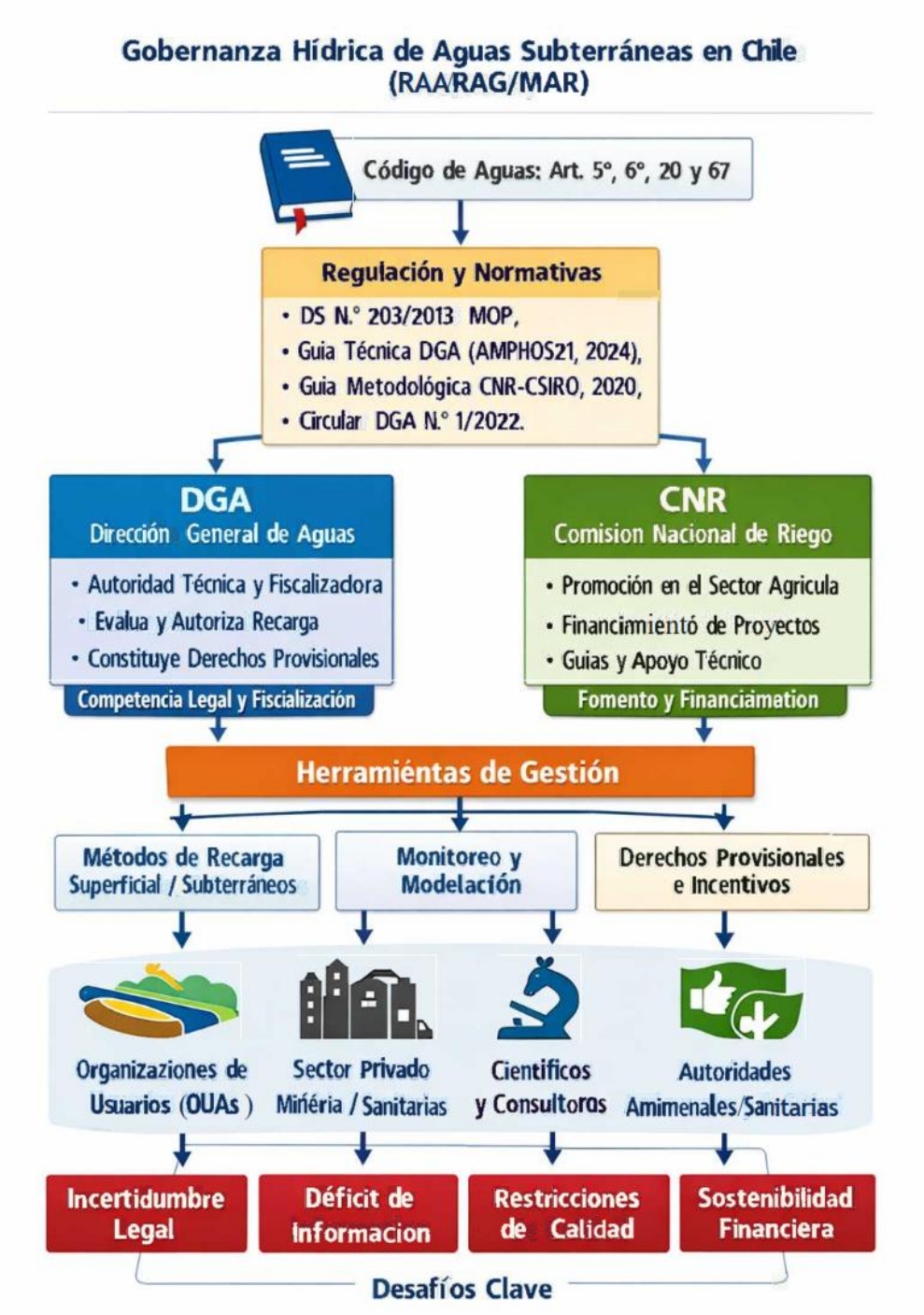
Fuente: SGA, 2025.

4.2.4 Gobernanza hídrica y desafíos institucionales

La gobernanza del agua subterránea en Chile se caracteriza por un marco normativo en evolución, una institucionalidad fragmentada y una carencia de información hidrogeológica sistemática que limita la implementación a escala de medidas técnicas como la recarga artificial de acuíferos (RAA) y/o la recarga gestionada de acuíferos (RGA/MAR). La bibliografía analizada muestran que en Chile se ha incorporado la recarga artificial en el Código de Aguas, leyes de medio ambiente y en guías técnicas nacionales, pero persisten vacíos sobre derechos de recuperación, criterios de calidad para aguas de aporte y procedimientos de fiscalización; por ello la expansión de MAR depende tanto de mejoras técnicas (monitoreo, pilotos) como de ajustes regulatorios e instrumentos de financiamiento que vayan en la línea de fomento de este tipo de técnicas sustentables. (AMPHOS21, 2024; CSIRO, 2020). Como se menciona en capítulos anteriores, la gobernanza relacionada con la recarga artificial desde un punto de vista de normativa está contemplada en el *Código de Aguas* y en reglamentos y circulares de la Dirección General de Aguas (DGA), que definen procedimientos para autorizar obras y constituir derechos provisionales con cargo a la recarga; sin embargo, la normativa vigente es amplia y genera incertidumbre sobre responsabilidades, parámetros de calidad y exigencias de línea base (AMPHOS21, 2024; CSIRO, 2020.). Las instituciones que principalmente controlan y accionan a través de esta normativa son la Dirección General de Aguas (DGA), quien es la autoridad técnica y fiscalizadora que recibe memorias técnicas, exige modelaciones técnicas, líneas base y planes de monitoreo para autorizar obras de recarga, también cuenta con alcance de dar autorizaciones para constituir derechos provisionales condicionados a pilotos y resultados específicos. (AMPHOS21, 2024; DGA, 2024). También se cuenta con la Comisión Nacional de Riego (CNR) quienes, entre otras funciones específicas, promueven guías metodológicas y apoyo técnico para RAG en el sector agrícola, con alcance operativo y criterios por fases. (CSIRO, 2020). Otros de los actores relevantes son las organizaciones de usuarios (juntas de vigilancia, Comunidades de Aguas Subterráneas (CASUB) y asociaciones de canalistas, los cuales son actores operativos y gestores locales que han liderado, a modo de ejemplo, proyectos piloto y esquemas colectivos de recarga, siendo su fortalecimiento clave para operación y mantenimiento. Finalmente, el sector privado (minería, sanitarias, entre otros, promueven soluciones complementarias (p. ej., uso de agua de mar desalinizada, inyección como barrera hidráulica) y financian pilotos en cuencas críticas. A continuación (Figura 19), a partir de la información bibliográfica analizada se ha elaborado un flujo simplificado que permite reconocer la normativa que rige efectuar proyectos de RAA, los principales agentes de la autoridad con preponderancia en la gestión y control de proyectos de recarga, actores y desafíos claves en esta materia. Debido a lo anterior, la estrategia adoptada de transición hacia fuentes marinas pretende reducir la presión sobre los acuíferos continentales. Sin embargo, la infraestructura de desalinización y bombeo se concentra en el extremo norte, por lo que el SHAC Calama seguirá enfrentando tensiones asociadas a captaciones históricas, sobreasignación de derechos y requerimientos de nuevos proyectos. Los dos ejes de respuesta que se han desarrollado en Calama la recarga gestionada de acuíferos y la sustitución por agua de mar son complementarios, mientras la desalinización resuelve la fuente de suministro

industrial, la RGA aborda la restauración ambiental de los acuíferos dañados y la protección de ecosistemas dependientes del agua subterránea.

Figura 16 Gobernanza de proyectos RAA en Chile



Fuente: Elaboración Copilot IA.

4.3 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS Y BASE DE ESTUDIOS DGA

El conocimiento hidrogeológico de la zona de Calama se sustenta en una extensa base de estudios técnicos desarrollados a lo largo de décadas por diferentes actores de tipo público privados. Utilizando como base y fuentes principales de información el repositorio que la autoridad DGA mantiene de forma online (https://repositoriodirplan.mop.gob.cl/) y la información de consulta online de estudios ambientales que mantiene la autoridad SEA (https://www.sea.gob.cl/) en la zona de Calama se analizó y clasificaron los estudios relevantes que permitieran aportar conocimiento, condiciones generales y caracterización hidrogeológica especifica de esta zona. Cabe aclarar que, si bien esta recopilación no corresponde al total de la información existente a la fecha, se ha seleccionado con foco en los alcances del presente estudio y sus resultados La Tabla 1010 permite visualizar los principales estudios de caracterización en la zona recopilados por la DGA:

Tabla 10 Estudios de caracterización en la zona de Calama

N.º	Año	Documento	Autor / Elaborador	Principal objetivo	Aporte a la caracterización de acuíferos
1	1976	**Investigación de los Recursos Hidráulicos en el Norte Grande**	CORFO / DGA	Establecer un inventario regional de recursos hídricos y bases cartográficas iniciales.	Proporciona datos históricos de disponibilidad y ubicación de cuencas que sirven como línea base para estudios hidrogeológicos en Calama.
2	1986	**Estudio del Mapa Hidrogeológico Nacional**	IPLA / DGA	Mapear unidades hidrogeológicas a escala nacional para clasificar acuíferos y formaciones.	Define unidades geológicas y acuíferas regionales que permiten ubicar y clasificar las formaciones presentes en la cuenca de Calama.
3	1987	**Balance Hídrico de Chile**	DGA	Estimar balances hídricos nacionales y metodologías de recarga y disponibilidad.	Aporta metodologías y estimaciones de recarga que sirven de referencia para balances locales en Calama.
4	1995	**Estudio Hidrogeológico Sector de Calama**	Álamos y Peralta / Minera Leonor	Describir la arquitectura hidrogeológica local mediante trabajo de campo y pruebas.	Describe formaciones, espesores y parámetros hidráulicos iniciales, y aporta datos de niveles freáticos y conectividad.
5	1995	**Análisis de Extracciones Calama-Quillagua (SIT Nº20)**	IPLA / DGA	Cuantificar extracciones históricas y evaluar su impacto sobre el acuífero.	Cuantifica la presión de extracción y evidencia la relación extracción-recarga en el acuífero de Calama.
6	2000	**Solicitud Declaración Agotamiento Río Loa y afluentes**	DARH / DGA	Documentar evidencia técnica-administrativa de agotamiento de recursos superficiales.	Sistematiza evidencia de agotamiento y aporta criterios administrativos sobre límites de explotación del acuífero.

7	2003	**Evaluación Recursos Hídricos Calama y Llalqui (SIT Nº85)**	DEP / DGA	Modelar y estimar recarga y caudales explotables sostenibles a escala local.	Entrega estimaciones de recarga y caudales explotables, identificando sobreasignación de derechos.
8	2003	**Modelación Hidrogeológica Pampa Llalqui (SDT Nº152)**	DEP / DGA	Desarrollar modelos conceptuales y numéricos para simular la dinámica del acuífero.	Proporciona estructura conceptual y parámetros hidráulicos que permiten simular respuestas a extracciones.
9	2004	**Diagnóstico y Clasificación Cursos y Cuerpos de Agua, Cuenca Río Loa**	Cade Idepe / DGA	Integrar la caracterización de cuerpos de agua superficiales y subterráneos en la cuenca.	Aporta evidencia sobre la interacción río–acuífero y la existencia de surgencias y ecosistemas dependientes.
10	2014	**Evaluación Hidrogeológica del Acuífero de Calama y del río Salado**	DGA	Actualizar diagnóstico hidrogeológico y evaluar estado de explotación y recarga.	Define unidades acuíferas, espesores y conectividad con el río Loa, y documenta recarga baja y señales de sobreexplotación.
11	2017	**Sectorización de Acuíferos; Estudio de recarga (resumen)**	Hídrica Consultores & DGA	Cuantificar recarga difusa y comparar recarga natural con derechos reconocidos.	Aporta estimaciones puntuales de recarga (mm/año y L/s) y evidencia la brecha entre recarga y extracción.
12	2017	**Tesina hidrogeológica local (ej.: Bulboa)**	Ignacio Bulboa (Univ. de Chile)	Analizar circulación subterránea y desconexiones hidráulicas locales mediante datos de campo.	Identifica flujos regionales y desconexiones locales, aportando criterios para zonificación y diseño de pruebas.
13	2023	**Diagnóstico de Metodología para la Presentación y Análisis de Proyectos de Recarga Artificial de Acuíferos**	Amphos21 / DGA	Establecer metodología y criterios técnicos para proyectos de recarga artificial de acuíferos.	Proporciona requisitos de caracterización, parámetros medibles y criterios de selección aplicables a Calama.
14	2023	**Actualización 2023 Modelo Hidrogeológico Conceptual; Numérico Anexo 4-3 "Informe de Actualización a Junio 2022"**	SGA	Actualizar el modelo hidrogeológico conceptual y numérico considerando información registrada de aguas subterráneas (niveles, concentraciones de sulfato, análisis de parámetro hidráulico e isótopos y caudales de extracción) y aguas superficiales (caudales y concentraciones de sulfatos) hasta junio de 2022	Mejorar conceptualización hidrogeológica del acuífero de Calama considerando la interacción río Loa-acuífero y dinámicas subterráneas.

Fuente: Elaboración propia.

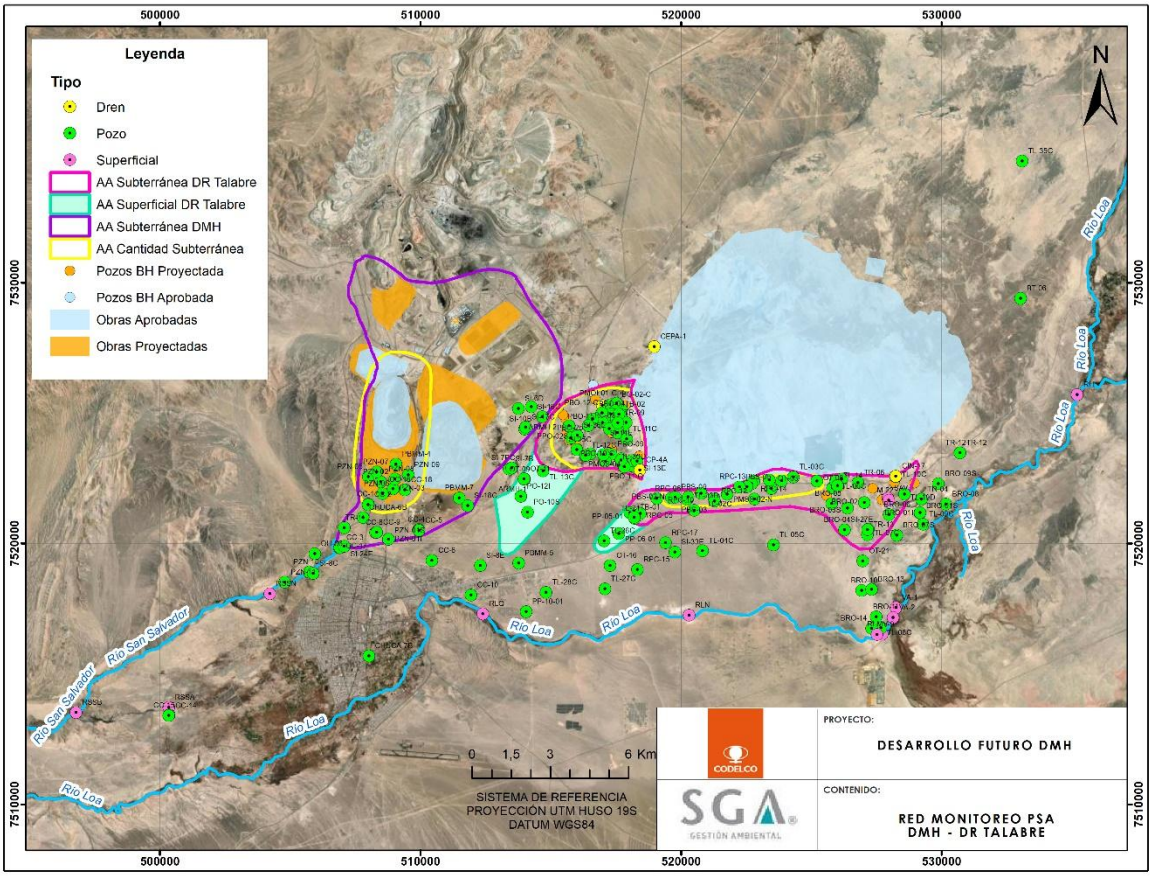
4.4 DIVISIÓN MINISTRO HALES DE CODELCO

La División Ministro Hales (DMH) opera como una unidad productiva de Codelco**,** la corporación estatal chilena dedicada a la explotación del cobre. Codelco mantiene una estructura de gobierno corporativo pública y centralizada, con divisiones operativas que gestionan la operación, la inversión y el cumplimiento ambiental (Codelco, 2026). La DMH se enmarca en la estrategia corporativa de sustitución progresiva de aguas continentales por agua de mar desalinizada y en compromisos de mitigación ambiental formalizados en su RCA más reciente. DMH es una operación de escala mediana-grande dentro del distrito minero de Calama, con procesos integrados de extracción, concentración y manejo de relaves. Su rol es estratégico para la continuidad productiva de Codelco en el norte, y su planificación de largo plazo (SEA, 2026) condiciona inversiones en infraestructura hídrica y energética. En términos de características generales y productivas, la división cuenta con una extracción con capacidad proyectada a 550 kilo toneladas por día (ktpd), con un procesamiento de su planta concentradora a 65 (ktpd, lo que implica una producción anual de 170 mil toneladas de cobre fino a 200 mil toneladas. En términos de insumos proyecta un uso de agua desalada o provistas por terceros autorizados (CODELCO, 2026). En términos de dotación de personal, la división cuenta con aproximadamente 4.000 trabajadores, distribuidos entre personal propio y contratistas externos, con fuerte presencia de servicios especializados. En términos de vida útil, de la división fue extendida hasta el año 2054, con una inversión de US$2.800 millones mediante la reciente obtención de Resolución de Calificación Ambiental (RCA) N° 20260200114, emitida el 28 de enero de 2026, aprueba el proyecto “Desarrollo Futuro DMH” (SEA, 2026). Es precisamente en esta aprobación ambiental donde la Corporación asumió una serie de compromisos hídricos que representan grandes desafíos en su materialización, a continuación, se detallan listan de forma general:

- Implementación de Barreras hidráulicas con foco en la protección del río San Salvador y el acuífero Calama-Yalquincha.
- El uso de agua exclusivamente desalada o de terceros autorizados (Derechos).
- Una actualización de un Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) que consiste en un monitoreo piezométrico y de calidad de aguas subterráneas en el acuífero de Calama mediante parámetros de seguimiento de niveles piezométricos, conductividad eléctrica, sulfatos, arsénico, caudales de extracción y calidad del agua de aporte, entre otras variables.
- Una actualización de un Plan de Alerta Temprana (PAT) que consiste en un plan de seguimiento al rendimiento de las barreras hidráulicas de mitigación planteadas durante la evaluación ambiental y cuya promesa es lograr contención de los efectos de descensos de niveles y de calidad históricos y futuros del proyecto en operación.

En términos de ubicación espacial (Figura 14), este plan se puede visualizar como una numerosa red de puntos que de forma estimada le permitirá vigilar y hacer seguimiento a la variable hidrogeológica en el acuífero de Calama.

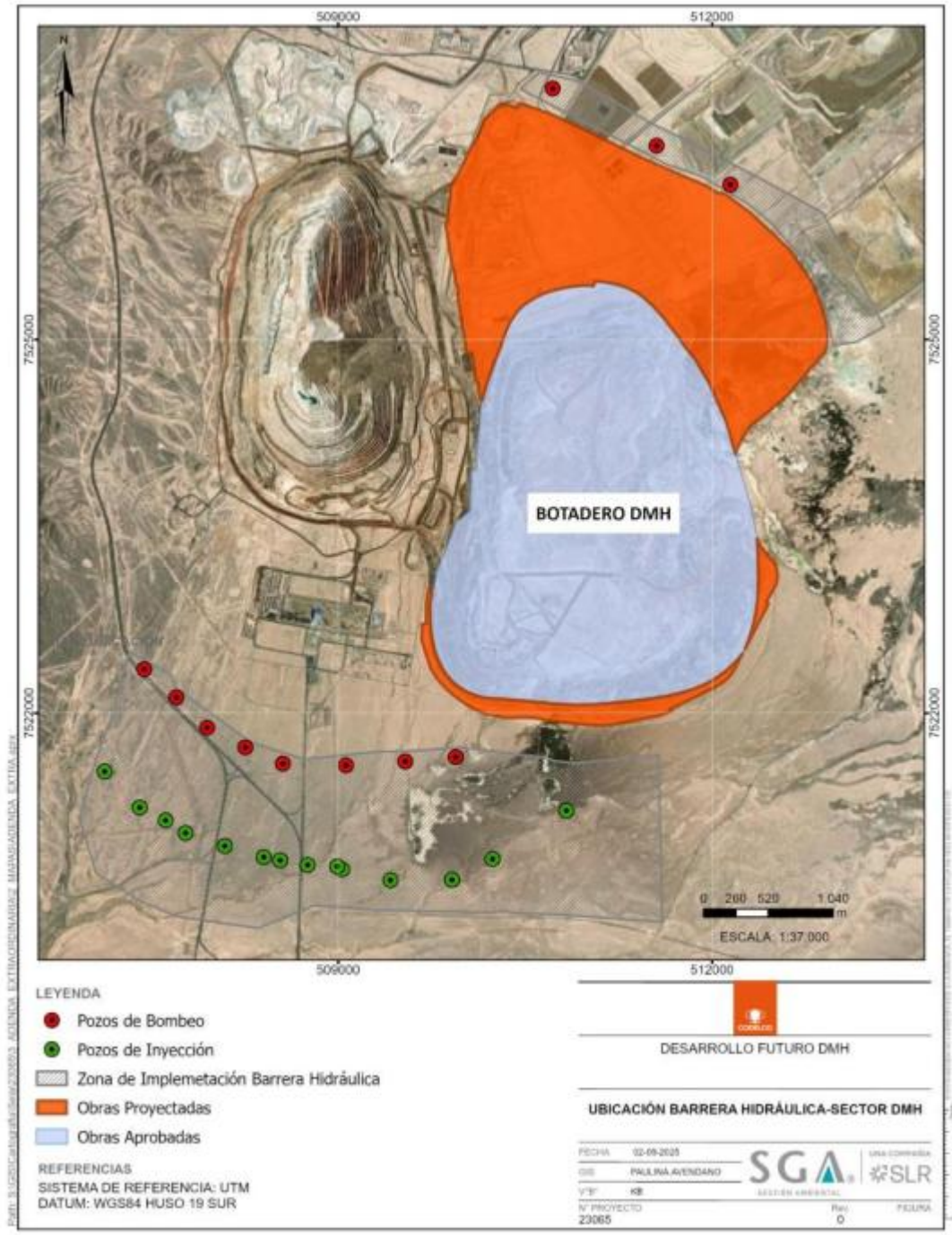
Figura 17 PSA DMH.



Fuente: SGA, 2025.

En la Figura 18 se visualiza las barreras hidráulicas positivas planteadas por DMH para hacerse cargo de los efectos ambientales producidos por el proyecto, principalmente en descenso de niveles y de calidad de aguas en los contornos del rajo y aguas abajo del mismo. Cabe resaltar que la división ha comprometido barreras hidráulicas adicionales en el entorno del Tranque de relaves de Talabre, los cuales no son objeto de estudio y análisis del presente trabajo.

Figura 18 Barreras Hidráulicas DMH

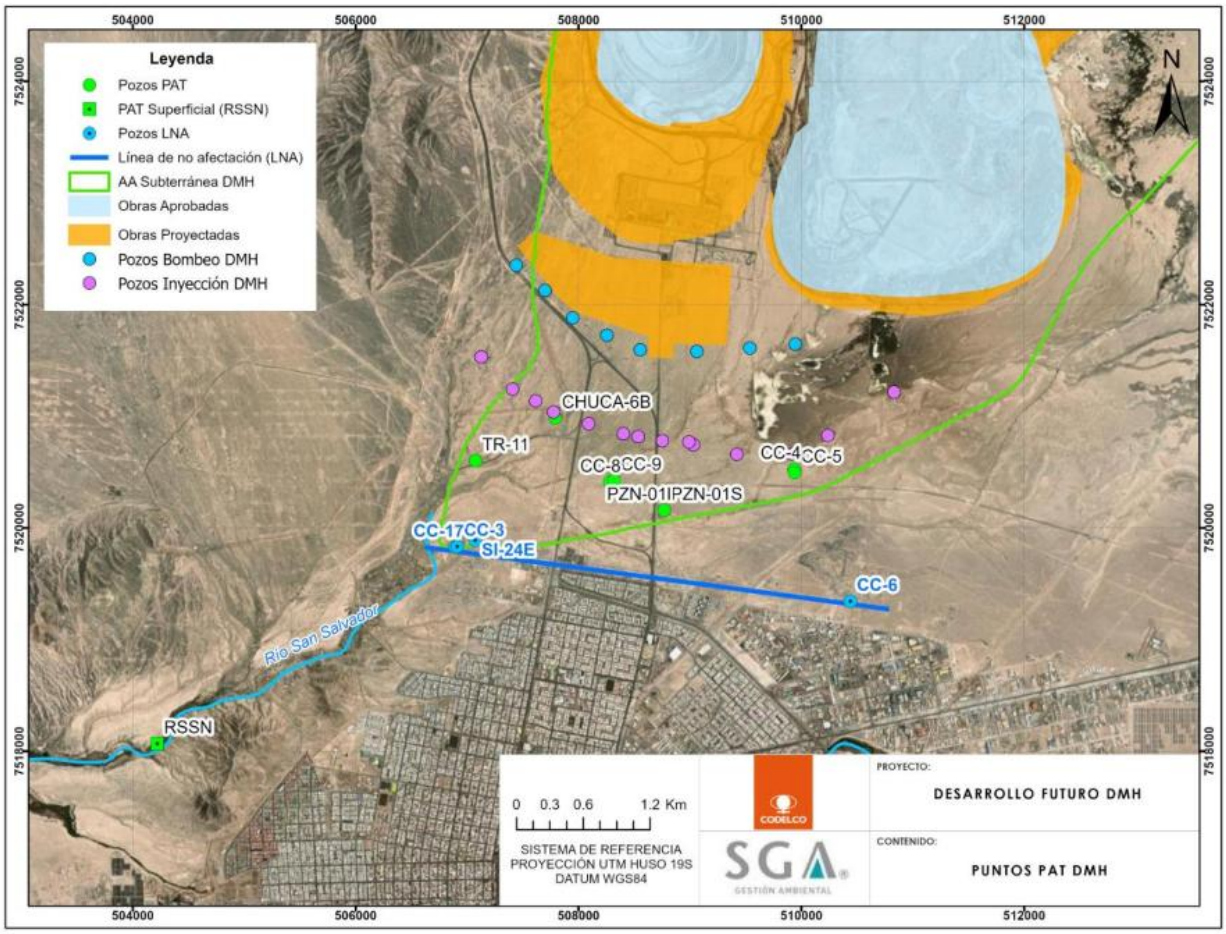


Fuente: SGA, 2025.

Para el seguimiento, control y eficiencia de estas barreras hidráulicas, DMH comprometió en el marco ambiental una herramienta de seguimiento denominada como PAT, mediante la cual se establecieron, los objetivos de seguimiento específicos, las áreas de afectación por los efectos de niveles y calidad del proyecto e históricos, los

parámetro de control centrales a seguir (niveles y sulfatos), los umbrales para los parámetros claves y un esquema de funcionamiento establecido mediante tres etapas centrales, las cuales controlaran la intensidad de activación de las barreras hidráulicas en el sector de DMH. En la Figura 19 se presenta geográficamente la ubicación genera de los puntos de control establecidos para este PAT. Estos puntos de control y gestión del PAT se componen principalmente de pozos de aguas subterráneas de monitoreo, pozos de extracción, pozos de inyección y puntos de aforos en cauces superficiales cercanos como el río San Salvador.

Figura 19 Puntos de control PAT DMH



Fuente: SGA, 2025.

4.4.1 Tramitación de Permiso Ambiental Sectorial (PAS) del artículo 158 del D.S.

Codelco como parte de su evaluación ambiental durante el proyecto "Desarrollo Futuro DMH", de la División Ministro Hales, requirió la obtención del PAS 158 debido a la necesidad de implementar medidas de mitigación para contrarrestar los impactos hidrogeológicos significativos derivados de la profundización del rajo y la operación del Depósito de Relaves (DR) Talabre. Este permiso, regulado por el artículo 66 del Código de Aguas y el artículo 158 del Reglamento del SEIA, es competencia para su otorgamiento de la Dirección General de Aguas (DGA). La recarga artificial se justifica técnicamente para evitar descensos en los niveles freáticos del acuífero Yalquincha y para mejorar la calidad química del agua subterránea mediante la dilución de la pluma histórica de sulfatos proveniente del complejo industrial (SGA, 2025).

Los principales objetivos ambientales de la recarga artificial en este proyecto fueron:

- Conservar y proteger el acuífero, evitando su colmatación o la contaminación de sus aguas
- Mitigar la disminución de niveles en el acuífero inferior de Calama producto de la actividad minera
- Mantener los caudales superficiales en la Naciente del Río San Salvador
- Controlar y diluir la pluma de sulfatos, actuando como una barrera hidráulica positiva que resguarde el acuífero protegido Calama-Yalquincha

El alcance del sistema de recarga se proyecta abarque tres sectores estratégicos definidos mediante modelos numéricos: el Sur de DMH, el Muro Oeste y el Muro Sur del Tranque Talabre. Los requisitos solicitados y antecedentes técnicos para el otorgamiento del PAS 158, el titular debe presentar contenidos técnicos y formales específicos que aseguren la protección del recurso hídrico. A continuación, se resumen los antecedentes técnicos solicitados:

- Descripción de las obras: Se contempla la construcción de pozos de inyección con profundidades de entre 50 y 100 metros, utilizando tuberías de PVC de alta resistencia.

- Caracterización del agua de inyección: El recurso provendrá principalmente de una planta desaladora, cumpliendo con la norma de riego NCh 1333 y presentando una calidad superior a la del acuífero receptor.

- Descripción hidrogeológica: Se identifican 6 unidades hidrogeológicas (UH), siendo las más relevantes el Acuífero Superior (UH-2) y el Acuífero Inferior (UH-5).

A continuación, en Tabla 11 se detallan las medidas establecidas en el marco ambiental con la autoridad.

Tabla 11 Medida DMH

Zona de Inyección	Número de Pozos	Caudal Estimado (L/s)	Objetivo Principal
Sur de DMH	10 a 15	40 - 65	Compensar descenso por rajo y diluir pluma.
Muro Oeste	2 a 4	20 - 30	Reforzar barrera hidráulica del DR Talabre.
Muro Sur	1 a 3	05 - 15	Control de infiltraciones en sector sur.

Fuente: Elaboración propia

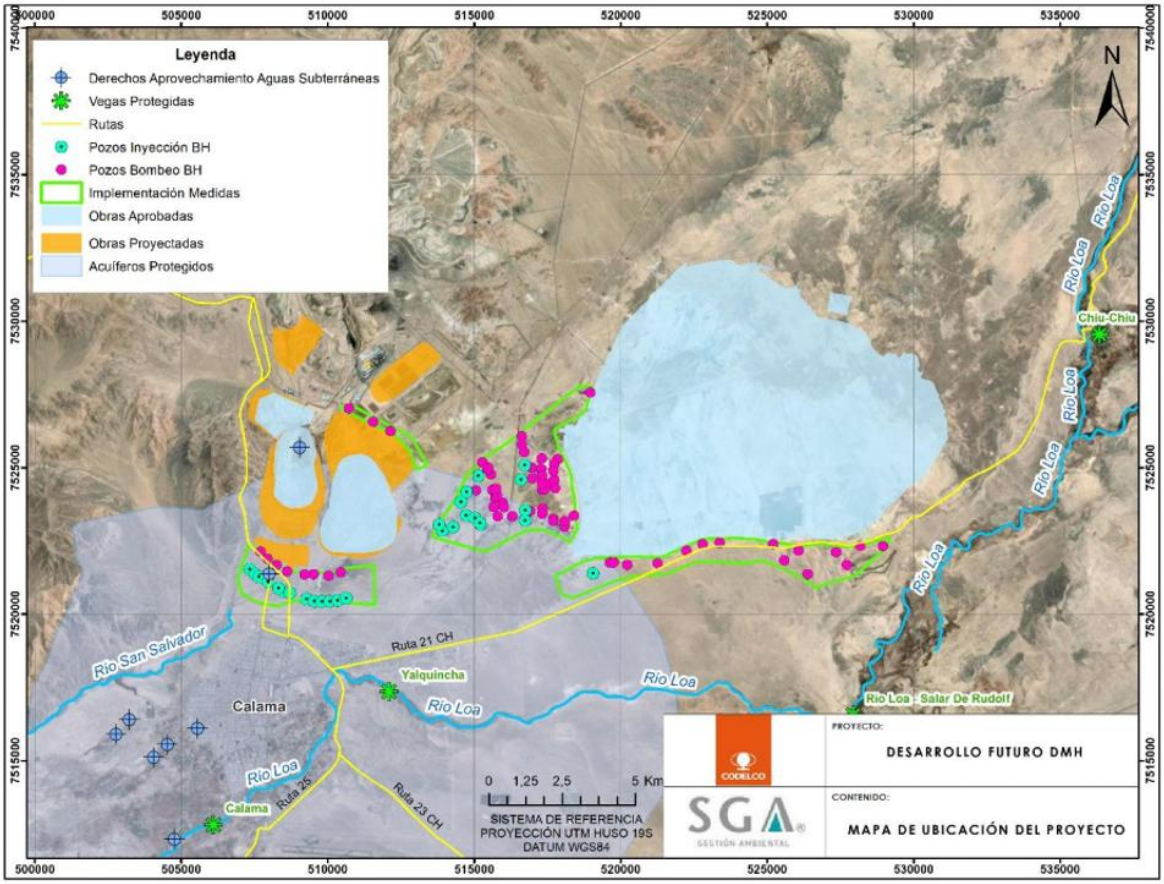
Estas medidas cuentan con Plan de Monitoreo y Plan de Acción (PAT), este plan apunta a la eficiencia de la recarga se verificará a través de un Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) integrado. El monitoreo incluye registros mensuales de niveles piezométricos y calidad del agua (21 parámetros fisicoquímicos) en estaciones superficiales y pozos específicos. En la Figura 20 se logra visualizar los pozos de inyección para RAA y los correspondientes pozos de monitoreo.

El Plan de Acción (PAT) se estructura como un árbol de decisiones con tres etapas principales:

- Etapa 1: Monitoreo basal. Sin acciones adicionales si no hay superación de umbrales en 9 meses
- Etapa 2 (Umbral Intermedio): Activación de pozos de inyección adicionales y análisis causal para descartar fuentes externas
- Etapa 3 (Umbral Límite): Acciones de remediación inmediata, como la restitución de aguas superficiales y simulaciones para nuevos pozos

Es importante resaltar que Codelco comprometió al menos tres opciones de uso para ejecutar la recarga específica para la inyección que constaron en fuentes desaladas, tercero con Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas (DAA), y derechos de aprovechamiento propios, amparado en contar con flexibilidad al respecto en términos de suministro y contingencias. Dado lo anterior, se utilizó dos estrategas claras para dar sustento técnico ante la autoridad, la primera fue caracterizar la calidad de la zona de la medida mediante pozos que contaba en el sector de donde se efectuara la recarga, mientras que, para la fuente a inyectar se utilizó el sustento de igualar esta calidad basal del acuífero (parámetros de referencias) o aseguraría de mejorarla con respecto a la línea basal del acuífero. Si bien esto no es lo tradicional, finalmente quedo en términos de compromisos y acordado con la autoridad DGA. Los parámetros de calidad caracterizados y a comprometer de la fuente agua desalada se resumen en la Tabla 12.

Figura 20 Pozos de inyección para recarga artificial y pozos de monitoreos DMH



Fuente: Elaboración propia

Tabla 12 Parámetros de calidad del agua de inyección (Planta Desaladora)

Parámetro	Unidad	Valor
pH	-	7,0 - 8,5
Sólidos Disueltos Totales (TDS)	mg/L	< 600
Sulfato (SO4)	mg/L	~ 200
Turbiedad	NTU	< 1

Fuente: Elaboración propia.

4.5 MARCO TEÓRICO DEL ESTADO DEL ARTE

De acuerdo con los antecedentes revisados y análisis bibliográficos descritos en etapas anteriores, en Figura 21 se ha elaborado en un mapa conceptual de pasos, que ayuda a comprender los alcances, la metodología, su aplicación, los resultados, la interpretación y recomendaciones de la investigación. Así mismo, resulta relevante establecer una metodología y sus pasos de aplicación específicos que puedan detallar de forma clara y precisa como serán logrados los alcances del presente trabajo, estos se expondrán en los capítulos posteriores.

Figura 21 Mapa Conceptual



Fuente: Elaboración Gemini IA.

5 PROPUESTA METODOLOGICA DE TRABAJO

Este capítulo constituye el núcleo operativo del estudio, dado que se aborda la revisión teórica y los antecedentes técnicos en un proceso aplicado y secuencial para seleccionar las alternativas más viables de recarga artificial de acuíferos (RAA) en Calama. Se organiza en cuatro subetapas que permiten pasar de la identificación preliminar de métodos hasta la definición de zonas específicas con factibilidad de implementación.

ETAPA 1: Elaboración del estado del arte

Los objetivos específicos de esta etapa consisten en sistematizar y analizar antecedentes técnicos, normativos y experiencias nacionales e internacionales sobre recarga artificial de acuíferos, con foco en identificar métodos aplicables, revisar el marco regulatorio vigente y caracterizar el SHAC Calama como base para evaluar alternativas viables en el sector noreste de Calama.

ETAPA 2: Alcances y caracterización del sujeto de estudio

Se desarrollará una descripción detallada de los métodos existentes de RAA existentes, los proyectos implementados en el contexto nacional e internacional. Adicionalmente se describirán las condiciones de relevancia que dominan en el área de estudio seleccionado, incluyendo características naturales de cuencas hidrográficas, el sistema acuífero, así como también factores de gobernanza y antecedentes de la División Ministro Hales enmarcados en sus compromisos ambientales suscritos ante la autoridad.

ETAPA 3: Establecer el marco teórico del estudio

En la etapa de marco teórico busca establecer la base conceptual que articula definiciones, enfoques, criterios técnicos y tendencias de la recarga artificial de acuíferos, permitiendo sustentar la investigación, orientar la metodología de análisis y vincular la evidencia recopilada con la formulación de alternativas para la gestión hídrica y ambiental del área de estudio.

ETAPA 4: Aplicación metodológica

Esta etapa se desarrollará sobre la base de distintas etapas y subetapas de carácter secuencial para la selección metodológica de alternativas de recarga y zonas adecuadas.

Subetapa 4.1. Bases de implementación para la zona de estudio

La generación de base de implementación para la zona de estudio permitirá reducir la incertidumbre sobre las zonas y métodos posibles para implementar RAA en el área de estudio. Para ello se abordarán cuatro ejes:

1. Identificar métodos de recarga aplicables con información secundaria
2. Analizar datos existentes de parámetros hidroquímicos e hidráulicos
3. Visualizar posibles brechas de información
4. Definir criterios para seleccionar alternativas y sectores. Se busca detallar las mejores alternativas posibles de aplicación para efectuar una recarga artificial de acuíferos en el sujeto de estudio planteado.

A continuación, se describe brevemente los temas abordados por cada eje propuesto.

Métodos de recarga.

En esta subetapa se identifican los métodos de recarga artificial de acuíferos potencialmente aplicables al sector hidrogeológico de estudio, utilizando información secundaria recopilada y analizada en el marco teórico y el Estado del Arte. El objetivo es establecer un conjunto inicial de alternativas técnicamente viables, considerando experiencias nacionales e internacionales, así como las características generales del acuífero de Calama.

Análisis de parámetros técnicos

La segunda subetapa metodológica considera el análisis sistemático de los datos técnicos existentes asociados a parámetros hidroquímicos e hidráulicos del sector hidrogeológico de Calama. Esta revisión se desarrollará exclusivamente en información de estudios previos desarrollados por organismos públicos, consultoras especializadas y proyectos mineros. Se analizan antecedentes de niveles freáticos, balances hídricos, arquitectura del acuífero y resultados de pruebas de bombeo e inyección disponibles, que en su conjunto ayudaran a comprender la capacidad de admisibilidad del acuífero. Lo anterior será complementado incluyendo el análisis hidroquímico que considera la calidad natural y antrópica del agua subterránea, incluyendo la presencia de arsénico, sulfatos y otros solutos, elementos clave.

Detección de brechas de información

A partir de la revisión de antecedentes técnicos, se identifican las principales brechas de información que limitan la evaluación detallada de proyectos de recarga artificial en el área de estudio.

Definir criterios de selección

Esta etapa de la propuesta metodológica consiste en la definición de criterios técnicos que permitan seleccionar las mejores alternativas de recarga artificial de acuíferos (RAA) y los sectores hidrogeológicos más adecuados para su implementación.

Serán evaluados aspectos hidrogeológicos e hidráulicos, tales como la conectividad del acuífero, su capacidad de infiltración y/o admisibilidad y la disponibilidad de información técnica; criterios hidroquímicos asociados a la calidad del agua y al riesgo de movilización de contaminantes; criterios normativos vinculados a la viabilidad regulatoria de los proyectos; y criterios operacionales y económicos de carácter comparativo.

Subetapa 4.2 Realizar una evaluación cuantitativa de los métodos seleccionados

En esta etapa del proceso se tomarán los principales criterios técnicos derivados de la etapa anterior con foco en la elaboración de una matriz comparativa simple que asigne valores objetivos de bajo, medio y alto para cada uno de los métodos seleccionados como alternativas. Esta evaluación significara medir y comparar, con base en datos objetivos, qué tan viables y efectivos son los métodos de recarga artificial previamente escogidos para el área de estudio. Para ello, se analizan variables técnicas relevantes —como capacidad de infiltración o inyección, comportamiento hidráulico, calidad del agua, factibilidad operativa y posibles restricciones del medio— con el fin de estimar su posible desempeño esperado en condiciones reales. Se busca transformar la revisión teórica y conceptual en una comparable que permita sustentar la selección de las alternativas más adecuadas para su eventual implementación en el sector de estudio

Subetapa 4.3 Analizar distintos métodos y su grado de factibilidad para implementar la recarga artificial de acuíferos

La aplicación de este análisis implica estudiar comparativamente las alternativas técnicas disponibles para recargar el acuífero y determinar cuáles pueden aplicarse de manera más adecuada en el área de estudio. Este análisis considera las características hidrogeológicas del sector, la disponibilidad y calidad del agua, los requerimientos operacionales, las restricciones ambientales y normativas, así como los costos y riesgos asociados a cada método. Se busca identificar no solo qué opciones existen, sino también cuál es su nivel real de viabilidad, de modo de sustentar una selección técnicamente fundada para una eventual implementación.

Subetapa 4.4. Proponer distintas opciones de zonas con factibilidad para implementar la recarga artificial de acuíferos

Esta etapa busca identificar y definir alternativas de sectores del área de estudio que presenten condiciones favorables para desarrollar este tipo de acciones para recarga artificial. Para ello, se consideran variables específicas que son claves en términos de factibilidad como lo son la permeabilidad del terreno, la profundidad y comportamiento del acuífero, la disponibilidad y calidad del agua, las restricciones ambientales, la accesibilidad y las condiciones operacionales del entorno.

ETAPA 5 Resultados evaluaciones

Durante esta etapa se consolidará los análisis de resultados sistematizados mediante una matriz de que dé cuenta de la efectividad de cada tipo de recargas artificial evaluada, esto permitirá como resultado generar una escala de valoraciones cualitativas de sectores hidrogeológicos con mayor potencial de recarga e inyección (alto, medio y bajo).

ETAPA 6 Conclusiones generales y recomendaciones

En este apartado se plantea concluir con al menos un par de alternativas de sectores para efectuar recarga artificial en el sector de Calama y que cuenten con una buena factibilidad de implementación de un proyecto para efectuar una recarga artificial de acuíferos, esta evaluación de plantea integrar variables económicas, ambientales y sociales.

Se establecerán recomendaciones de criterios y orientaciones que deben ser considerados para implementar un sistema de recarga en el entorno de la ciudad de Calama, lo que se presume aportara valor para una toma de decisiones en instancias decisionales al momento de evaluación de este tipo de proyectos.

En la Tabla 13 se describen las acciones y plazos en un cronograma general que abarcara todos los objetivos específicos para dar alcance a los resultados planteados y así concluir y recomendar.

Tabla 13 Cronograma de etapas y alcances del estudio

Objetivos	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25	S26	S27
1. Conocer y documentar la información desarrollada de las diferentes alternativas de recarga artificial (RAA)																											
2. Revisar el marco normativo actual en Chile y experiencias internacionales más relevantes																											
3. Asociar los diferentes conocimientos adquiridos del Magister en Gestión del Agua.																											
4. Comprender y revisar los diferentes métodos existentes para efectuar una recarga artificial de acuíferos																											
5. Inventariar y caracterizar la información desarrollada en el SHAC de Calama																											
6. Recopilar la información técnica y sus resultados en relación con parámetros de calidad y niveles en el sector de interés																											
7. Conocer y sistematizar las experiencias desarrolladas de recarga artificial de acuíferos en la zona																											
8. Formular un marco teórico con todos los antecedentes del estado del arte																											
9. Analizar todos los datos existentes de parámetros técnicos hidroquímicos e hidráulicos de la zona hidrogeológica																											
10. Visualizar las principales brechas de información existentes																											
11. Definir criterios que permitan seleccionar las mejores alternativas y sectores hidrogeológicos para realizar una RAA																											
12. Realizar una evaluación cuantitativa de los métodos seleccionados																											
13. Analizar distintos métodos y su grado de factibilidad para implementar la recarga artificial de acuíferos																											
14. Proponer distintas opciones de zonas con factibilidad para implementar la recarga artificial de acuíferos																											
15. Analizar los diferentes resultados mediante aplicación metodológica para los métodos evaluados																											
16. Analizar los diferentes resultados mediante aplicación metodológica para las zonas evaluadas																											
17. Concluir en base a los resultados obtenidos de alternativas para métodos y sectores																											
18. Recomendar los criterios y orientaciones que deben ser considerados para implementar un sistema de recarga																											

Fuente: Elaboración Propia.

6 APLICACIÓN METODOLOGICA

Este capítulo constituye el núcleo operativo del estudio, dado que se aborda la revisión teórica y los antecedentes técnicos en un proceso aplicado y secuencial para seleccionar las alternativas más viables de recarga artificial de acuíferos (RAA) en Calama. Se organiza en cuatro subetapas que permiten pasar de la identificación preliminar de métodos hasta la definición de zonas específicas con factibilidad de implementación.

6.1 BASES DE IMPLEMENTACIÓN

En esta sección se desarrollan los métodos de recargas aplicables, los datos de calidad y niveles existentes, se analizarán las brechas de información y se la expondrán los criterios para la selección de alternativas posibles en el marco de una RAA.

6.1.1 Identificación de métodos de recarga aplicables (información secundaria)

Los métodos denominados como RAA cuentan con resultados que permiten aprovechar la capacidad de almacenamiento natural de los acuíferos, permitiendo reducir pérdidas por evaporación propias de los embalses superficiales y, en determinados casos, mejorando la calidad del agua mediante procesos naturales de filtración y atenuación físico-química durante el tránsito subterráneo (Freeze & Cherry, 1979; IGRAC, s. f.). entre otras ventajas. En esta sección ahondaremos en detalle acerca de los tipos de métodos con la finalidad de verificar su posible aplicabilidad en la zona de estudio.

De acuerdo con la bibliografía especializada, a nivel general los métodos de recarga artificial se describen agrupándose en cuatro grandes categorías funcionales, en función del mecanismo mediante el cual el agua ingresa al acuífero (Espinoza, 2017; IAH-MAR, s. f.):

- Métodos de recarga superficial (spreading methods)
- Métodos de modificación de cauces (in-channel recharge)
- Filtración inducida desde cuerpos de agua superficiales (bank filtration)
- Recarga profunda mediante pozos (ASR / ASTR)

En Chile, las experiencias y proyectos en este tipo de materias han sido acotados, siendo aun incipientes comparados con la experiencia bibliográfica internacional, es por ello que durante el año 2014 la autoridad Dirección General de Aguas (DGA), dependiente del Ministerio de Obras Públicas (MOP) adjudicó a AMPHOS 21 CONSULTING CHILE LTDA (Consultor) el proyecto *“Diagnóstico de Metodología para la*

Presentación y Análisis de Proyectos de Recarga de Acuíferos" con el objetivo de desarrollar una Guía metodológica para la presentación, evaluación y análisis de proyectos de recarga artificial de acuíferos en Chile, este informe es utilizado como insumo y sustento por el presente estudio de evaluar zonas relevantes para efectuar recarga artificial de acuíferos en la zona de Calama, ya que incluye una metodología validada por la autoridad para ello. De acuerdo con ello, los principales métodos o dispositivos utilizados en proyectos de variadas escalas de para efectuar recarga artificial de acuíferos en Chile son:

1. Lagunas o balsas de infiltración
2. Pozos de inyección
3. Pozos de infiltración
4. Zanjas de infiltración
5. Muros de retención de cauces
6. Otros

También en nuestro país, la CNR con un enfoque agrícola, describe los métodos existentes en clasificaciones (CSIRO, 2020) de acuerdo con su emplazamiento. La Tabla 14 describe la clasificación de métodos de recarga.

Tabla 14 Clasificación métodos recarga según CNR

Clasificación	Método
Fuera del cauce	Piscinas de infiltración
	Tratamiento suelo-acuífero
	Galerías de infiltración
	Zanjas de infiltración
	Canales de infiltración
Dentro del cauce	Estanques de percolación
	Represas subterráneas
	Descargas de aguas de represas
Pozos secos	Pozos norias

Fuente: Elaboración Propia.

Aunque se describen y clasifican de diversas formas y con diferentes nombres, todos los métodos son aplicables y validos sujeto a los objetivos planteados por cada proyecto. A partir de la bibliografía señalada por CSIRO se elabora imagen (Figura 22) que permite visualizar estos métodos y sus principales características en términos de diseño, costos promedios y su aplicación normal de acuerdo con el alcance deseado.

Figura 22 Métodos de Recarga Artificial de Acuíferos Aplicados en Chile



Fuente: Elaboración Copilot IA, datos SCIRO, 2020.

Como se describe con anterioridad, diversos autores comentan que la implementación de este tipo de experiencias ha obedecido, entre otros, a criterios de sostenibilidad de los acuíferos donde su objetivo principalmente busco aumentar la disponibilidad del recurso hídrico, es así como en zonas donde los recursos hídricos son escasos, estas técnicas buscan ser una opción frente a esa necesidad. La elección de cada tipo o método de recarga a implementar corresponderá principalmente a factores como, características climáticas o disponibilidad de recursos, el tipo de demanda, el objetivo de la recarga, la experiencia acumulada en recarga y las características geológicas y geomorfológicas (Amphos21, 2014).

En experiencias internacionales materializadas mediante estudios y proyectos aplicados los cuales han perseguido, entre otros objetivos el estudiar los factores que inciden en la determinación de recargas en sistemas de cuencas, se desprende que, para establecer una adecuada selección de los métodos para efectuar una recarga artificial de acuíferos en una zona o cuenca de estudio, se debe establecer los parámetros y criterios críticos que permitan delinear la viabilidad de esta (Amphos21, 2014). Estos criterios de forma general se han logrado establecer mediante parámetros y valores condicionantes, los cuales se resumen a continuación de acuerdo con criterio experto, consistencia con la zona de estudio, las características generales que cuenta el acuífero de Calama y aspectos ambientales (SCIRO, 2020), estos son:

- Compatibilidad hidrogeológica (tipo de acuífero, espesor, conectividad con río Loa, transmisividad, otros de relevancia local).
- Calidad del agua y riesgos geoquímicos (arsénico, sulfatos, TDS, riesgo de colmatación).
- Disponibilidad y calidad de fuentes de agua (río Loa, aguas tratadas, excedentes agrícolas, desalación).
- Factibilidad técnica y operativa (costos relativos, plazos, mantenimiento, necesidad de tratamiento).
- Impacto y gestión institucional (normativa DGA, permisos, derechos de agua).

Teniendo en cuenta estos criterios para la selección de potenciales métodos aplicables a la zona, se seleccionan métodos de acuerdo con su funcionalidad, aplicabilidad y características propias de la zona, la idea es contar con opciones convencionales y no convencionales para su evaluación, en siguiente cuadro que permite identificar las principales características de cada método en relación con las condiciones del acuífero de Calama, parámetros de caudales de diseños típicos por cada método, parámetros físicos (profundidad, área) y riesgos asociados al acuífero Calama (Tabla 15).

Tabla 15 Cuadro Métodos Aplicables SHAC Calama

Método (Ficha RAG)	Caudal de diseño (L/s)	Profundidad típica (m)	Área requerida (ha)	Costo relativo	Riesgos principales	Condiciones generales de aplicación en Calama
Piscinas de infiltración	20–50 (piloto); hasta 200 en escala	1–3 (profundidad de balsa)	2–5 ha por piscina	Moderado	Colmatación, movilización de As y So4	ACS somero (~50 m), alta conexión con río Loa; viable en tramo urbano
Zanjas de infiltración	10–30 (estacional)	1–2	0,5–2 ha por zanja	Bajo–medio	Colmatación, eficacia limitada	Abanicos aluviales Conchi/Chiu-Chiu; útil en crecidas y lluvias
Galerías de infiltración	5–20	5–15 (profundidad túnel)	Variable según diseño	Medio–alto	Alto costo, riesgo constructivo	Geología heterogénea reduce viabilidad; no prioritaria
Pozos de inyección (ASR)	5–20 por pozo	100–150 (ACI profundo)	No aplica	Alto	Colmatación, presión, calidad agua	Requiere agua tratada (desalada o residual depurada); ensayos de admisibilidad
Pozos en zona no saturada (Vadose Wells)	5–15	20–50	No aplica	Moderado	Colmatación, variabilidad conductividad	ACS somero; viable en periferia urbana con suficiente espesor no saturado

Atrapamiento ribereño (Riverbank Filtration)	10–40	5–10 (profundidad captación)	1–3 ha ribereñas	Moderado	Variabilidad caudal, colmatación	Tramos del Loa con sedimentos permeables; mejora calidad natural
Recarga en terrenos agrícolas (Field Spreading)	5–15	0,5–1 (profundidad lámina)	2–10 ha agrícolas	Bajo	Contaminación difusa (fertilizantes)	Vegas agrícolas periféricas; requiere control estricto de calidad
Drenajes subsuperficiales (Subsurface Drains)	5–10	1–3 (profundidad drenes)	1–5 ha	Moderado	Complejidad instalación, mantenimiento	Limitada en Calama por suelos heterogéneos; no prioritaria

Fuente: Elaboración Propia.

En términos de evaluación, se puede verificar que los métodos calificados en la columna de condiciones generales de aplicación en Calama como someros, crecidas de lluvias, limitados y heterogéneos, ven su aplicabilidad reducida dada las características propias de la zona estudio descritas en el Capítulo 4.2 Sujeto Estudio, lo anterior sustentado en que el acuífero de Calama es en general, profundo con zonas de nivel piezométrico por sobre 30 metros bajo la superficie, es de escasa pluviosidad, su condición geológica lo denota con formaciones heterogéneas. Igualmente, esto será evaluado y analizado en detalle en el Capítulo 6 de aplicación metodológica.

Complementariamente a esta evaluación, se analizaron los objetivos y compromisos detallados en Capítulo 4.4 del presente estudio, donde el titular Codelco en el marco de su evaluación ambiental de su RCA 114/2026 (SGA, 2025), describe los objetivos específicos buscados con estas medidas de mitigación de "*Implementación de Barreras hidráulicas con foco en la protección del río San Salvador y el acuífero Calama-Yalquincha".* Lo anterior, debiendo implementar barreras hidráulicas negativas (bombeo desde el acuífero) y barreras hidráulicas positivas (inyección al acuífero) para contener y mitigar los efectos del proyecto de descenso de niveles por efectos de desaguado y excavación de la mina DMH, contribuyendo a la contención y mejoramiento de los niveles de calidad el acuífero afectado por efectos de operaciones históricas en el sector. Teniendo en cuenta los compromisos adquiridos, el efecto deseado, los antecedentes presentados por Codelco en su evaluación ambiental (de caracterización la geología, geomorfología, hidrogeología del acuífero con sus distintas unidades) y descritos en detalle en capítulo 4.2 del presente estudio, permiten identificar preliminarmente cuales de los métodos propuestos no son factibles de utilizar. La Comisión Nacional de Riego (CNR) en su Guía Metodológica "*Marco Operativo para Proyectos de Recarga Artificial de Acuíferos*" (CSIRO, 2020) con foco en la materialización de proyectos de Recarga (RAG) para el sector agrícola, propone 4 criterios específicos que son objetivos para seleccionar y evaluar cada método y su conveniencia, estos son:

- Costo de inversión
- Baja permeabilidad de suelo
- Requerimiento de calidad de agua
- Superficie requerida

Estos son evaluados en una matriz de multicriterio considerando cada método como se visualiza en la Tabla 16 de criterios para la selección.

Tabla 16 Criterios para selección Métodos RAA

Método de recarga	Costo de inversión	Baja permeabilidad de suelo	Requerimiento de calidad de agua	Superficie requerida
Fuera del cauce				
Piscinas de infiltración	*	X	**	***
Galerías de infiltración	***	✓	***	**
Tratamiento suelo-acuífero (SAT)	**	X	*	***
Canales de infiltración (existentes)	*	X	*	*
Zanjas de infiltración	*	X	*	**
Dentro del cauce				
Estanques de percolación	**	X	**	**
Represas subterráneas	***	X	*	**
Descarga de agua de represa	*	X	*	*
Pozos secos				
Pozos secos (de la zona vadosa)	***	✓✓	***	*

* Bajo; ** mediano; *** alto; X no adecuado para penetrar capas de baja permeabilidad; ✓ adecuado para penetrar capas poco profundas de baja permeabilidad; ✓✓ adecuado para penetrar capas profundas de baja permeabilidad.

Fuente: CSIRO, 2020.

En base a esta matriz, considerando los criterios propios de los compromisos ambientales asumidos por Codelco en su RCA, los cuales dicen relación con el cumplimiento a todo evento de estas medidas de mitigación para el proyecto, se desprende que la variable costo en esta etapa de evaluación no resulta relevante por el momento, por lo que no será considerada. Adicionalmente, dada la condición singular

del acuífero de Calama, se propone adicionar criterios técnicos a esta evaluación y posterior selección de métodos, estos parámetros se describirán a continuación en el siguiente capitulo y tienen por foco de ajustar en término de selección a las condiciones propias del acuífero de Calama. Esto será desarrollado en Capítulo 6 del presente informe.

6.1.1.1 Criterios técnicos y parámetros clave

Los criterios y parámetros han sido resumidos y preestablecidos a partir de múltiples estudios y autores recogidos en la bibliografía que han identificado estos como agentes ambientales claves para el establecimiento de métodos de recargas artificiales para sectores de estudio. Cabe resaltar que estos parámetros pueden ser de tipo técnicos hidráulicos, factores ambientales y/o de restricciones legales/económicas. A continuación, se resumen de forma priorizada de acuerdo con el alcance del presente estudio.

- **Hidrogeología**: Priorizar acuíferos con **alta transmisividad** y **conductividad hidráulica (K)** suficiente para permitir la propagación y almacenamiento del agua recargada. Medir parámetro (K) mediante pruebas de bombeo o slug tests y estimar la **transmisividad (T)** y la **porosidad efectiva** para calcular el volumen útil de recarga.

- **Profundidad al nivel freático y conectividad**: Seleccionar sitios con profundidad al nivel freático compatible con la técnica de recarga (superficial si el nivel es somero; inyección si es profundo) y con **conectividad hidráulica** favorable entre el punto de recarga y el objetivo de almacenamiento.

- **Capacidad de almacenamiento**: Evaluar el **espesor útil del acuífero** y la porosidad efectiva; acuíferos con espesor mayor y porosidad efectiva adecuada ofrecen mayor volumen de almacenamiento utilizable.

- **Permeabilidad del suelo superficial e infiltración**: Para recarga por superficie, requerir tasas de infiltración sostenidas (ensayos double-ring; permeámetros). Suelos con **tasa de infiltración alta** facilitan balsas, zanjas y áreas de infiltración.

- **Calidad del agua fuente**: Analizar parámetros fisicoquímicos y microbiológicos; definir requisitos de tratamiento previo para evitar degradación del acuífero. La presencia de contaminantes puntuales o difusos es criterio de exclusión o de mitigación obligatoria.

- **Riesgo de contaminación y protección**: Evitar zonas con fuentes contaminantes sin posibilidad de control; considerar barreras naturales y planes de contingencia.

- **Uso del suelo y disponibilidad de terreno**: Preferir áreas con baja impermeabilización y disponibilidad para obras; la cercanía a fuentes de agua (ríos, embalses, efluentes tratados) reduce costos logísticos.

- **Marco legal e institucional**: Verificar derechos de agua, permisos ambientales y responsabilidades de gestión; la existencia de un marco regulatorio claro es condición para avanzar.

- **Viabilidad socioeconómica**: Realizar análisis costo-beneficio; evaluar aceptación comunitaria y mecanismos de financiamiento.

- **Monitoreo y gestión**: Diseñar red de monitoreo (niveles piezométricos, calidad), establecer umbrales de alarma y protocolos de respuesta.

Tomando como referencias estos criterios expuestos con anterioridad, la base de datos bibliográfica producida principalmente por Codelco (SGA, 2025) y la autoridad DGA se procedió a elaborar la Tabla 11 seleccionando criterios de relevancia que permiten identificar claramente cuales son los principales criterios orientadores para utilizar, los posibles umbrales a utilizar y su importancia relativa de acuerdo con estos estándares. Cabe precisar que para este resumen se adoptó un enfoque multicriterio fundamentado en la literatura técnica y en guías institucionales elaboradas y de acuerdo con criterios experto. Se integraron criterios hidrogeológicos (transmisividad, conductividad hidráulica, espesor y porosidad efectiva), parámetros de infiltración superficial, calidad del agua fuente, riesgo de contaminación, uso del suelo, marco legal e institucional, viabilidad socioeconómica y requisitos de monitoreo. Los umbrales operativos y las ponderaciones aplicadas se sustentan en estudios y guías de referencia: Bouwer (2002) para criterios hidrogeológicos y manejo de colmatación; Dillon (2005) para la conceptualización y gobernanza de la recarga gestionada; las Australian Guidelines for Water Recycling: Managed Aquifer Recharge (Natural Resource Management Ministerial Council et al., 2009) para criterios de calidad y etapas de proyecto; el compendio de casos de UNESCO (Zheng, Ross, Villholth, & Dillon, 2021) para lecciones prácticas; y las directrices e investigaciones de la U.S. Environmental Protection Agency (2023) para riesgos de calidad y monitoreo. Asimismo, se consideraron estándares técnicos (ASCE/EWRI, 2020), recursos de inventario (IGRAC) y experiencias y normativa nacional (Comisión Nacional de Riego & CSIRO, 2020; Dirección General de Aguas, 2025; Aguas Andinas, 2025; Ministerio para la Transición Ecológica, 2023). Estas fuentes respaldan los criterios de la matriz multicriterio empleada en este informe y justifican los umbrales orientadores adoptados. Adicionalmente, en términos de contar con valores específicos a la zona de estudio se han tomado en cuenta los valores expuestos por Codelco a través de su evaluación ambiental (SGA, 2025), donde la fuente principal de consultas fueron sus informes de actualizaciones de líneas base de hidrogeología y modelo conceptual. El resumen de los principales indicadores se indica en la Tabla 17.

Tabla 17 Principales indicadores para selección de posibles zonas.

Criterio	Indicador clave	Umbral orientativo	Importancia
Hidrogeológico	Transmisividad; conductividad hidráulica	Transmisividad alta; K > 10^{-5} m/s	Muy alta
Capacidad de almacenamiento	Porosidad efectiva; espesor del acuífero	Porosidad efectiva > 5%; espesor > 5 m	Alta
Profundidad al nivel freático	Profundidad desde superficie	Preferible < 30 m para infiltración por superficie	Alta
Permeabilidad del suelo superficial	Tasa de infiltración	> 10 mm/h para infiltración rápida	Alta
Calidad del agua fuente	Concentraciones de sólidos, nutrientes, patógenos	Cumplir normativa local; tratamiento previo si necesario	Muy alta
Conectividad hidráulica	Gradiente y dirección de flujo	Conectividad positiva hacia el acuífero objetivo	Alta
Riesgo de contaminación	Presencia de fuentes puntuales/difusas (sulfatos)	Evitar zonas con riesgo alto de contaminantes	Muy alta
Uso del suelo y disponibilidad	Cobertura, impermeabilización	Menor impermeabilización facilita infiltración	Media
Aspectos legales e institucionales	Derechos de agua; permisos	Existencia de marco regulatorio y permisos	Muy alta
Viabilidad socioeconómica	Costos; aceptación comunitaria	Costos compatibles con beneficios; aceptación > 60%	Media
Monitoreo y gestión	Red de pozos; parámetros a medir	Plan de monitoreo continuo y contingencias	Muy alta

Fuente: Elaboración Propia.

Cabe resaltar que el objetivo del presente estudio no es definir nuevos criterios ni parámetros para la selección de zonas para efectuar la recarga artificial, sino más bien estudiar y seleccionar en base a criterios técnicos y estandarizados los métodos ajustados y factibles de utilizar en relación con el objetivo establecido. Se reconoce además que la aproximación buscada en el presente estudio es en búsqueda de criterios

cualitativos y en base a información secundaria ya elaborada por terceros, lo cual podría robustecerse por modelaciones hidrogeológicas numéricas que pudiesen sustentar de forma cuantitativa los resultados a obtener.

6.1.2 Análisis de parámetros de calidad de aguas e hidráulicos

A partir de la información disponible en el sector la cual es generada mayormente por datos de reportabilidad ambiental de tipo publica que mantienen titulares mineros entre otros en el sector se realiza un análisis de los principales datos hidrogeológicos del sector con la finalidad de poder identificar sus principales características en relación con el objetivo del presente estudio. Las plataformas digitales de acceso a la información fueron principalmente rescatadas desde la autoridad Superintendencia de Medio Ambiente (SMA) y Dirección General de Aguas (DGA).

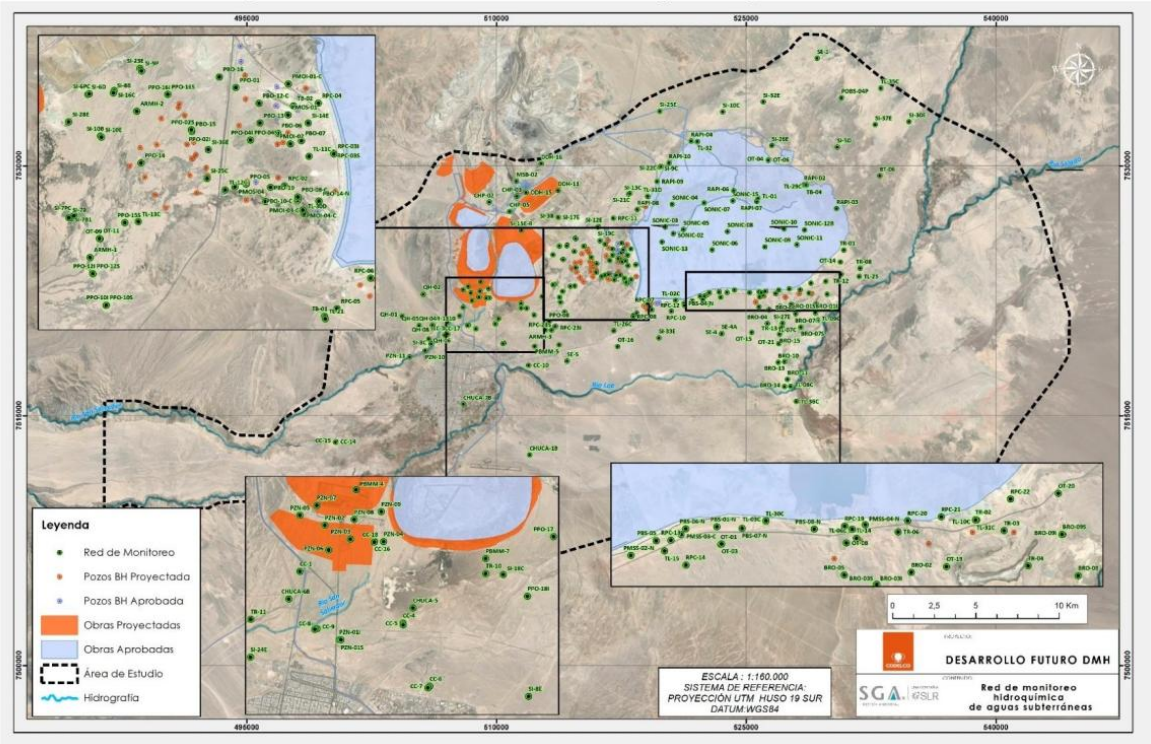
6.1.2.1 Datos existentes de parámetros de calidad de aguas

De acuerdo con los principales indicadores establecidos en secciones anteriores, los parámetros hidroquímicos de importancia se definieron en dos grandes grupos:

- Concentraciones de Sólidos Suspendidos Totales (SST), nutrientes, patógenos
- Concentraciones de sulfatos, conductividad, ph

A continuación, se caracterizarán las principales tendencias asociados a los parámetros de importancia, los cuales corresponden a datos reales medidos en terreno principalmente obtenidas por el titular de proyectos mineros Codelco, el cual como se menciona con anterioridad, opera proyectos de desarrollo minero en la zona de estudio y mantiene una red de seguimiento ambiental en el sector de acuerdo con los requerimientos emanados desde sus resoluciones de calificación ambiental aprobadas. En la Figura 23 se presenta red de monitoreo hidroquímica actual en imagen tomada desde su estudio de impacto ambiental denominado como “EIA Desarrollo Futuro Ministro Hales” el cual se encuentra aprobado mediante resolución de calificación ambiental (RCA) N° 20260200114.

Figura 23 Red de monitoreo hidroquímica subterránea Codelco.

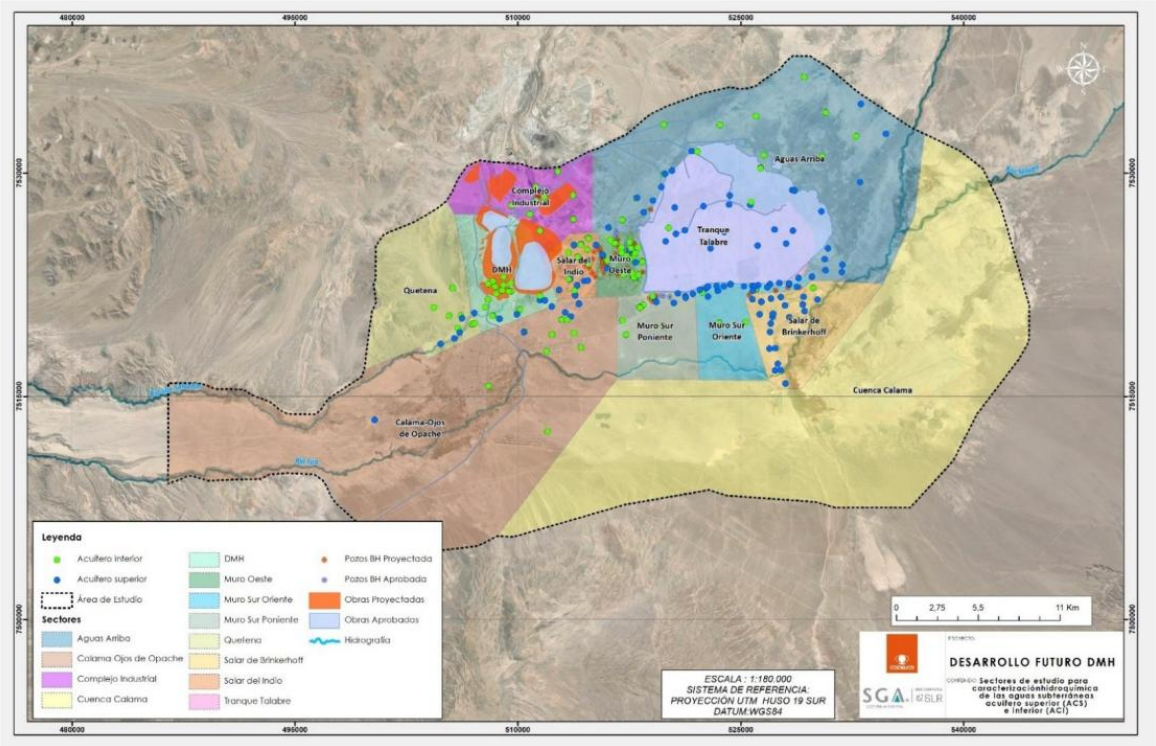


Fuente: SGA, 2025

En el marco de este proceso de evaluación ambiental también se incluyó una clasificación de zonas hidroquímicas de acuerdo con cada zona acuífera, lo cual sirve de criterio orientador de zonas características la cual se expone a continuación (Figura 24).

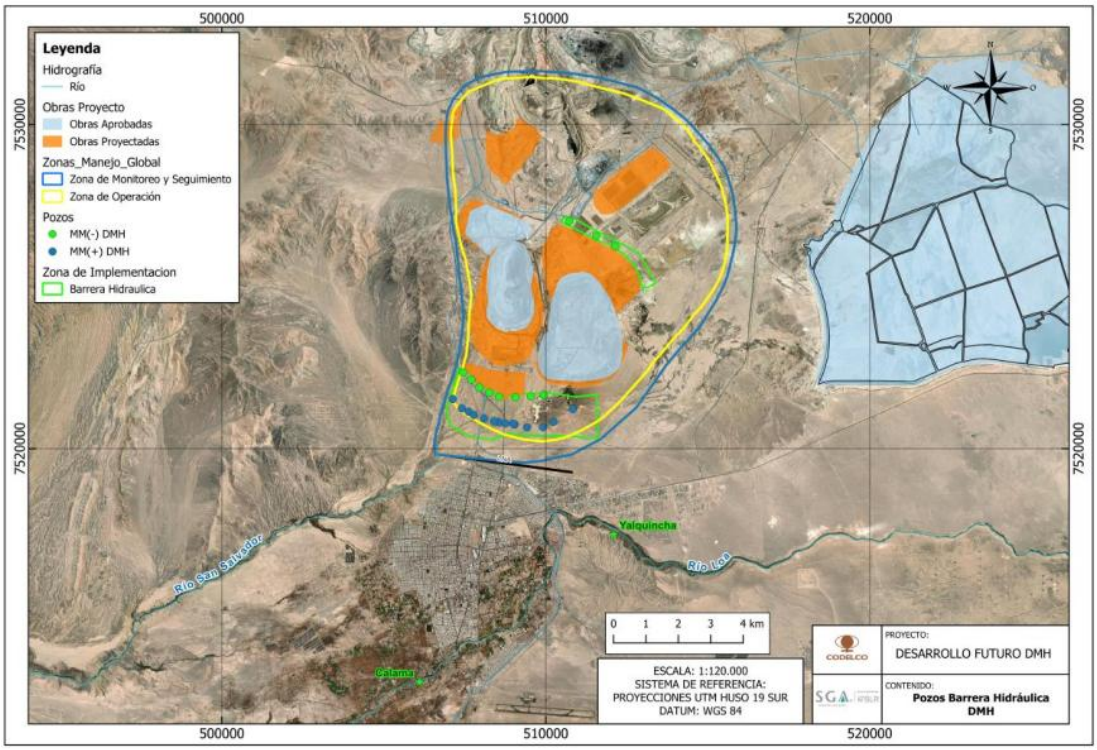
Esta red descrita en Figura 24, monitorea datos desde el año 2003 hasta mediados del año 2023 siendo representativa en términos de seguimiento ambiental, los datos y parámetros medidos se componen principalmente de elementos mayoritarios como el Ca, Na, Mg, K, Cl, SO4, todos expresados en unidades de mg/l. Cabe resaltar que el parámetro SO4 es de importancia para seguimiento ambiental y como un trazador de infiltraciones de procesos mineros por las autoridades en este y otras evaluaciones. Además, se cuentan con parámetros adicionales de importancia con relación a los objetivos de efectuar una recarga artificial como lo son la Conductividad Eléctrica (CE) y PH en términos de calidad de aguas. Parte de los resultados de este estudio ambiental llevado adelante por el titular de proyecto Codelco, como línea base son presentados en términos de percentiles y promedios a continuación, separados por cada parámetro representativo. Cabe destacar que acuerdo a los objetivos propuestos del presente estudio y que, durante el proceso ambiental, se analizaron y predefinieron zonas en específico habilitadas para efectuar una recarga artificial de acuíferos, estas zonas se acotan a los sectores circundantes sur y norte de la mina Ministro hales denotados en polígonos de color verde y que se exponen a continuación en Figura 25.

Figura 24 Red de monitoreo hidroquímica subterránea Codelco.



Fuente: SGA, 2025.

Figura 25 Zona predefinida para ubicación de pozos de inyección.



Fuente: SGA, 2025.

Estas zonas circundantes quedaron enmarcadas dentro de sectores más amplios, denominados por el titular del proyecto como DMH y Hoya Quetena y Ojos de Opache, como se visualiza en las figuras anteriores, estos sectores cuentan con una amplia red de pozos de monitoreo de ambos acuíferos (superior e inferior) que les permite recabar datos para Re-portabilidad ambiental de tipo públicos. En la Tabla 18 y Tabla 19, se indican las concentraciones representativas de acuífero superior e inferior para estos sectores por ambos acuíferos y muestra los promedios y percentil 95 de un conjunto de pozos de aguas subterráneas habilitados en dichos sectores.

Tabla 18 Concentraciones acuífero superior de sectores hidrogeológicos de Calama.

Parámetros	Hoya Quetena			Calama-Ojos de Opache			DMH		
	P5	Prom.	P95	P5	Prom	P95	P5	Prom	P95
Aluminio mg/l	0,0	0,5	1,7	0,1	0,5	1,2	0,1	0,4	0,9
Arsénico mg/l	0,2	0,4	0,6	0,0	0,4	0,8	0,0	0,3	1,0
Calcio mg/l	63,0	182,0	281,0	46,0	244,0	638,0	269,0	667,0	1.863,0
Cadmio mg/l	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1
Conductividad Eléctrica mS/cm	4.660,0	6.561,0	9.089,0	4.110,0	7.740,0	15.760,0	11.933,0	31.256,0	107.290,0
Cloruro mg/l	929,0	1.546,0	2.160,0	841,0	2.001,0	4.644,0	1.640,0	6.521,0	36.954,0
Cobre mg/l	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,1	0,2
Hierro mg/l	0,0	1,3	2,7	0,1	2,2	4,9	0,0	2,5	10,0
Bicarbonato mg/l	60,0	135,0	203,0	184,0	296,0	571,0	104,0	297,0	557,0
Potasio mg/l	39,0	75,0	128,0	37,0	65,0	87,0	104,0	236,0	458,0
Litio mg/l	0,8	1,8	3,6	1,0	2,4	5,0	1,0	2,5	5,0
Molibdeno mg/l	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	1,0	2,6
Sodio mg/l	707,0	1.022,0	1.385,0	679,0	1.259,0	2.664,0	1.405,0	6.335,0	21.040,0
Plomo mg/l	0,0	0,1	0,2	0,0	0,2	0,2	0,0	0,2	0,2
Fosfato mg/l	0,2	1,3	3,8	0,2	1,1	3,2	0,2	1,9	3,4
Silicio mg/l	13,0	28,0	58,0	6,0	21,0	51,0	3,0	20,0	55,0
Sulfato mg/l	331,0	709,0	1.122,0	399,0	889,0	1.999,0	1.412,0	7.534,0	13.989,0
SST mg/l	5,0	33,0	83,0	5,0	24,0	71,0	5,0	35,0	89,0
Sólidos Totales mg/l	2.983,0	4.535,0	6.484,0	2.520,0	5.295,0	11.246,0	8.741,0	30.034,0	103.851,0
Turbiedad UNT	0,4	15,0	43,7	0,5	28,1	65,0	0,5	18,0	58,7
Zinc mg/l	0,0	0,1	0,2	0,0	0,1	0,2	0,0	0,1	0,2

Fuente: Elaboración propia, adaptado de SGA 2025.

Tabla 19 Concentraciones acuífero inferior de sectores hidrogeológicos de Calama.

Parámetros	Hoya Quetena			Calama-Ojos de Opache			DMH		
	P5	Prom.	P95	P5	Prom	P95	P5	Prom	P95
Aluminio mg/l	0,04	0,51	1,65	0,10	0,50	1,20	0,06	0,40	0,90
Arsénico mg/l	0,18	0,37	0,61	0,02	0,40	0,80	0,02	0,30	1,04
Calcio mg/l	63,00	182,00	281,00	46,00	244,00	638,00	269,00	667,00	1.863,00
Cadmio mg/l	0,00	0,02	0,10	0,00	0,02	0,10	0,00	0,02	0,10
Conductividad Eléctrica µS/cm	4.660,00	6.561,00	9.089,00	4.110,00	7.740,00	15.760,00	11.933,00	31.256,00	107.290,00
Cloruro mg/l	929,00	1.546,00	2.160,00	841,00	2.001,00	4.644,00	1.640,00	6.521,00	36.954,00
Cobre mg/l	0,01	0,09	0,14	0,00	0,10	0,20	0,01	0,10	0,20
Hierro mg/l	0,00	1,31	2,69	0,10	2,20	4,90	0,03	2,50	9,95
Bicarbonato mg/l	60,00	135,00	203,00	184,00	296,00	571,00	104,00	297,00	557,00
Potasio mg/l	39,00	75,00	128,00	37,00	65,00	87,00	104,00	236,00	458,00
Litio mg/l	0,84	1,83	3,57	1,00	2,40	5,00	0,95	2,50	5,02
Molibdeno mg/l	0,01	0,09	0,10	0,00	0,10	0,10	0,10	1,00	2,60
Sodio mg/l	707,00	1.022,00	1.385,00	679,00	1.259,00	2.664,00	1.405,00	6.335,00	21.040,00
Plomo mg/l	0,01	0,14	0,20	0,00	0,20	0,20	0,01	0,20	0,20
Fosfato mg/l	0,20	1,34	3,80	0,20	1,10	3,20	0,20	1,90	3,40
Silicio mg/l	13,00	28,00	58,00	6,00	21,00	51,00	3,00	20,00	55,00
Sulfato mg/l	331,00	709,00	1.122,00	399,00	889,00	1.999,00	1.412,00	7.534,00	13.989,00
SST mg/l	5,00	33,00	83,00	5,00	24,00	71,00	5,00	35,00	89,00
Sólidos Totales mg/l	2.983,00	4.535,00	6.484,00	2.520,00	5.295,00	11.246,00	8.741,00	30.034,00	103.851,00
Turbiedad UNT	0,40	14,98	43,67	0,50	28,10	65,00	0,50	18,00	58,67
Zinc mg/l	0,00	0,10	0,20	0,00	0,10	0,20	0,02	0,10	0,23

Fuente: Elaboración propia, adaptado de SGA 2025.

En términos generales, analizando los datos existentes de la red de monitoreo y expuestos durante el proceso de evaluación ambiental por el titular Codelco en su línea de base de calidad de aguas para los años 2020-2023 para todos los sectores, se ha realizado un análisis comparativo (Tabla 20) que logra evidenciar que la zona estudiada cuenta con un alto grado de concentraciones y tendencias hidroquímicas en los parámetros pH, Conductividad Eléctrica (CE) y sulfato (SO_4^{2-}), los cuales superan las normas chilenas de referencias NCh 409 del 2005 y NCh1333 del año 1978.

Tabla 20 Comparación de normativas vs concentraciones en sectores hidrogeológicos de Calama.

Parámetro	Valores observados (2020–2023)	Norma chilena agua potable (NCh 409/1:2005)	Norma chilena riego agrícola (NCh 1333/78)	Cumplimiento / Observación
pH	6.5–8.0	6.5–8.5	6.0–8.5	Cumple en todos los sectores
CE (µS/cm)	800–2,500	≤1,500	≤3,000 (según cultivo)	Supera norma potable en sectores ACI; cumple riego
Sulfato (mg/L)	250–1,000	≤500	≤1,000	Supera norma potable en sectores DMH y Salar del Indio; cumple riego
Cloruro (mg/L)	150–400	≤250	≤1,000	Supera norma potable en algunos pozos; cumple riego
Sodio (mg/L)	100–300	≤200	≤920	Supera norma potable en sectores salinos; cumple riego
Calcio (mg/L)	50–150	≤200	≤400	Cumple ambas normas
Magnesio (mg/L)	30–80	≤150	≤200	Cumple ambas normas

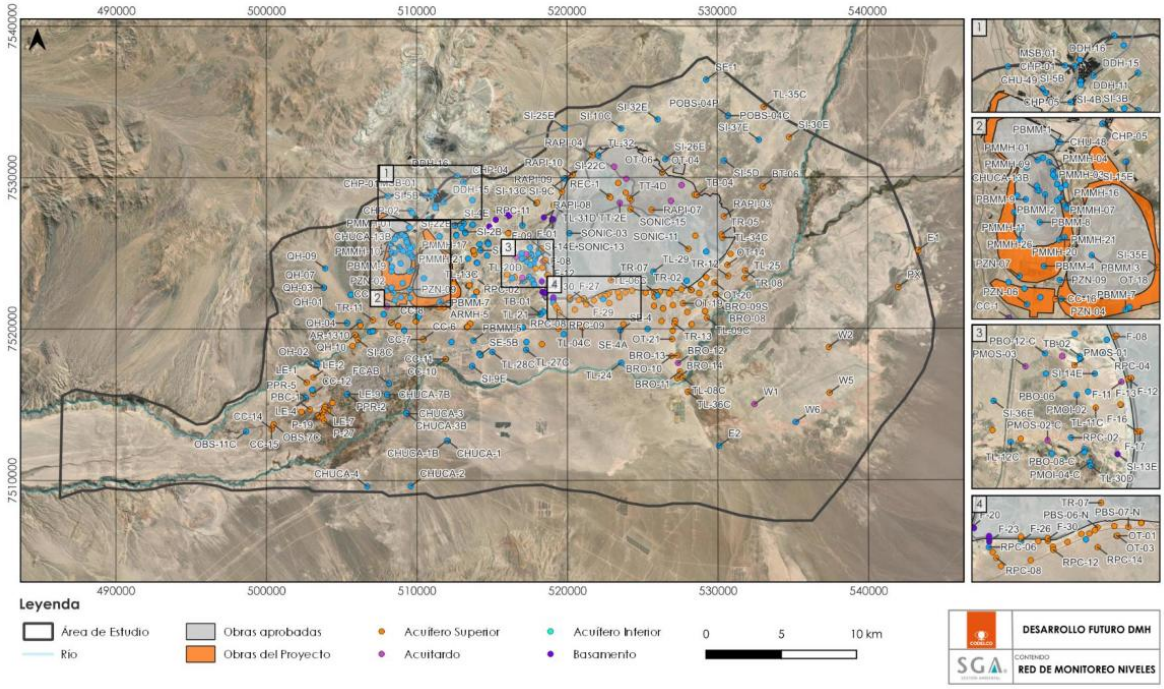
Fuente: Elaboración propia.

La comparación efectuada permite visualizar y confirmar que el sector o área de estudio seleccionada como una posible zona para efectuar una recarga artificial de acuíferos cuenta con un alto grado de concentraciones de tipo no naturales y atribuibles posiblemente infiltraciones históricas de procesos de tipo mineros provenientes de la operaciones minera Chuquicamata y el Tranque Talabre, los cuales fueron reconocidos por el titular durante el proceso ambiental, y por lo cual propuso medidas específicas de implementación, como lo son las barreras hidráulicas positivas y negativas.

6.1.2.2 Datos existentes de parámetros hidráulicos

La red de monitoreo existente en términos de niveles piezométricos cuenta con una gran cantidad de datos de mediciones efectuadas mayormente por el titular de proyecto Codelco, pero también existen otros actores dentro de la zona de estudio que interactúan con sus proyectos en la red hidrogeológica. Estos actores corresponden a otras mineras como compañía minera Lomas Bayas, el cual posee un campo extracciones no operativo localizado en el sur de la ciudad Calama y otros actores como usuarios tenedores de derechos de aguas como Inversiones Aqualama Ltda. Como se menciona en los apartados anteriores, el sector hidrogeológico de la cuenca de Calama se divide principalmente en dos sectores acuíferos en términos de importancia y rendimientos hídricos, el superior e inferior, ambos sectores se dividen espacialmente como se detalla en la sección de sujeto de estudio y mantiene una de pozos como se visualiza en la Figura 26.

Figura 26 Ubicación de pozos en el sector de Calama.



Fuente: SGA, 2025.

Esta amplia red de pozos mantiene registros de niveles de forma variable en el tiempo, contando con datos en algunos casos desde 2003 aproximadamente, hasta la actualidad, diferenciándose en entre red de monitoreos netamente de niveles en su mayoría y con controles de extracciones asociadas a barreras hidráulicas presentes en el sector, específicamente en el sector de Talabre. Los parámetros de seguimiento de esta red con objeto de atención del presente estudio son:

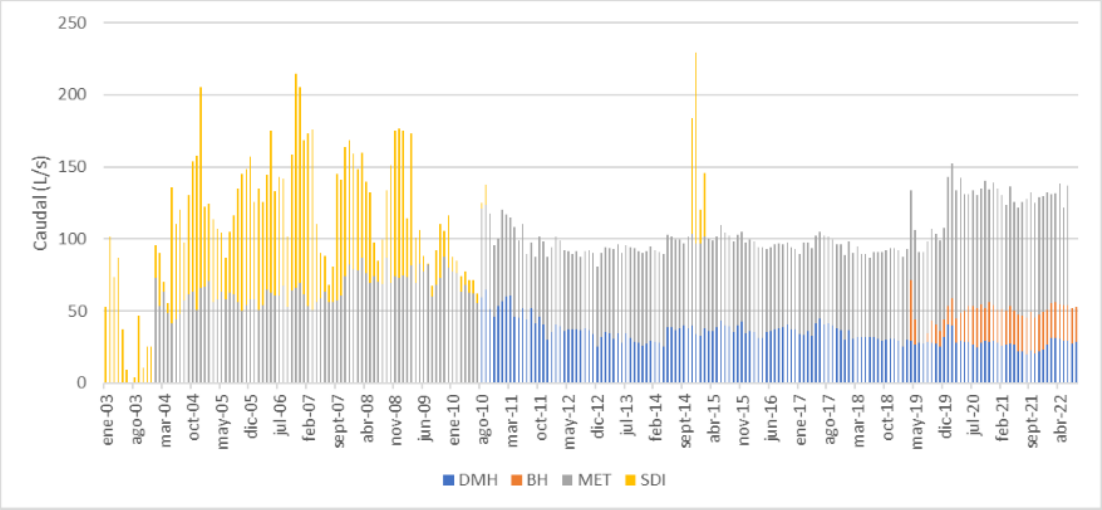
- Niveles estáticos
- Conductividad hidráulica (K)
- Coeficientes de almacenamiento (S)
- Parámetros fisicoquímicos

Otra variable relevante en la zona de estudio son las extracciones subterráneas medidas en Caudales(Q) las cuales corresponden mayormente a extracciones de tipo operativas para procesos mineros efectuadas principalmente por Codelco y Minera el Tesoro, estas extracciones cobran importancia ya que condicionan el sector hidrogeológico y sus niveles piezométricos. Estas extracciones son expuestas por Codelco en su proceso ambiental del proyecto "*EIA Desarrollo Futuro DMH"* hasta el año 2022 y se muestran en el Grafico 3.

Complementariamente, existen variables hidráulicas de importancia como la permeabilidad y coeficientes de almacenamiento que son recolectados no solamente a

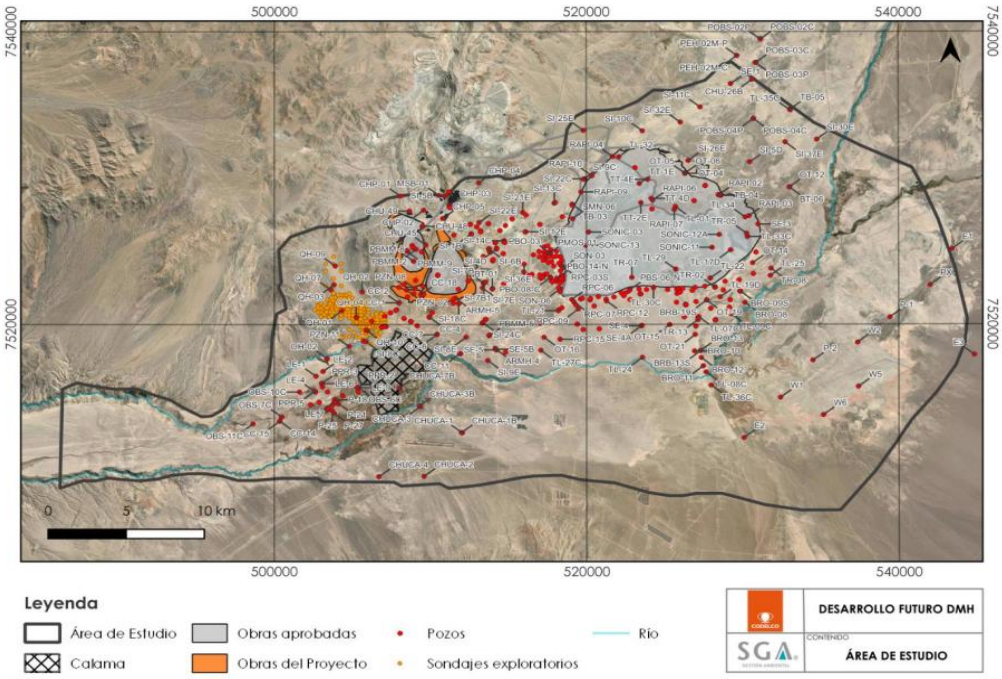
través de datos de seguimiento de niveles en la red de pozos, sino también a través de información obtenida en sondajes y pozos exploratorios como se visualiza en la Figura 27.

Gráfico 3 Extracciones de aguas subterráneas en la ciudad de Calama.



Fuente: SGA, 2025.

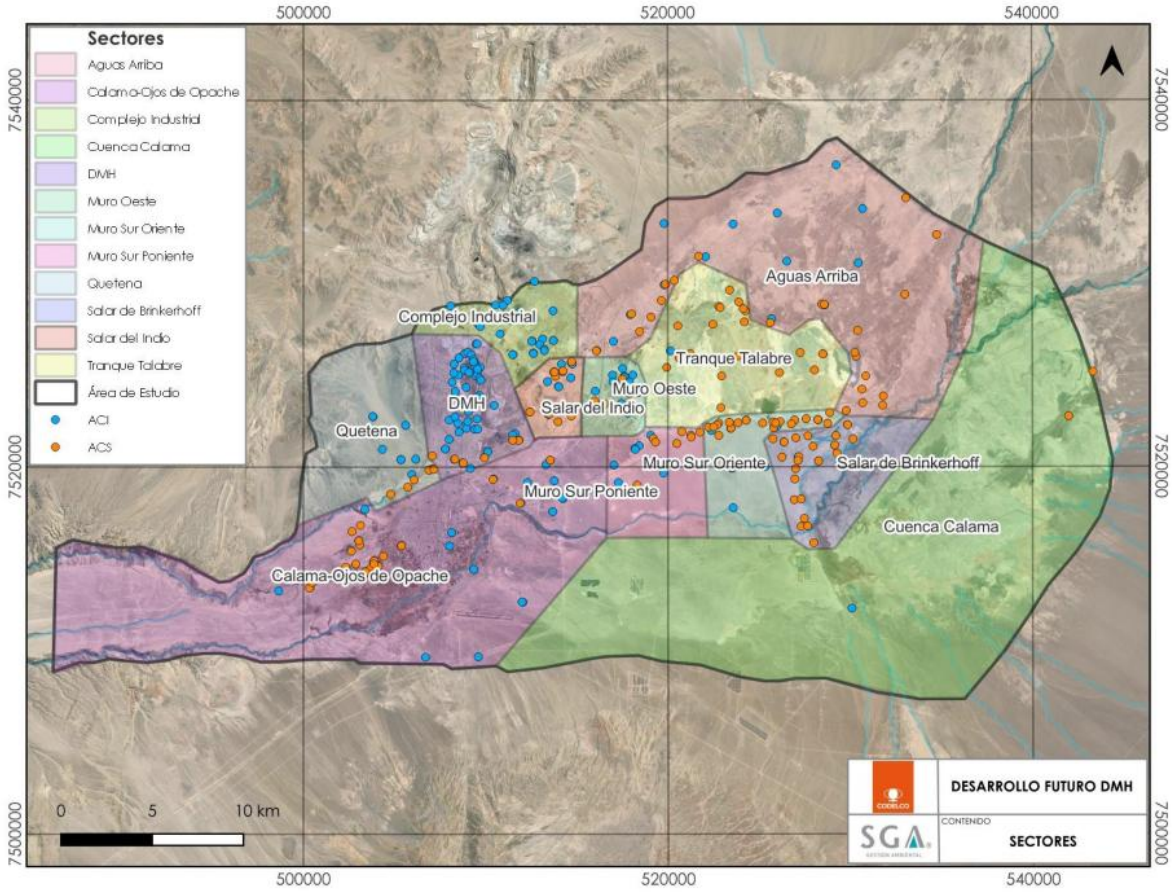
Figura 27 Ubicación de pozos y sondajes con información estratigráfica en Calama



Fuente: SGA, 2025

Cabe resaltar que durante este proceso ambiental Codelco entre otros actores, cuentan con información consolidada adicional de modelos hidrogeológicos conceptuales y numéricos, estudios de geofísica los que en su conjunto van adicionando conocimiento con respecto a la zona hidrogeológica de Calama. Tal como se denoto en las secciones precedentes de datos de calidad de aguas, el sector de interés para el presente estudio en el marco de efectuar una recarga artificial de acuíferos (RAA) son los sectores de DMH Hoya Quetena y Ojos de Opache, entre otros, esto se visualiza en la Figura 28 de sectores de pozos con información de niveles e hidroquímica con su correspondiente clasificación por sectores.

Figura 28 Sectores de pozos con información niveles en el sector de Calama.

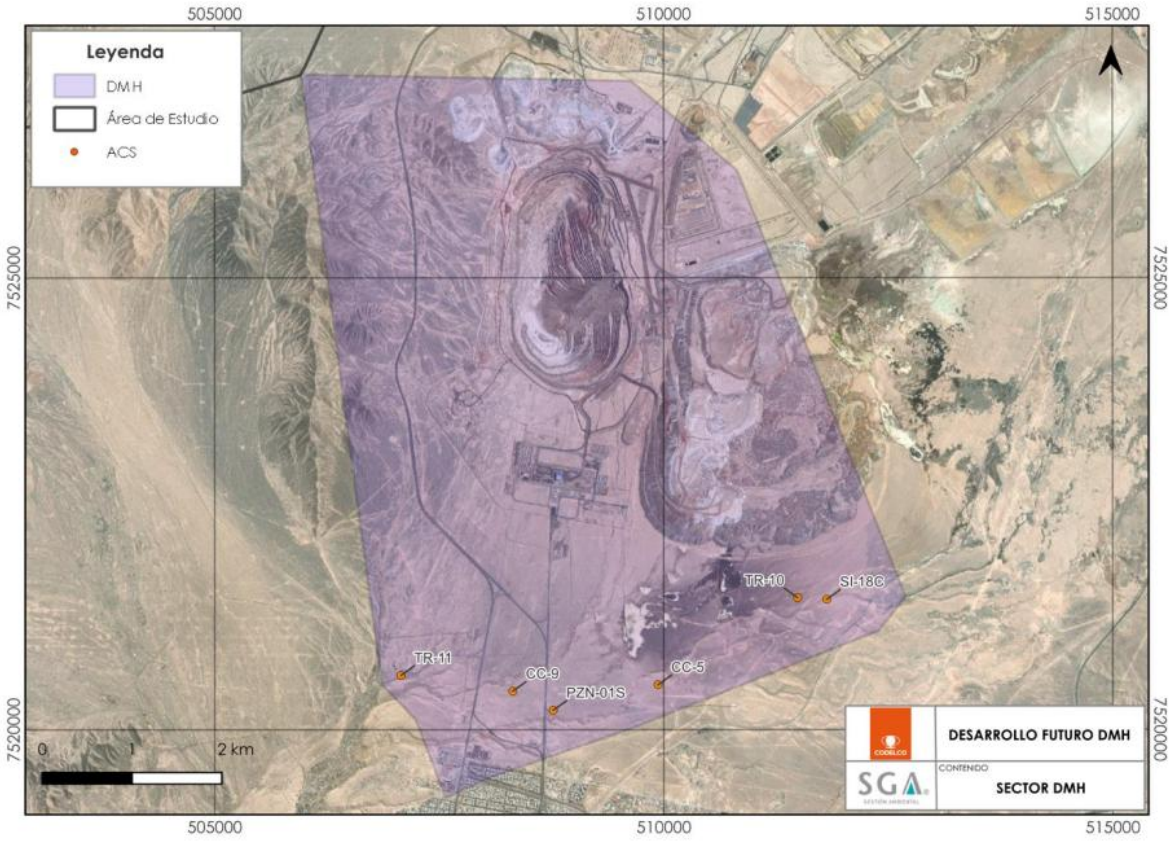


Fuente: SGA, 2025

La evolución de niveles en el sector especifico de DMH evidencia, según datos expuestos por el titular Codelco en su proceso ambiental, que existe una clara influencia de instalaciones como el rajo de la mina Ministro Hales en el sector, el cual al ser excavado de forma constante para movimiento de materiales, induce las aguas del acuífero de forma intrusiva en dirección del fondo del rajo, lo que provoca un efecto de cono de depresión SGA (2025), lo cual se deja en evidencia en el Gráfico 4 y Grafico 5 de niveles de aguas subterráneas para cada acuífero. De forma análoga, se visualiza

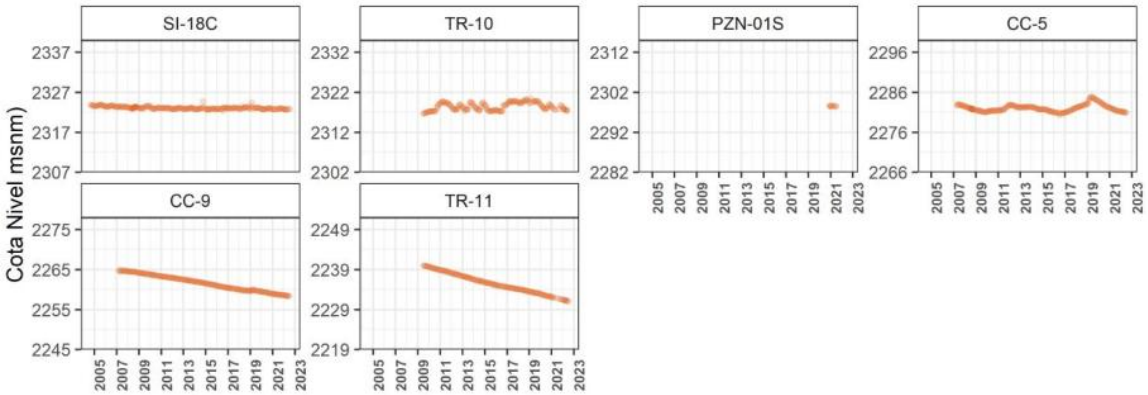
tanto para acuífero superior e inferior en Figura 29 y Figura 30 correspondientemente la ubicación de los pozos existentes del titular Codelco.

Figura 29 Sector DMH con pozos con información niveles en el sector de Calama, acuífero superior.



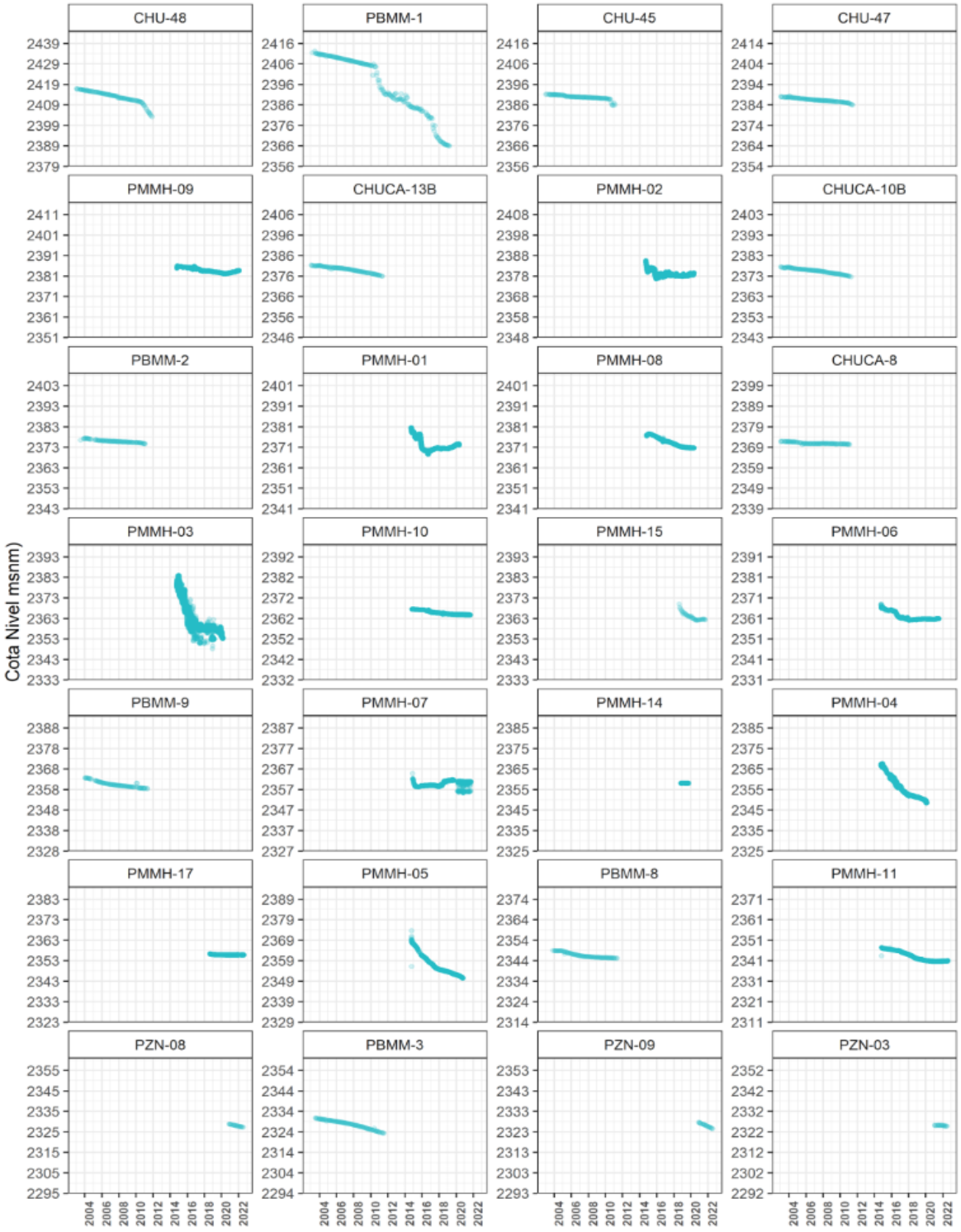
Fuente: SGA, 2025.

Gráfico 4 Niveles de aguas subterráneas en la ciudad de Calama, acuífero superior.



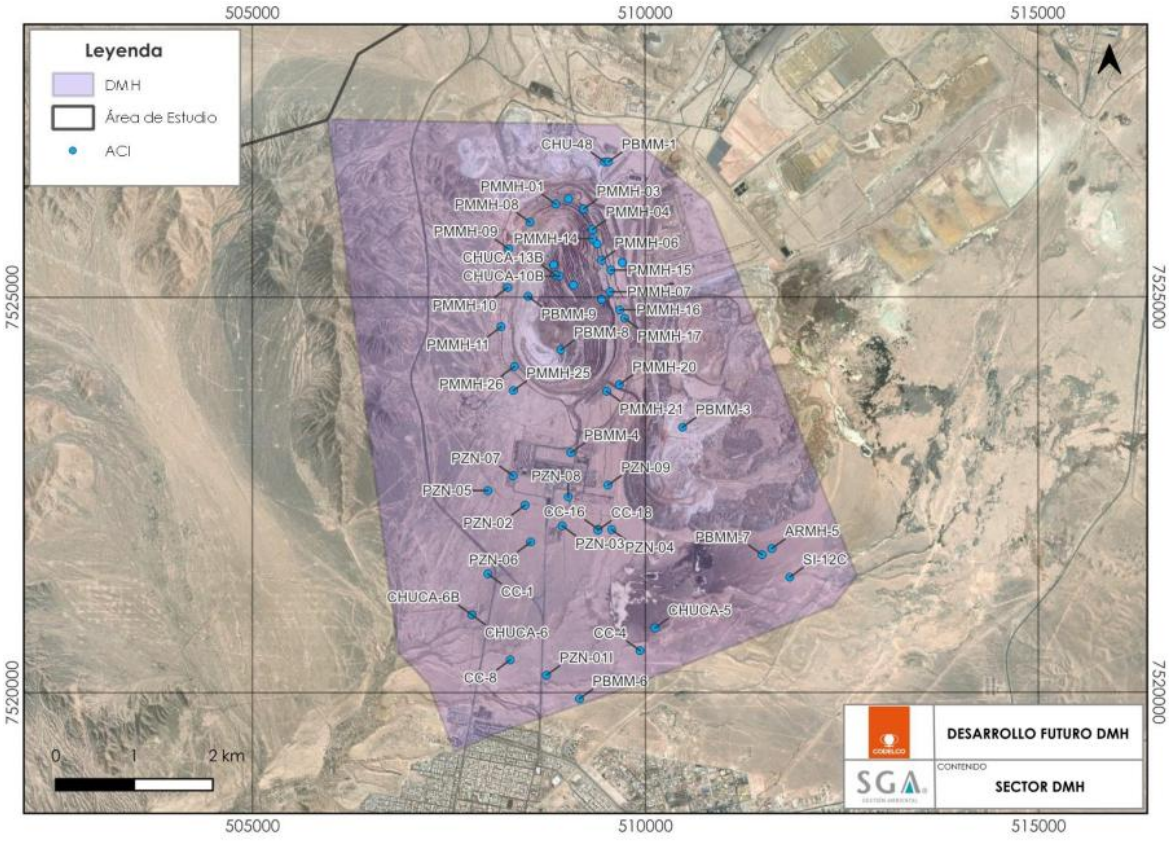
Fuente: SGA, 2025.

Gráfico 5 Niveles de aguas subterráneas en la ciudad de Calama, acuífero inferior.



Fuente: SGA, 2025.

Figura 30 Sector DMH con pozos con información niveles en el sector de Calama, acuífero inferior.



Fuente: SGA, 2025.

En relación con las otras variables de importancia hidrogeológica y su rol en la determinación de posibles métodos y zonas para efectuar una recarga artificial de acuífero en el sector, en la Tabla 21 se presentan de forma resumida a partir de los datos bibliográficos recopilados.

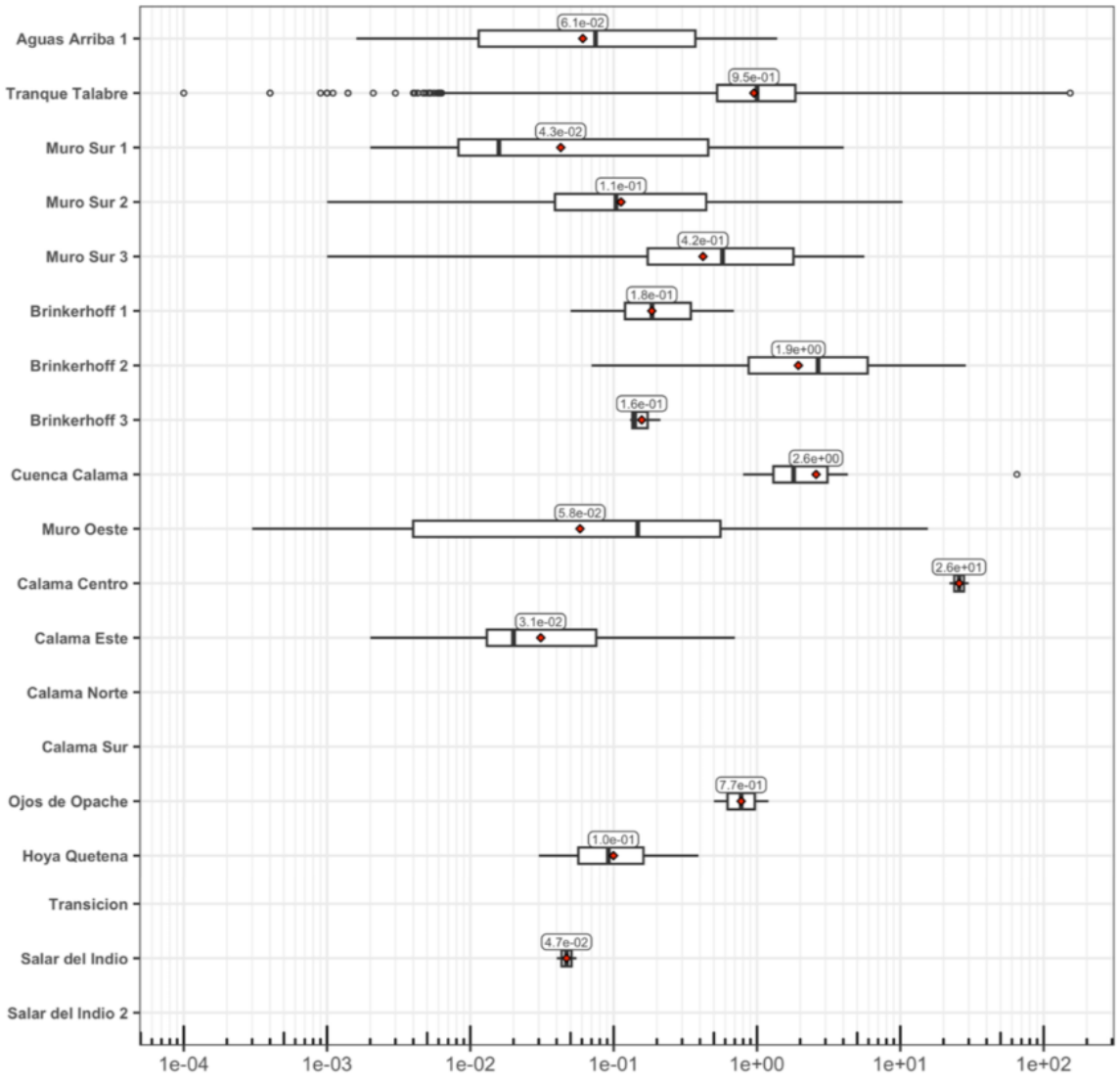
Tabla 21 Valores representativos de conductividad hidráulica por acuífero de sectores hidrogeológicos en sectores de Calama.

	Permeabilidad (m/d)					
Acuífero	**Mín.**	**P25**	**P50**	**MG**	**P75**	**Máx.**
Acuífero Superior	$1,0^{-04}$	$1,7^{-02}$	$1,0^{-01}$	$8,9^{-02}$	$4,3^{-01}$	$6,5^{01}$
Acuífero Inferior	$1,1^{-04}$	$6,0^{-02}$	$2,7^{-01}$	$2,0^{-01}$	$9,2^{-01}$	$6,6^{01}$

Fuente: Elaboración propia, adaptado de SGA 2025.

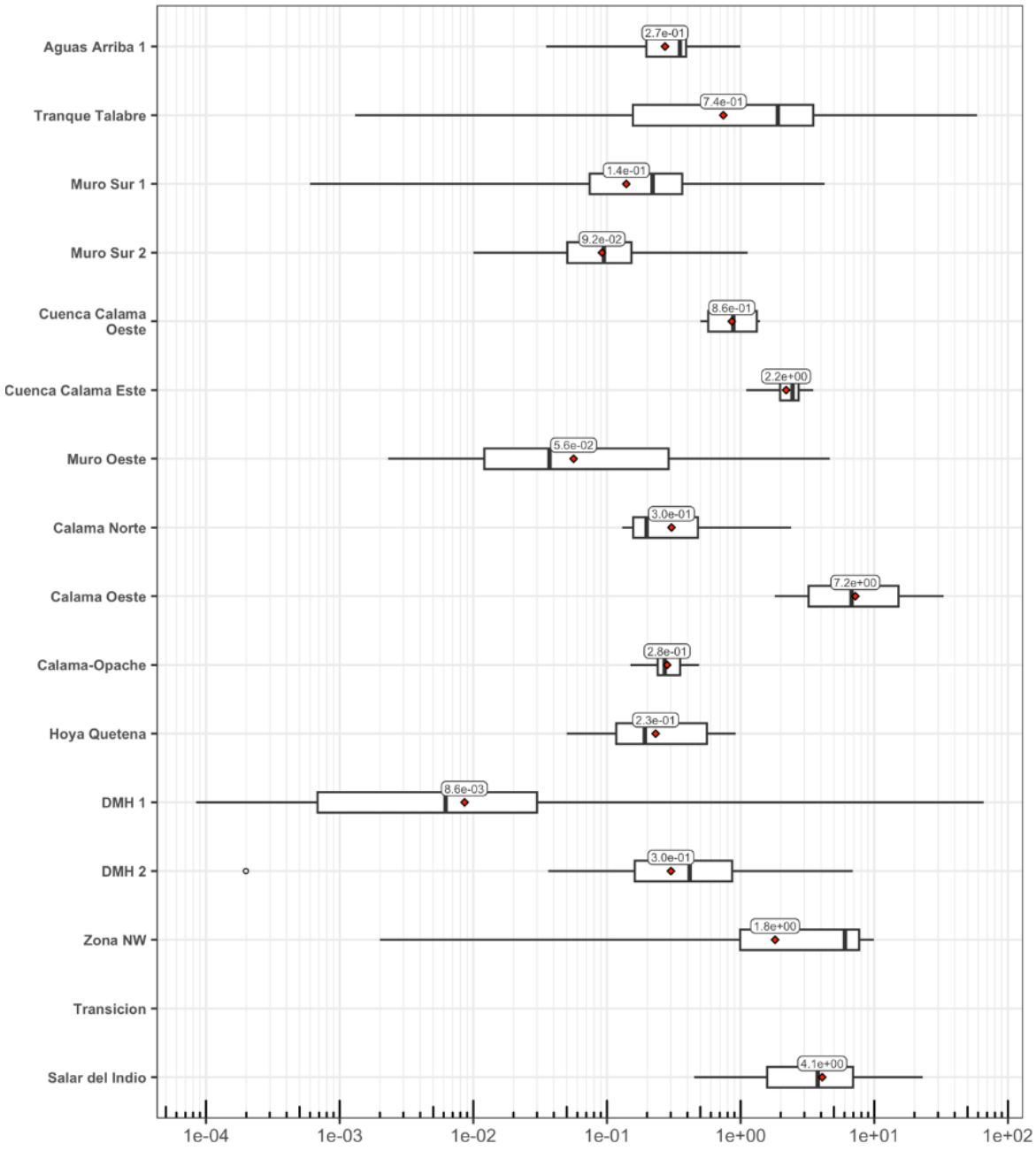
Cabe resaltar que en el estudio hidrogeológico del sector (SGA, 2025) se logró avanzar en correlacionar resultados de conductividades hidráulicas obtenidas mediante ensayos de Bombeo, Slug, Lefranc, Lugeon, en comparación con descripciones de litologías obtenidas de pozos en el sector acuífero, las cuales fueron diferenciadas por cada acuífero logrando obtener resultados generales de cada sector en el área de estudio, estos resultados son visualizados en Grafico 6 y Grafico 7 boxplots de conductividades para cada sector.

Gráfico 6 Conductividades (m/d) por sector en Calama, acuífero superior.



Fuente: SGA, 2025.

Gráfico 7 Conductividades (m/d) por sector en Calama, acuífero inferior.



Fuente: SGA, 2025.

Es importante resaltar que de acuerdo con los valores expuestos en la Tabla 22 de valores representativos de almacenamiento para ambos acuíferos (SGA, 2025), reflejan en general valores que son relativamente bajos para implementar proyectos de recargas, especialmente en el sector especifico de DMH, lo cual podría ser una limitante

en la obtención de resultados positivos en términos de rendimiento de caudales a inyectar en este sector.

Tabla 22 Valores representativos de almacenamiento por acuífero de sectores hidrogeológicos en sectores de Calama

Almacenamiento						
Acuífero	**Mín.**	**P25**	**P50**	**MG**	**P75**	**Máx.**
Superior	1,0, E-04	1,4, E-03	1,8, E-03	2,2, E-03	4,4, E-03	7,1, E-02
Inferior	3,1, E-05	3,8, E-04	8,3, E-04	1,1, E-03	3,7, E-03	4,6, E-02

Fuente: Elaboración propia, adaptado de SGA 2025.

6.1.3 Visualizar posibles brechas y desafíos de información en relación con la RAA

En términos amplios, en proyectos de recarga artificial de acuíferos (RAA) es común identificar faltas de información, datos, problemas administrativos, ambientales entre muchos otros aspectos a considerar, debido a ello es que en la presente sección se procederá a analizar de forma general los temas relevantes encontrados de acuerdo con la bibliografía analizada en el presente estudio. Para esto se ha separado cada brecha o desafío en las siguientes dimensiones.

6.1.3.1 Desafíos técnicos y de ingeniería

En general, de acuerdo con la bibliografía e información analizada, se evidencia que falta de datos hidrogeológicos y de calidad en cantidad y resolución suficientes para diseñar dispositivos de recarga (piscinas, zanjas, pozos de inyección), calibrar modelos numéricos y prever riesgos de colmatación o reacciones geoquímicas.

1. **Red piezométrica insuficiente y series temporales cortas:** Aunque Codelco mantiene una densa red de pozos de tipo de monitoreo y otros actores mineros también, en el sector de estudio (SGA, 2025), la evidencia bibliográfica denota que en las áreas específicas donde se pretende implementar las barreras hidráulicas no cuenta con esta densificación de monitoreo, la bibliografía experta (DGA, 2014) señalan la necesidad de una línea base mínima de 1 año de registros continuos y recomiendan idealmente ≥5 años para evaluar variabilidad estacional y tendencias (DGA, 2014; SCIRO, 2020).

2. **Escasez de ensayos hidráulicos (bombeo, trazadores, infiltración):** Las guías expertas exigen ensayos de bombeo, pruebas de infiltración y trazadores para estimar transmisividad, almacenamiento y tiempos de tránsito (DGA, 2014). En Calama se evidencia existe una falta de ensayos sistemáticos y de alcance regional que permitan extrapolar parámetros a escala del presente estudio. Las recomendaciones expertas indican la ejecución de ensayos de bombeo en pozos representativos, pruebas de infiltración en sitios propuestos y ensayos con trazadores para determinar tiempos de tránsito y rutas preferenciales.

3. **Caracterización geoquímica incompleta y riesgo de reacciones:** Según bibliografía, se enfatiza contar con una modelación geoquímica cuando se usa agua tratada o distinta a la natural del acuífero (DGA, 2014). La brecha en Calama es clara en este sentido faltando datos de posibles aguas fuente (desalada, superficiales, tratadas) insuficientes para modelar reacciones. En estos casos es recomendable contar con muestreos de calidad (parámetros físicos-químicos y trazas) en pozos y fuentes de agua específicos del área donde se pretende implementar este tipo de proyectos y modelación geoquímica para prever precipitación/disolución y el efecto de colmatación.

4. **Deficiencias en cartografía hidrogeológica y zonificación de idoneidad: L**as guía y antecedentes técnicos recomiendan SIG con múltiples capas (permeabilidad, uso de suelo, piezometría, calidad) para priorizar sitios (DGA, 2014). En Calama se reconoce la ausencia de un mapa de idoneidad regional con resolución suficiente y capas actualizadas de tipo públicos para una toma de decisiones en estas materias existiendo una clara recomendación para desarrollar y mantener actualizado un SIG de idoneidad con al menos 1:25.000–1:50.000 que integre geología, estratigrafía, piezometría, derechos de agua y usos ambientales.

5. **Diseño y pruebas piloto insuficientes:** Según documentos elaborados por la autoridad competente se recomienda un piloto con línea base y plan de monitoreo antes de escalar (DGA, 2014; SCIRO, 2020). Existe una clara brecha en Calama donde se evidencia una falta de pilotos representativos con seguimiento robusto que permitan validar métodos, no contándose con ningún proyecto a la fecha en el área de estudio o cerca que dé cuenta como una experiencia de referencia. La recomendación posible por avanzar es en diseñar y ejecutar pilotos (piscinas de infiltración y/o pozos ASR) con protocolos de monitoreo y evaluación de efectividad y colmatación. Lo anterior permitiría identificar los métodos posibles y descartar otros o factibles.

6.1.3.2 Desafíos legales y regulatorios

En general, de acuerdo con revisión de antecedentes, existen vacíos y requisitos procedimentales que deben resolverse antes de constituir derechos provisionales con cargo a recarga y para asegurar compatibilidad con otros derechos y normas ambientales.

1. **Claridad sobre constitución de derechos provisionales con cargo a RAA:** la normativa establece requisitos para constituir derechos provisionales y la necesidad de antecedentes del derecho de origen (DGA, 2014). A nivel nacional y en **Calama no se cuenta con una** certidumbre sobre la tramitación y condiciones específicas para derechos provisionales en contextos con sobreasignación y conflictos (DGA, 2025). Se evidencia que se debe avanzar en una coordinación temprana con DGA regional para definir requisitos documentales y criterios de evaluación de derechos con cargo a recarga.

2. **Compatibilidad con RCA y condicionantes ambientales:** Los proyectos RAA deben cumplir con normativa ambiental y condicionantes de RCA, las guías indican la necesidad de evaluar impactos y restricciones (DGA, 2014; CSIRO, 2020). En **la** zona no se evidencia un análisis detallado de condicionantes ambientales locales que podrían limitar volúmenes o ubicaciones de recarga. Se deben revisar expedientes ambientales vigentes (RCA) y realizar un mapeo de condicionantes para integrar en la selección de sitios y diseño operativo. Lo anterior permitirá establecer las condicionantes en materia de aprobaciones.

3. **Procedimientos administrativos y plazos para aprobación de obras de recarga:** La guía para efectuar RAA describe el proceso administrativo y la documentación mínima (memoria técnica, plan de monitoreo, etc.) (DGA, 2014). En la zona de Calama no se identifican los tiempos esperados y requisitos específicos de la DGA regional para casos con conflictos de derechos y usos múltiples, siendo criterios variados aplicados por parte de la autoridad. Para una buena gestión en esta materia será recomendable solicitar reuniones técnicas con DGA y autoridades ambientales para acordar cronograma, requisitos y posibles condicionantes. Esto permitirá ir delineando un plan con certezas y acuerdos en materia de posibles cambios que se vayan sucediendo.

4. **Marco jurídico sobre uso de aguas tratadas o desaladas para recarga:** Se aborda en normativa ambiental PAS 158 y guías, la necesidad de definir la naturaleza jurídica del agua a recargar y su compatibilidad con usos (DGA, 2014). Existe una falta de claridad sobre aceptación regulatoria de fuentes alternativas (por ejemplo, agua desalinizada o tratada) para recarga en contextos con derechos preexistentes. Es recomendable evaluar y documentar la situación jurídica de las fuentes de agua propuestas y obtener dictámenes legales previos.

6.1.3.3 Desafíos administrativos y financieros

Los temas administrativos y financieros representan una ventana relevante en estas materias, la ausencia de estimaciones de costos detallados, mecanismos de financiamiento y responsabilidades operativas a largo plazo, pueden trabar e desarrollo de este tipo de proyectos en el mediano y largo plazo.

1. **Estimación de costos de caracterización, piloto y operación: No se evidencia estimaciones reales** de costos en proyectos piloto y sistemas de monitoreo locales, generalmente estos datos son cerrados a nivel Publico y se estima se cuentan en actores como mineras, lo cual igualmente debería tener un factor de corrección en caso de ser públicos, ya que es conocido los sobrecostos afectos en minería por su escala. Estas estimaciones deseadas debiesen ser asociada los altos costos de equipos, pozos, telemetría, tratamiento, mantenimiento, lo cual permitiría dimensionar el monto de inversión y OPEX (costo de operación). Se deberá considerar elaborar un presupuesto detallado por fases (caracterización, piloto, operación industrial) con análisis de sensibilidad en la implementación del proyecto.

2. **Modelos de financiamiento y asignación de responsabilidades: Ya avanzando en una implementación de este tipo de proyectos se** sugiere que la constitución de derechos provisionales y la operación requieren acuerdos claros entre titulares y operadores, lo que implica claridad en el modelo de estimación de costos (DGA, 2014). En Calama como en otras zonas del país, existe una clara falta de acuerdos entre actores (minería, municipios, usuarios) sobre quién financia, opera y mantiene la infraestructura. Dejándose a criterio del interesado, ya sea público o privado el llevar adelante estas gestiones. Por lo que, a modo general, se debe avanzar en promover acuerdos de gobernanza (convenios, contratos de servicio) que definan roles, costos y mecanismos de recuperación. En el caso específico de este análisis y estudio, este desafió lo llevaría Codelco en términos de costo de implementación, pero igualmente debería promover las posibles alianzas en materia de autoridades por los alcances de derechos a constituir que son parte del agua que deberá contar el sistema.

3. **Capacidad institucional y recursos humanos:** Se describe que las funciones de la DGA y la necesidad de recursos para inspección y fiscalización (DGA, 2014) son un factor habilitante en estas materias, es de público conocimiento que la capacidad regional limitada para supervisar proyectos complejos y dar continuidad de personal técnico a estas iniciativas es limitado, lo cual representa un riesgo en términos de implementación y operación. Por ello, se debe contar con un plan de fortalecimiento institucional (capacitación, recursos para inspecciones, telemetría) y considerar contratación de asistencia técnica externa que apoye esta gestión de la autoridad según corresponda y bajo el marco legal existente.

6.1.3.4 Desafíos sociales

El rechazo actual a iniciativas de tipo mineras de cualquier índole en general propicia conflictos que vislumbran la carencia de procesos de participación y comunicación que aseguren aceptación social y eviten conflictos por derechos de agua y usos. En este caso específico, el proceso ambiental aprobado con que cuenta DMH de Codelco que involucro un proceso de consulta ciudadana y el más grande en términos de numero de Grupos Humanos Pertenecientes a Pueblos Indígenas (GHPPI) (Codelco, 2026), igualmente no acredita se sorteen estos procesos al momento de su implementación y operación, siendo una variable de gran incertidumbre. Es por ello por lo que el análisis de estos desafíos estará enfocado en aquellas etapas.

1. **Participación y consulta a usuarios locales y comunidades: Se recomienda por parte de las autoridades siempre mantener** consultas en fases piloto y de evaluación para este tipo de proyectos (SCIRO, 2020). En este proyecto en particular, se debe enfocar el esfuerzo en su implementación y operación, ya que la fase de proyecto y diseño ya cuenta con un proceso de participación reglado por la autoridad ambiental SEA. En base a lo anterior, es deseable diseñar e implementar un plan de participación temprana (stakeholder mapping, talleres, encuestas) y mecanismos de resolución de conflictos.

2. **Transparencia sobre beneficios y riesgos:** Las referencias enfatizan la necesidad de comunicar objetivos, riesgos y planes de monitoreo (DGA, 2014). Teniendo en cuenta que las medidas aprobadas en el marco ambiental son de mitigación y mejoras a lo existente en materia de calidad de aguas, se hace crucial en preparar material divulgativo técnico-comunicacional y establecer un portal público con datos de monitoreo.

3. **Impactos sobre usos existentes (agricultura, pozos domésticos, minería):** La normativa exige análisis de derechos y evaluación de potenciales perjuicios a terceros (DGA, 2014). En Calama y en general en la zona se evidencia una falta de inventario actualizado de pozos privados y usos que permita evaluar riesgos de perjuicio. Lo anterior, dado que se reconoce una cierta informalidad en que recurren las comunidades, sobre todo de tipo indígenas para la formalización de sus extracciones de aguas. Se hace necesario llevar adelante un catastro actualizado de pozos y usuarios afectados, con protocolos de compensación o mitigación.

6.1.3.5 Desafíos ambientales

En términos generales, la RAA representa muchas incertidumbres sobre sus efectos, rendimientos en los niveles y calidad del acuífero donde se pretende implementar, los ecosistemas dependientes y los riesgos de contaminación no deseados dada una mala implementación y operación. La zona de estudio de Calama no queda ajeno a este común denominador, siendo una zona aún más desafiante por sus características hídricos/ hidrogeológicas propias, sus dinámicas y velocidades de flujos acuíferas quedan sujetas a una gran variabilidad dependiendo de su localización, tal como se identificó en los pasados acápites de estado del arte, sujeto de estudio y propuesta metodológica. Es por lo que se analizan los factores claves que representan desafíos y brechas en relación con el óptimo desarrollo de este tipo de iniciativas en la zona.

1. **Línea base de calidad y vulnerabilidad a la contaminación insuficiente:** La guía exige línea base de calidad y evaluación de vulnerabilidad (DGA, 2014). Durante el proceso de evaluación ambiental ultimo que obtuvo DMH, se presentaron diversos datos de la calidad basal del acuífero mediante líneas base de puntos medidos en pozos de propiedad del titular con datos puntuales y modelaciones, lo cual se sustenta de forma robusta y consistente. No así con las fuentes de agua para efectuar una recarga, para lo cual, según se explicitó durante el proceso, solo se concentraría en garantizar calidad de acuerdo con la normativa, esto resulta aceptable más insuficiente de acuerdo con una aproximación robusta de garantizar los efectos deseados en el o los sectores donde se efectué la recarga para parámetros críticos (arsénico, sulfatos, conductividad). Es recomendable avanzar en garantizar una fuente fija con su respectiva caracterización de parámetros críticos para que esto garantice el rendimiento de la medida planteada, por otra parte, avanzar en muestreos sistemáticos en red de pozos y puntos superficiales, con frecuencia y parámetros definidos por la herramienta definida para ello (PAT) y así disminuir el riesgo que vayan caracterizando el comportamiento y efecto deseado (p. ej., mensual en fase piloto).

2. **Evaluación de impactos sobre ecosistemas de tipo freatófilos típicamente caracterizados en sistemas como el río Loa**: Uno de los requisitos o criterios establecidos por la autoridad es la identificación de ecosistemas dependientes y puntos de descarga natural (DGA, 2014). Esta condición representa un desafío, ya que no solo en esta zona de estudio, sino también a nivel general, el caracterizar estos sistemas y sus dinámicas es complejo y requiere esfuerzos técnicos, económicos y de gran escala. Una opción es realizar estudios ecológicos focalizados y monitoreo de indicadores biológicos en puntos sensibles. Lo anterior podría detallar como se relacionan estos sistemas con los niveles piezométricos.

3. **Riesgo de colmatación y pérdida de eficiencia:** Uno de los principales efectos no deseados en base a documentación advierte sobre colmatación en dispositivos de infiltración y la necesidad de técnicas de gestión (DGA, 2014). En Calama, dada la baja o nula tasa de proyecto orientados a recarga artificial descrito en

acápites anteriores, conlleva por resultado en un desconocimiento de tasas de colmatación locales y ausencia de protocolos operativos para mitigación. Avanzar en la realización de ensayos de colmatación en piloto, definición de procedimientos de limpieza y mantenimiento, y modelación de reducción de infiltración en el tiempo.

4. **Monitoreo de largo plazo y umbrales de acción:** La normativa y guías exigen un plan de monitoreo con umbrales y planes de contingencia (DGA, 2014). DMH elaboro un PAT para el control y seguimiento de su medida de mitigación lo cual se cuenta como robusta en términos de monitoreos. El establecimiento de umbrales operativos y planes de acción se vislumbra como un desafío, dado lo exigentes, y preventivos que deben accionar ante detección de contaminación o efectos adversos. La recomendación es avanzar en verificar si los indicadores, umbrales y protocolos de respuesta (stop-rules) establecidos de forma conceptual son idóneos teniendo en vista los datos reales medidos en los puntos cercanos de observación de las barreras hidráulicas antes de iniciar inyección a escala.

6.1.4 Definir criterios para seleccionar alternativas de sectores. Se busca detallar alternativas para efectuar una RAA en la zona de estudio.

Utilizando como base bibliográfica estudios anteriores (SCIRO, 2020) y criterios orientadores como el desarrollado específicamente por Amphos21 *(Amphos21, 2014) por encargo de* la autoridad DGA llamado "*Diagnóstico de Metodología para la Presentación y Análisis de Proyectos de Recarga Artificial de Acuíferos"* que a modo aclaratorio, tuvo por foco el seleccionar cuencas a mayor escala que la planteada en el presente estudio entre otros resultados, se establece un conjunto de parámetros y criterios técnicos ambientales que permitirán ser una herramienta objetiva para seleccionar alternativas de zonas para efectuar la recarga artificial en el área sujeto de estudio. En la Figura 31 se expone diagrama de flujo jerarquizado con procedimiento para la identificación de zonas con los pasos metodológicos para la selección de alternativas de zonas:

En este mismo estudio (Amphos21, 2014) donde se explicitan criterios para la exclusión de alternativas para seleccionar zonas, estos criterios dicen relación con:

- Por proximidad a la población o a ecosistemas ambientales.
- Por proximidad a otras instalaciones de recarga.
- Por legislaciones ambientales o de protección de acuíferos.
- Por la tipología del acuífero.
- Por la vulnerabilidad del medio o la profundidad del nivel freático.

Figura 31 Procedimiento para la identificación de zonas favorables



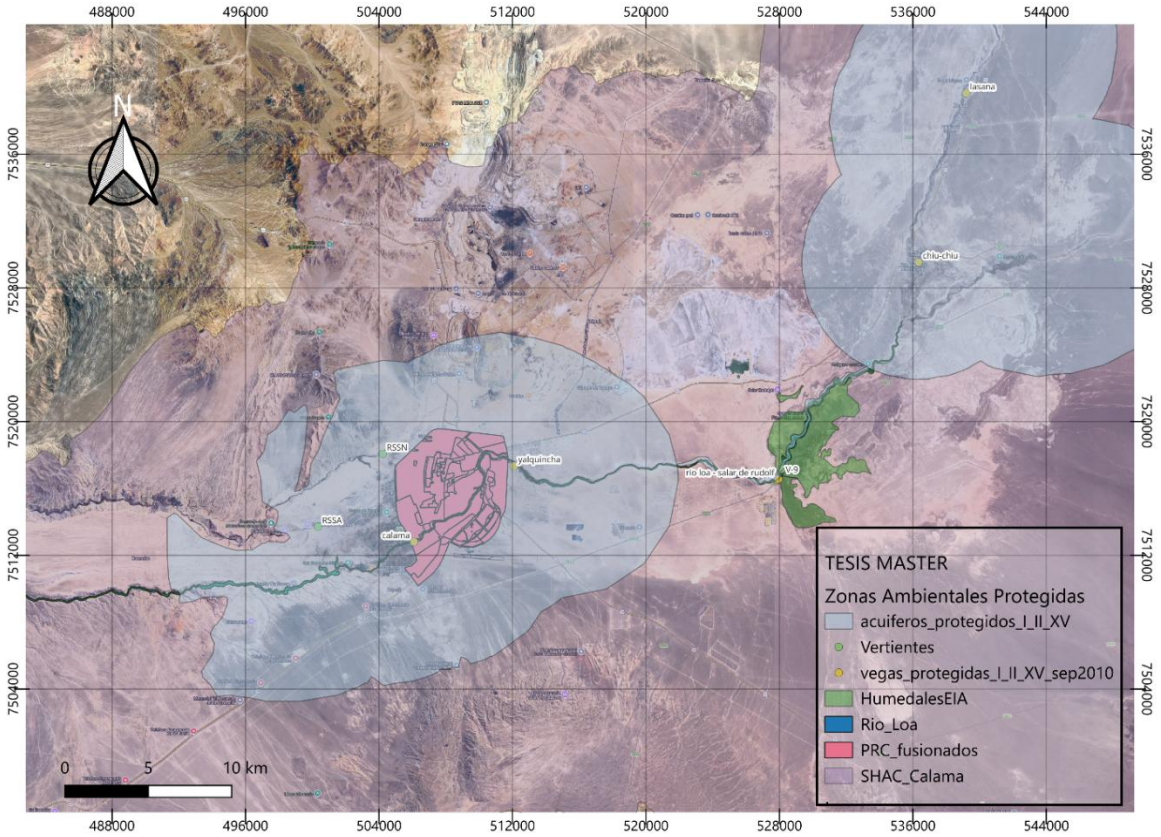
Fuente: Amphos21, 2014.

Teniendo en consideración estas restricciones, se acepta como criterio valido y se procede a su adaptación de acuerdo con el análisis plateado en el presente informe, mediante herramienta software cartográfica GIS se procede a elaborar imagen (Figura 32) donde se visualicen los lugares o zonas ambientales protegidas, poblaciones y otros proyectos de recargas existentes, de forma tal que sirva para establecer las zonas excluyentes. En detalle, analizando las resoluciones oficiales emitidas por la autoridad y normativas sectoriales que regulan aspectos de urbanismo, entre otros, fueron considerados para la zona estudio:

- Vegas y humedales reconocidos
- Acuíferos protegidos
- Vertientes y/ afloramientos
- Cursos de agua superficiales relevantes (Río Loa y San Salvador)
- Sistema Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC) Calama
- Plano Regulador y vigente de Calama (PRC)

Se puede visualizar en cartografía de Figura 32 que existen áreas ambientales (celestes, verdes, amarillas) que cuentan con restricciones de intervenciones y que requerirían al menos una tramitación de permisos ambientales y/o sectoriales de acuerdo con la legislación vigente, esto ya fue reconocido por Codelco en su evaluación ambiental para la medida de mitigación presentada (SGA, 2025), pero debe tenerse en consideración de acuerdo con plazos requeridos en caso de avanzar en estas alternativas. Para áreas urbanas, se reconoce el PRC, el cual, por su lógica, procede a establecer áreas para ciertos usos e infraestructura. Con relación a nuevos u otros proyectos de recarga en la zona no se identificó actualmente en base a búsqueda bibliográfica en sitios públicos de las autoridades ambientales como DGA, Municipalidad, entre otros.

Figura 32 Zonas de restricción Calama



Fuente: Elaboración propia.

Durante las etapas precedentes se procedió a analizar las características hidrogeológicas relevantes en conjunto con los datos existentes y distintivos en el sector de Calama, los parámetros hidráulicos e hidráulicos claves que son de importancia para poder efectuar una RAA. En esta sección se procederá a una desarrollar y evaluar como estos factores claves son aplicables y válidos para seleccionar alternativas a las ya evaluadas en la zona de estudio.

6.2 EVALUACIÓN TÉCNICA CUANTITATIVA DE LOS MÉTODOS SELECCIONADOS

Durante el desarrollo de capítulo 5.3 se detalló los criterios y parámetros claves para una selección de métodos que fueran factibles de implementar en el área de estudio, estos criterios buscan establecer una alternativa factible a lo ya planteado por Codelco durante su evaluación ambiental donde identifico barreras hidráulicas(pozos) como un método viable para hacerse cargo de sus compromisos. A continuación, se evaluará en base a las dimensiones propuestas, específicamente en la sección 5.3.1 que dicen relación con:

- Criterios propuestos de Baja permeabilidad de suelo, requerimiento de calidad de agua, superficie requerida
- Parámetros técnicos descritos en Tabla 13 de hidrogeología, almacenamiento acuífero, permeabilidad del suelo, calidad de agua, riesgos de contaminación, usos de suelos, aspectos regulatorios y socioambientales, entre otros.

Se elabora una matriz (Tabla 23) que permita evaluar de forma técnica y objetiva los métodos utilizables, integrando parámetros hidrogeológicos (permeabilidad, conductividad hidráulica y capacidad de almacenamiento), niveles piezométricos que en junto con la evaluación de calidad del agua (sulfatos, pH, arsénico y conductividad eléctrica) permiten una visión técnica integral de cada método de recarga artificial en función de las unidades principalmente sedimentarias (mp1, qa y EO1c) las cuales condicionan el funcionamiento hidráulico del sistema hidrogeológico.

La evaluación realizada justifica sus valoraciones con cada parámetro en función de la litología presente y de acuerdo con la bibliografía técnica que conceptualiza el comportamiento tipo de las unidades y parámetros en consistencia con lo siguiente:

Tabla 23 Evaluación de Métodos de Recarga Calama

Método	Caudal diseño (L/s)	Profundidad típica (m) (Guias)	Área requerida (ha)	Aptitud por unidad (mp1 / qa / EO1c)	Evaluación de niveles (línea base SHAC Calama)	Parámetros hidrogeológicos (K, T, S)	Evaluación de calidad del agua (SO_4, pH, As, CE)	Justificación técnica	Recomendación	Semáforo global
Piscinas de infiltración	20–50	1–3	2–5	mp1: Alta; qa: Alta; EO1c: Moderada	ACS ~2.300–2.400 msnm; buena respuesta piezométrica	K: 10^{-3}–10^{-2} m/s; T: alta; S: 0,15–0,25	As >100 µg/L; SO_4 300–800 mg/L; CE 1.200–2.500 µS/cm; pH aceptable	Alta infiltración pero riesgo geoquímico; requiere pretratamiento	Priorizar en mp1/qa con filtros y decantación	🟡
Zanjas de infiltración	10–30	1–2	0.5–2	mp1: Alta; qa: Moderada–Alta; EO1c: Baja–Moderada	ACS estacional variable; zanjas eficaces en mp1	K: 10^{-3}–10^{-2} m/s; T: moderada; S: 0,10–0,20	Riesgo de colmatación y movilización de As; sulfatos elevados	Eficaces en abanicos; calidad condiciona uso	Implementar en mp1 con monitoreo geoquímico	🟡
Galerías de infiltración	5–20	5–15	Variable	mp1: Moderada; qa: Moderada; EO1c: Baja	ACS poco afectado; respuesta lenta	K: 10^{-4}–10^{-3} m/s; T: baja–moderada; S: 0,05–0,15	Acumulación de contaminantes; difícil control	Excavación compleja y riesgo geoquímico	No priorizar	🔴
Pozos de inyección (ASR)	5–20/pozo	100–150	N/A	mp1: Condicional; qa: Condicional; EO1c: Condicional (baja)	ACI ~2.500–2.600 msnm; baja transmisividad	K: 10^{-5}–10^{-4} m/s; T: baja; S: 0,05–0,10	Inyección directa con As >100 µg/L no admisible	Requiere agua tratada (desalada/depurada)	Ensayos de admisibilidad con agua tratada	🟡
Pozos vadose (zona no saturada)	5–15	20–50	N/A	mp1: Alta; qa: Moderada; EO1c: Baja	Espesor no saturado en mp1 >20 m	K: 10^{-3}–10^{-2} m/s; T: moderada; S: 0,10–0,20	Riesgo de migración de As y sulfatos	Viables en mp1 con control geoquímico	Implementar pilotos con monitoreo	🟡
Atrapiemiento ribereño	10–40	5–10	1–3 ribereñas	mp1: Alta; qa: Alta; EO1c: Moderada	ACS conectado al Loa; respuesta rápida	K: 10^{-3}–10^{-2} m/s; T: alta; S: 0,15–0,25	Filtración natural mejora calidad pero As persiste	Mejora calidad por filtración; requiere monitoreo	Priorizar en mp1/qa ribereños	🟡
Recarga agrícola (field spreading)	5–15	0.5–1	2–10	mp1: Alta; qa: Moderada; EO1c: Baja	ACS responde en vegas agrícolas	K: 10^{-3}–10^{-2} m/s; T: moderada; S: 0,10–0,20	Riesgo de contaminación difusa + As y sulfatos	Riesgo alto de contaminación adicional	Evitar salvo control estricto	🔴
Drenajes subsuperficiales	5–10	1–3	1–5	mp1: Moderada; qa: Baja–Moderada; EO1c: Baja	ACS variable; poco eficaz	K: 10^{-4}–10^{-3} m/s; T: baja; S: 0,05–0,10	Riesgo de acumulación de contaminantes en drenes	Complejidad y riesgo geoquímico	No priorizar	🔴

Fuente: Elaboración propia.

- **La permeabilidad hidráulica (K)** es el parámetro primario que controla la velocidad de infiltración y la eficiencia de métodos superficiales (piscinas, zanjas) y someros (pozos vadose). En el sector DMH, las descripciones litológicas analizadas (sección 4.2) muestran abanicos y piedemonte (mp1) compuestos por gravas y arenas bien estratificadas, lo que corresponde a valores de K típicamente en el rango 10^{-3}–10^{-2} m/s, dichos valores permiten tasas de infiltración elevadas y justifican diseños de piscinas con caudales de 20–50 L/s con áreas de 2–5 hectáreas (ha) promedio para asegurar tiempo de retención y decantación (Freeze & Cherry, 1979). En el estrato qa, la alternancia de arenas y limos produce heterogeneidad lo que involucra que cuerpos de roca (lentes) gruesas pueden alcanzar K similares a mp1, pero lentes limosas reducen la eficiencia, debido a ello, a modo de recomendación, el realizar un mapeo fino antes de implementar. En EO1c, la cementación reduce K a 10^{-6}–10^{-4} m/s, limitando la recarga superficial y haciendo necesarias técnicas puntuales o descementación previa. La asignación de semáforo refleja esta relación directa entre K y viabilidad operativa (Freeze & Cherry, 1979).

- **La transmisividad (T)** (producto de K por el espesor saturado b) es utilizada para determinar la capacidad del acuífero para distribuir la recarga aplicada. En mp1, los espesores saturados reportados en la línea base (decenas de metros) combinados con K alta generan T elevada, lo que reduce riesgo de sobrepresión local y permite que la recarga aplicada sea recuperable por pozos cercanos (Domenico & Schwartz, 1998). En qa, la transmisividad (T) es de tipo heterogénea, mientras que conceptualmente, en EO1c valores bajos de K y espesores efectivos reducen T, por lo que la recarga tiende a permanecer local y no beneficia el sistema regional. Por tanto, métodos que dependen de difusión lateral (piscinas, atrapamiento ribereño) son más efectivos en mp1(valores verdes semáforo) y condicionales en qa (valor amarillo en semáforo), consecuentemente en EO1c se desaconsejan (valor rojo semáforo).

- **La capacidad de almacenamiento**, relacionadas entre el coeficiente de almacenamiento (Sy) y el almacenamiento específico (S_s) controlan el volumen de agua disponible por unidad de cambio de carga. En acuíferos no confinados como mp1, S depende del espesor saturado y de la porosidad efectiva. La presencia de gravas y arenas con porosidad efectiva relativamente alta sugiere S_s en el orden de 10^{-4}–10^{-3} m^{-1}, lo que permite almacenar volúmenes útiles tras recarga (Kruseman & de Ridder, 1994). En EO1c, la porosidad efectiva reducida por cementación implica S bajo, por lo que la recarga produce aumentos piezométricos con poco volumen almacenado útil. La clasificación semafórica sigue esta lógica.

- **Niveles piezométricos**, la línea base del acuífero Calama (SGA, 2025) indica niveles del ACS en torno a ~2.300–2.400 msnm en el área DMH, con variaciones estacionales y respuesta observable a aportes superficiales. Estos niveles determinan el espesor no saturado disponible para infiltración y condicionan la profundidad de diseño de pozos y zanjas. En mp1 la diferencia entre superficie y nivel freático permite aplicar recarga superficial sin riesgo inmediato de retorno

superficial, en EO1c la mayor profundidad y menor respuesta implican que la recarga superficial tendrá escasa eficacia. (Domenico & Schwartz, 1998; DGA, 2014).

- **Arsénico** (**As)**, la línea base (SGA, 2025) contiene valores naturales de 100 µg/L, muy por encima del umbral de la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 10 µg/L, esto constituye una limitación geoquímica relevante para cualquier estrategia de recarga. La recarga superficial o utilización de agua del mismo medio para la inyección sin tratamiento pueden movilizar As adsorbido o alterar condiciones redox que aumenten su solubilidad, comprometiendo la calidad del acuífero y la salud pública (Smedley & Kinniburgh, 2002). Por tanto, cualquier método que introduzca agua al subsuelo en DMH requiere pretratamiento específico para As (adsorción, oxidación, intercambio) y monitoreo continuo.
- **Sulfatos (SO_4),** valores de SO_4 en la línea base (300–800 mg/L) implican riesgo de incrustación y colmatación en medios de infiltración y en equipos (filtros, tuberías). La precipitación de sales y la formación de costras finas en la interfase suelo-agua reducen rápidamente la tasa efectiva de infiltración y aumentan costos de mantenimiento (Bouwer, 2002). Debido a ello, los diseños deben incluir prefiltros, manejo de sólidos y pruebas de colmatación, su clasificación y valores asignados dicen relación con esto, cuando la combinación con baja transmisividad agrava el problema. Adicionalmente al rol de eficiencia descrito, este indicador juega un rol de trazador de la calidad el acuífero, por lo que su evaluación y consideración en términos de la calidad debe perseguir umbrales por debajo de los indicados en la línea base del acuífero para poder cumplir con los objetivos de las medidas de mitigación planteadas por el titular Codelco (SGA, 2025)
- **Conductividad eléctrica y pH**, la CE elevada (1.2–2.5 mS/cm) indica salinidad que limita sus usos y puede favorecer procesos de intercambio iónico que movilicen metales. El pH reportado (6.5–7.8) es neutro y no limita por sí solo, pero condiciona la adsorción de As y la química redox del sistema. En conjunto, CE y pH requieren que los proyectos consideren el destino del agua recargada (uso agrícola, potable) y adopten tratamientos o barreras reactivas si se pretende uso sensible. Cabe mencionar que de acuerdo con la línea base (SGA, 2025) existen zonas con conductividades y ph relativamente altos, asociando esto a infiltraciones antrópicas de procesos mineros históricos por parte de Codelco.
- **Los parámetros de caudales, profundidades y áreas** y sus rangos de diseño propuestos (piscinas 20–50 L/s; zanjas 10–30 L/s; pozos ASR 5–20 L/s/pozo; profundidades y áreas asociadas) se fundamentan en la capacidad de infiltración estimada a partir de K y T, en la necesidad de decantación y en prácticas MAR documentadas (CNR/CSIRO, 2020; Bouwer, 2002). En mp1, los caudales mayores son sostenibles por K y T altos, en EO1c los caudales deben reducirse o evitarse para prevenir sobrepresión y colmatación. Las áreas propuestas (2–5 ha por piscina) buscan asegurar tiempo de retención y manejo de sólidos antes de la entrada al subsuelo.

- **Uso del suelo y disponibilidad de terreno**: Preferir áreas con baja impermeabilización y disponibilidad para obras; la cercanía a fuentes de agua (ríos, embalses, efluentes tratados) reduce costos logísticos.

- **Marco legal e institucional**: Verificar derechos de agua, permisos ambientales y responsabilidades de gestión; la existencia de un marco regulatorio claro es condición para avanzar.

- **Viabilidad socioeconómica**: Realizar análisis costo-beneficio; evaluar aceptación comunitaria y mecanismos de financiamiento.

- **Monitoreo y gestión**: Diseñar red de monitoreo (niveles piezométricos, calidad), establecer umbrales de alarma y protocolos de respuesta.

Se incluye y detalla en Anexo 12.1 metodología utilizada y polinomio multicriterio de factibilidad que integra parámetros hidrogeológicos, piezométricos y de calidad del agua. También se detalla función de colores asignadas en evaluación de tipo semáforo.

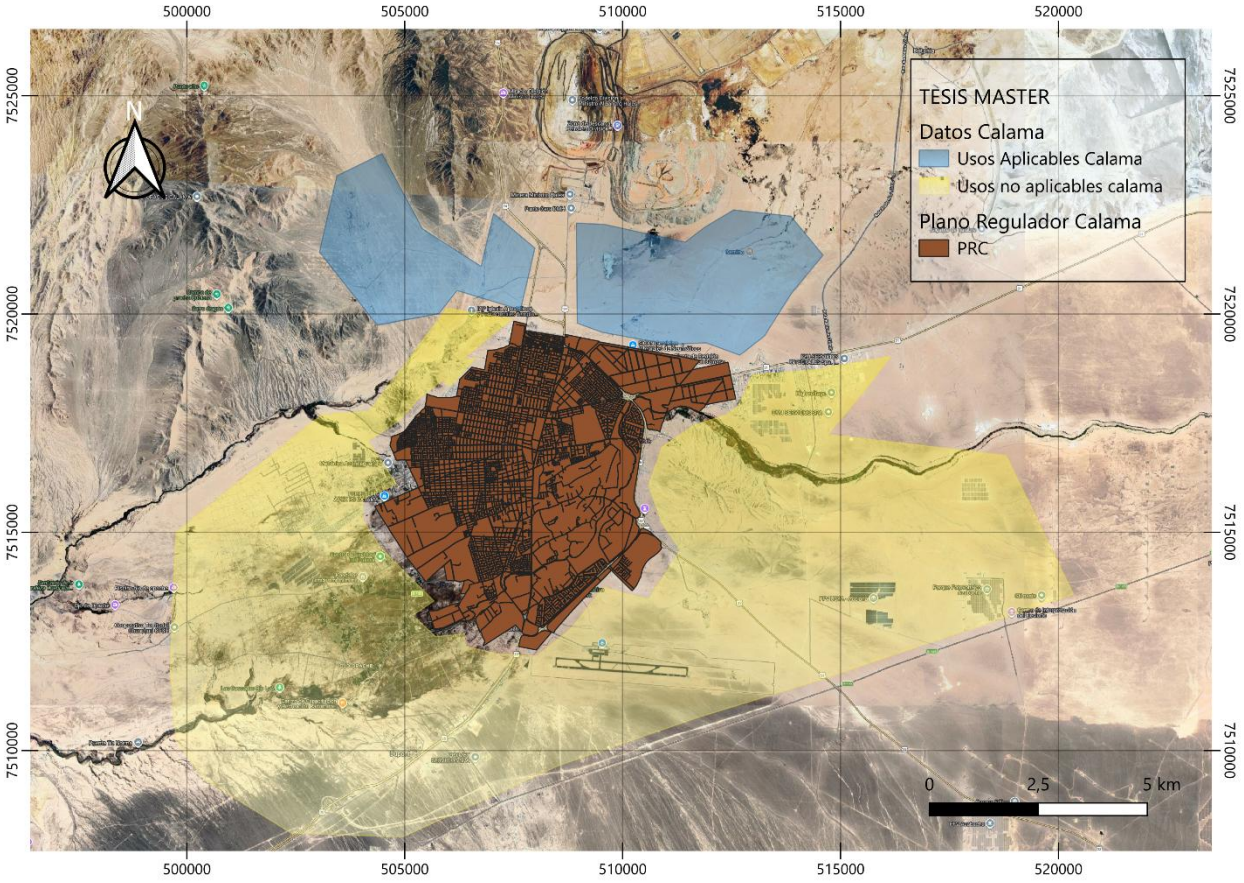
6.3 ANÁLISIS ESPACIAL DE MÉTODOS Y SU GRADO DE FACTIBILIDAD

En base a los resultados de la evaluación de criterios y parámetros para cada método propuesto en la sección 6.1, se analiza como los distintos métodos cuentan con factibilidad técnica de implementación en el sector de acuífero DMH, esto permite evaluar los métodos con una mirada principalmente hidrogeológica y técnica. En esta sección se abarcará de acuerdo con la metodología propuesta los criterios de tipo ambientales que son propuestos en la sección 5.3.1, esto dice relación en específico con, el uso del suelo o disponibilidad, el marco legal, la viabilidad socioeconómica y el monitoreo de las variables relevantes. Estos resultados de estos análisis serán presentados mediante cartografías que permiten resumir la información procesada de forma visual y cuentan con el beneficio de ser didácticos para los análisis planteados. Cabe resaltar que, aunque se considerar que el enfoque de la viabilidad socioeconómica es considerado dentro de la evaluación, este tomara en cuenta aspectos generales asociados al costo reputacional comunitario y no a los costos específicos de llevar adelante el desarrollo e implementación de este tipo de proyectos de RAA.

- **Uso del suelo y disponibilidad de terreno,** al evaluar de acuerdo con el plano regulador vigente de Calama identifica áreas urbanas consolidadas, zonas industriales y franjas agrícolas periféricas. Los métodos superficiales como lagunas de infiltración y zanjas de recarga presentan mayor factibilidad en terrenos agrícolas y periurbanos, donde existe disponibilidad de espacio y menor impermeabilización. Sin embargo, en áreas urbanas densas, la disponibilidad de

terreno es limitada, lo que restringe su implementación. La presencia de humedales y vegas cercanas constituye una restricción ambiental relevante, ya que la intervención podría alterar ecosistemas frágiles. Sin embargo, dado la compleja organización de infraestructura actual que presenta Calama con varios asentamientos de tipo irregulares (MINVU, 2026) se asume de difícil obtención y gestión de social, de permisos y aprobaciones regulatorias la gestión de terrenos ajenos a cualquier propiedad minera, en este caso de Codelco, por lo que cualquier emplazamiento de métodos a aplicar debiese privilegiar el uso de lugares que cuenten al menos con propiedad minera de este titular, de forma de facilitar estas variables. Si bien el uso y disposición de suelos será un tema a tratar de acuerdo a análisis de sectores a efectuar RAA, teniendo en cuenta como criterio orientador el Plano Regulador vigente de la Ciudad de Calama, el objetivo perseguido de recargar el acuífero cercano a donde se efectúa el origen del impacto a mitigar (SGA, 2025) y los datos geoespaciales de asentamientos irregulares visualizados a través de la herramienta de mapas en línea de Google, se elaboraron polígonos generales que permiten delimitar las zonas factibles de usos de suelos para la instalación de métodos de RAA(zonas en color celeste) y las que no son factibles (zonas en color amarillo) en la Figura 33 en escala aproximada de 1:100000.

Figura 33 Usos del Suelo Calama

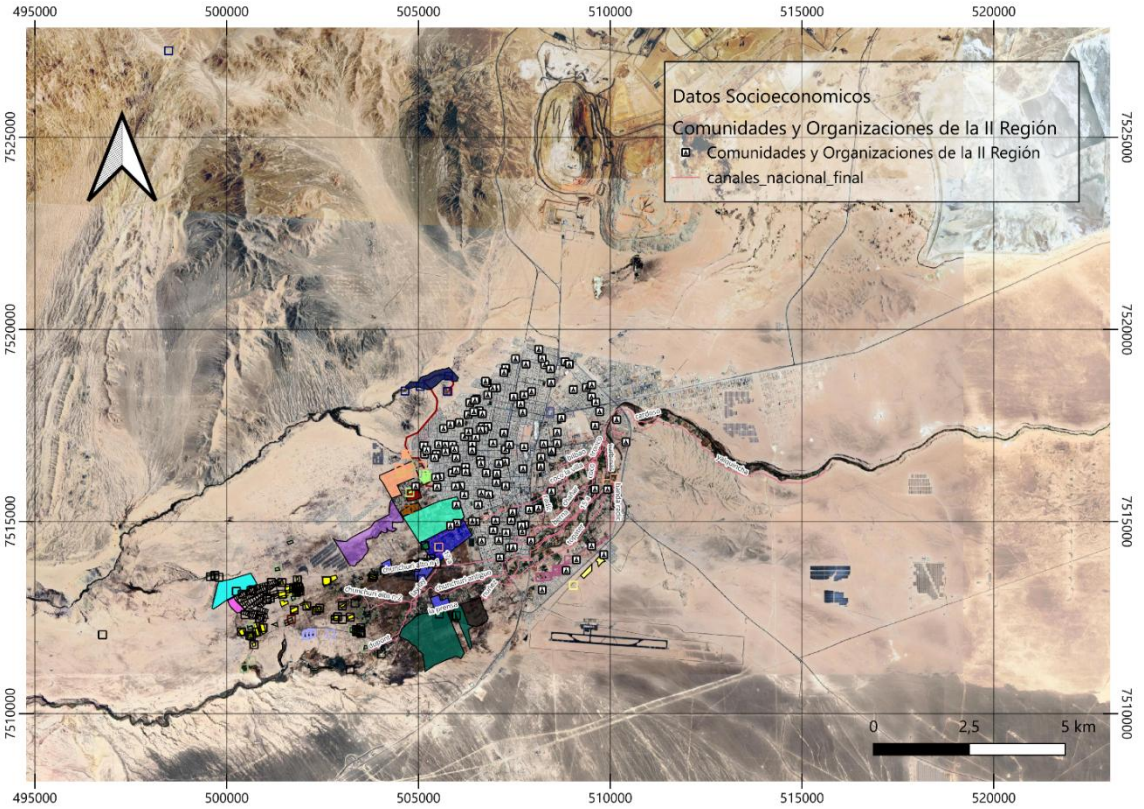


Fuente: Elaboración propia.

- **Marco legal e institucional**: la recarga artificial en el SHAC Calama requiere autorización de la Dirección General de Aguas (DGA), conforme al Código de Aguas y al Reglamento de Aguas Subterráneas. El marco legal establece que las obras deben garantizar que no se afecte la calidad ni la cantidad de agua, ni se generen perjuicios a terceros. Además, las zonas declaradas de restricción o prohibición por la DGA limitan la factibilidad de proyectos en sectores específicos del acuífero (Recarga artificial de acuíferos, 2014). La institucionalidad involucra también a la Comisión Nacional de Riego (CNR) y a comunidades de regantes, quienes deben participar en la gestión y monitoreo. Como se pudo revisar en detalle en Capitulo de 4.1 se ha ido detallando y avanzando en los requisitos para la implementación de métodos de recargas en Chile, así como también en el uso y estandarización mediante guías nacionales e internacionales. El presente análisis utiliza y se restringe al uso de este marco institucional para la elaboración de sus alternativas y así proponer resultados.

- **Viabilidad socioeconómica,** la aceptación comunitaria es clave. Las comunidades indígenas registradas por CONADI y las juntas de vecinos de Calama han manifestado preocupación por la calidad del agua y la seguridad de las obras. Métodos de bajo costo como zanjas de infiltración y lagunas son más viables socioeconómicamente, mientras que los pozos de inyección requieren inversiones mayores y operación continua, lo que puede limitar su aceptación. La participación de canalistas y regantes (líneas rosadas en figura siguiente) es esencial para asegurar financiamiento compartido y beneficios colectivos en caso de que así se lo plantee el proyecto (Informe-final, CNR, 2014). La evaluación ambiental del proyecto DMH calificada ambientalmente con RCA 114/2026 reconoció 46 Grupos Humanos Pertenecientes a Pueblos Indígenas (GHPPI) susceptibles de tener afectaciones (polígonos en colores Figura) por parte de las obras de su proyecto (SGA, 2025), la mayoría ubicadas mayormente en la zona sur de la ciudad de Calama, que, en conjunto con aproximadamente 160 asociaciones y organizaciones civiles (iconos figura siguiente), son actores relevantes en cuanto a proyectos de este tipo se refiere (MINVU, 2026). Sacar adelante el proceso con estas comunidades ofreció un esfuerzo realmente complejo en materia de acuerdos de medidas mitigatorias materializadas a través de los canales formales que establece la Ley 19.300, es por ello, que cualquier análisis de opciones como el realizado a través del presente informe, debe incorporar esta variable como un factor decisional, ya que incide directamente en temas como los plazos de implementación de cada método. A continuación, se elabora un mapa (Figura 34) que recoge y analiza en términos visuales la ubicación de todas estas organizaciones, usuarios de canales regantes y comunidades del mundo civil e indígena, sirve como una herramienta estratégica en materia de implementar los métodos de RAA para su emplazamiento entre otros factores.

Figura 34 Viabilidad socioeconómica



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados y recomendaciones de este análisis serna parte de las secciones correspondientes, pero se estima que claramente que las zonas sur y Sur poniente cuentan con escaza probabilidad de emplazar métodos para RAA, dada su lejanía con los efectos del proyecto, la zona densamente poblada por agricultores de tipo GHPPI y asentamientos informales (inseguridad).

- **Monitoreo y gestión,** Todos los métodos requieren redes de monitoreo piezométrico y de calidad de agua. Los riesgos de colmatación en métodos superficiales demandan mantenimiento frecuente, mientras que los pozos de inyección requieren ensayos de admisibilidad y control de presión. El marco regulador exige planes de monitoreo y contingencia frente a contaminación, además de participación de actores locales en la gestión (Recarga artificial de acuíferos, 2014). Adicionalmente, se propone realizar los siguientes pasos que aseguraran el o los métodos seleccionados cuenten con un control técnico, social y ambiental adecuado en todas las etapas del proyecto, diseño, construcción y más aún en la etapa de operación.

- Definir puntos de control (pozos) piezométricos y de calidad de acuerdo con la ubicación de los métodos (aguas arriba y abajo) implementando zonas sensibles como humedales y vegas cercanas entre otros aspectos en esta línea. Cabe mencionar en este punto que Codelco ya cuenta con una amplia red de monitoreo en el sector que permite ser utilizada en función de este objetivo denominada como Plan de Alerta Temprana (PAT). Adicionalmente y con el enfoque de variable socioeconómica, se plantea la incorporación de comunidades indígenas y regantes en caso de que cada método se emplace en áreas cercanas.
- Implementar red de monitoreo de niveles y calidad que incorpore la colocación de sensores de nivel y caudal, sondas multiparamétricas para calidad e idealmente acorde con los estándares actuales el registrar datos en plataforma digital abierta al público en general. En este punto se hace presente que Codelco cuenta con un robusto Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) comprometido y que, en análisis de su distribución espacial, ya consigue el objetivo de ser un buen referente del estado y los posibles efectos del acuífero. No obstante, aquello, siempre es deseable contar con puntos específicos de monitoreo a una distancia cercana a la ubicación del método a instalar definidos en base a criterios hidrogeológicos técnicos.
- Evaluación del desempeño de cada método, lo anterior en función de los puntos de puntos de control, monitoreos previamente definidos se debe analizar y comparar resultados de cada variable de niveles y calidad establecidas de recarga para con ello determinar su eficiencia.

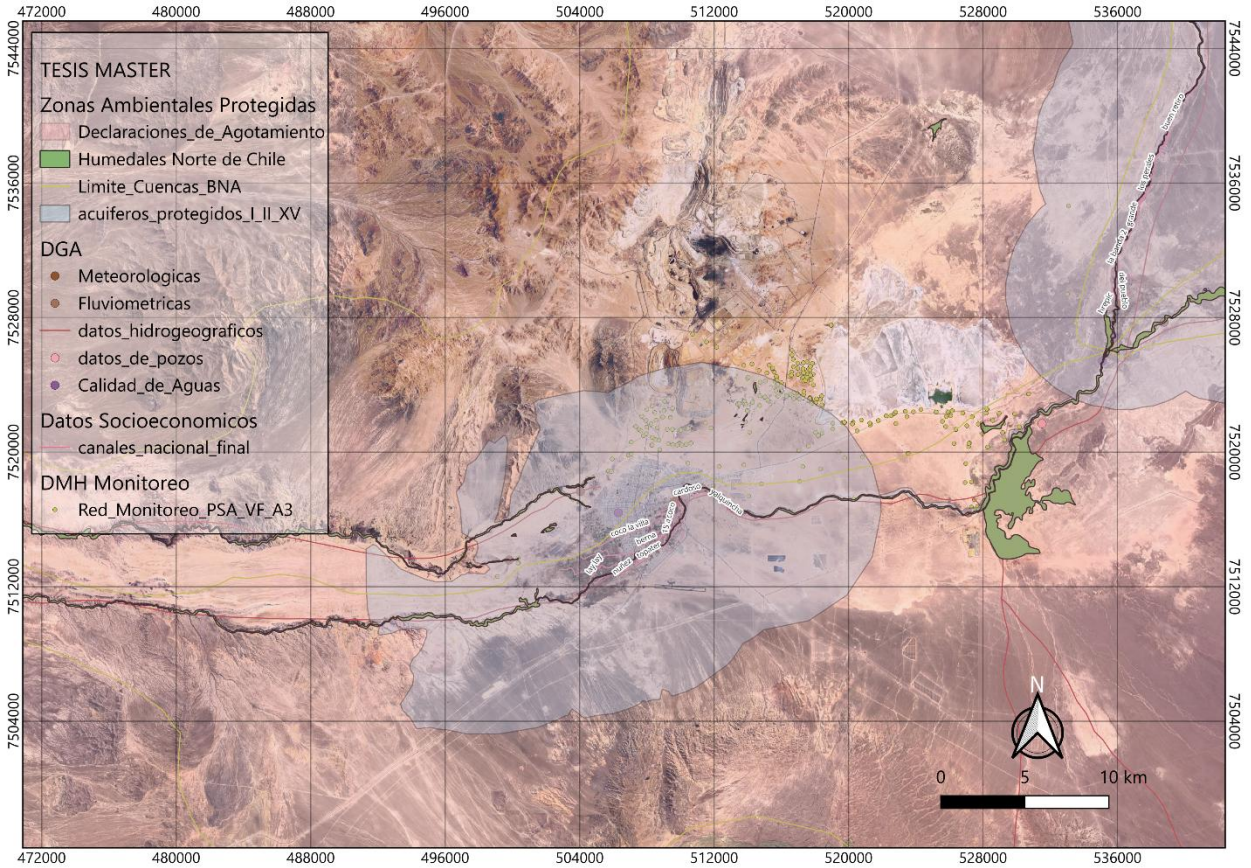
- **Restricciones ambientales y sociales,** El plano regulador y la normativa ambiental sectorial identifican zonas protegidas como humedales, vegas y áreas bajo protección oficial (parques, reservas). Estas áreas constituyen exclusiones para proyectos como de recarga artificial. Asimismo, la presencia de comunidades indígenas y organizaciones territoriales implica la necesidad de consulta y participación previa, conforme a la Ley Indígena y convenios internacionales. Teniendo en cuenta estas variables se ha recurrido al análisis de bases de datos y fuentes de la autoridad DGA, Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) entre otros con el objetivo de identificar las posibles interferencias que esto pueda atraer, la información recopilada fue:

  - Areas de restricción o prohibición
  - Cuencas hidrográficas
  - Acuíferos protegidos y ríos
  - Areas de Declaraciones de Agotamientos
  - Puntos de monitoreo públicos (estaciones meteorológicas, calidad de aguas, Fluviometricas)

- Canales de uso comunitario
- Juntas de vigilancias

Adicionalmente, como parte de la información recopilada y que representa una variable relevante en consideración, se sistematizo la información de monitoreo ambiental (PSA) que Codelco expuso como parte de su última evaluación ambiental que culminó con la obtención de su RCA 114/2026, esta red de monitoreo superficial y subterránea (puntos color verde) que dan cuenta de lo expuesto con anterioridad, contar con una red robusta y amplia en el sector (SGA, 2025). En la Figura 35 se exponen estas variables en una cartografía que permite evaluarlos en su conjunto.

Figura 35 Areas de restricciones ambientales, puntos de monitoreos



Fuente: Elaboración propia.

6.4 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE ZONAS PARA IMPLEMENTAR LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

Una vez identificados y seleccionados los distintos métodos factibles de contar con opciones para la zona de estudio, se procede a la adaptación metodológica expuesta en Capítulo 5.5 donde se establece un procedimiento para la identificación de zonas favorables con pasos jerárquicos. En base a lo anterior, se hace notar que estos criterios establecidos por Amphos21, fueron establecidos con un enfoque de selección de cuencas para establecer métodos RAA, lo cual es un objetivo ampliamente mayor al desafío de selección planteado en el presente estudio.

Complementariamente, los criterios utilizados para la selección de métodos son también aplicables para la identificación de zonas probables, ya que son interrelacionados, por lo que serán integrados.

A continuación, se detalla cada paso y se visualizan sus resultados para el establecimiento de criterios de acuerdo con el objetivo planteado y la zona de estudio:

- Paso 1: Identificación de criterios generales para la selección inicial de zonas
- Paso 2: Identificar criterios técnicos para cada zona seleccionada de acuerdo con parámetros hidrogeológicos de importancia
- Paso 3: Identificar criterios ambientales y socioambientales
- Paso 4: Establecer criterios de gobernanza
- Paso 5: Establecer criterios de monitoreo y gestión
- Paso 6: Establecer criterios decisionales

Paso 1: Identificación de criterios generales para la selección inicial de zonas

El objetivo es poder generar un inventario preliminar de unidades hidrogeológicas y territoriales susceptibles de recarga artificial en base a criterios que así lo permitan, se proponen los siguientes criterios:

- Determinar la disponibilidad de recurso superficial, disponibilidad de recurso superficial (caudales estacionales, fuentes de agua para recarga).
- Determinar las restricciones legales y ambientales (zonas de prohibición, humedales, áreas protegidas, plano regulador).
- Verificar las disponibilidades de terreno (uso del suelo, propiedad, posibilidad de acceso).
- Analizar los datos y referencias utilizadas tales como el plano regulador vigente de Calama, catastros de comunidades y regantes, antecedentes de Codelco sobre fuentes superficiales y disponibilidad de caudales.

Paso 2: **Identificar criterios técnicos para cada zona seleccionada de acuerdo con parámetros hidrogeológicos de importancia**

Se persigue el objetivo de determinar la viabilidad técnica de transferencia de agua superficial al acuífero, para ello se propone:

- Analizar la permeabilidad y transmisividad del acuífero.
- Evaluar la conectividad hidráulica entre superficie y acuífero (presencia de materiales permeables, espesor de zona no saturada).
- Determinar la profundidad del nivel freático y espesor de zona no saturada.
- Establecer los Riesgos susceptibles por colmatación (sedimentos, materia orgánica).
- Verificar la compatibilidad con métodos de recarga (infiltración superficial vs. pozos de inyección). Lo anterior en base a la comparación de parámetros hidrogeológicos extraídos de informes técnicos previos (sondeos, ensayos de bombeo, ensayos de admisibilidad) versus umbrales recomendados en la metodología de selección de métodos (ver Tabla 19).

Paso 3: **Identificar criterios ambientales y socioambientales**

Se deben establecer criterios que permitan identificar y excluir zonas con condicionantes ambientales debido a su alta vulnerabilidad y su modificación implicaría un efecto no deseado, los criterios propuestos son:

- Identificar la presencia de humedales, vegas y corredores ecológicos para su exclusión.
- Establecer Areas de sensibilidad de recursos culturales o territoriales asociados a Grupos Humanos Pertenecientes Pueblos Indígenas (GHPPI).
- Identificar zonas con condicionamiento de caudal ecológico o restricciones de mantención de un caudal.

Paso 4: **Establecer criterios de gobernanza**

Se busca evaluar la aceptación social, los derechos de aguas y capacidad de gestión enfocada hacia instituciones gubernamentales- sociales para ejecutar y operar el proyecto:

- Identificar mediante catastro la titularidad de derechos de agua para que permita evaluar traspasos o afectaciones.
- Identificar la presencia de actores locales claves como, comunidades indígenas, regantes, juntas vecinales, municipalidad y evaluar su aceptación de proyecto.

Paso 5: Establecer criterios de monitoreo y gestión

Definir los parámetros y protocolos de monitoreo para la zona seleccionada de forma que permita mantener las variables criticas bajo control, para ello se debe:

- Evaluar la instalación de red mínima de monitoreo (nivel y calidad) y su área.
- Definir los indicadores que permitan evaluar desempeño, seguridad y efectos ambientales. Tomando en cuenta los compromisos existentes en esta materia y que la zona pueda cumplirlos y que la zona no esté en zona de inseguridad (afectación equipos).

Paso 6: Establecer criterios decisionales

Establecer criterios de decisión y priorización con el objetivo de convertir los resultados técnicos y sociales en una priorización operativa, se propone:

- Establecer tipos de prioridades asignando escalar, alta, media y baja.
- Asignación de puntajes multicriterio que combinen ponderaciones por cada uno de los criterios previos (técnicos, ambientales, sociales, económicos, monitoreo).

En la Tabla 24 se integran todos los pasos, junto a un parámetro propuesto de evaluación especifica, su asignación de umbral, medición de variables y acciones correctivas para evaluación.

Los criterios expuestos en la Tabla 24 anterior, son presentados de forma referencial para la óptima selección de una zona, ya que, a modo de ejemplo, en el criterio de seguridad se busca establecer si la zona a seleccionar cumple un adecuado nivel de seguridad para el desarrollo de las obras, operación y mantenimiento, dado que Calama cuenta actualmente con un alto grado de asentamientos no formales que, en la realidad, agregan desafíos en materia de establecer la viabilidad de cualquier instalación de tipo industrial

Tabla 24 Cuadro resumen criterios

Categoría	Parámetro	Umbral/valor orientativo	Método de medición	Acción si no cumple
Hidrogeología	Transmisividad (T)	50–100 m²/d (preferible)	Ensayo de bombeo	Evaluar alternativa superficial o ensayos adicionales
Hidrogeología	Conductividad hidráulica (K)	≥1×10⁻⁴ m/s (orientativo)	Ensayo permeabilidad	Diseño con pretratamiento o pozo de inyección
Terreno	Superficie mínima piloto	0,5 ha (dependiendo del método)	Inventario catastral considerando restricciones	Rediseñar en base a método
Recurso	Caudal disponible piloto	mínimo de 0,1–0,5 L/s	Medición de caudal	Buscar fuentes alternativas o escalonar recarga
Ambiental	Buffer humedales	Mínimo de 50–200 m	GIS / campo	Excluir o condicionar con EIA (evaluación modelación)
Social	Acuerdo titulares	≥70% representación	Actas / convenios	Intensificar participación o descartar
Monitoreo	Densidad puntos de monitoreo requeridos (piezómetros y Calidad)	1 por 0,5–1 km²	Diseño de red	Evaluar puntos críticos(aguas arriba y aguas abajo)
Calidad	SO4 y Parámetros fisicoquímicos	SO4< 200mg/l Turbidez <5 NTU (pretratamiento)	Muestreo laboratorio	Mejorar pretratamiento
Operación	Numero de las Frecuencias mantenimientos requeridas	Cantidad vías y accesos para mantener la operación	Cumplimiento del Registro O&M	Reevaluar alternativas
Seguridad	% Seguridad de la zona	Zona accesos, vías emergencias y sin afectación equipos	Establecer N° de robos y tiempos de respuesta	Aumentar muestreo / detener recarga

Fuente: Elaboración propia.

7 RESULTADOS

En este capítulo se resumen y analizarán los principales resultados obtenidos en el capítulo de aplicación metodológica, se detallan los focos de la evaluación técnica y ambiental de los diversos métodos y zonas de Recarga Artificial de Acuíferos (RAA) seleccionados para el sector noreste de Calama. Este análisis expondrá los resultados obtenidos mediante la matriz multicriterio que integra parámetros hidrogeológicos, hidráulicos y de calidad de agua, comparando las alternativas frente a la opción de pozos de inyección inicialmente planteada por Codelco. Además, se analizan los criterios para cada zona seleccionados y los desafíos hallados en cada proceso.

7.1 RESULTADOS DE LOS MÉTODOS EVALUADOS

A continuación, se detallan y resumen los resultados obtenidos para los métodos evaluados:

- **Evaluación Técnica Cuantitativa por Unidades Hidrogeológicas**: Se estableció un criterio general de analizar en la posible factibilidad de los métodos en dependencia directamente de la litología y las propiedades hidráulicas de las unidades sedimentarias del sector. Esta aproximación si bien puede resultar general y conceptual, tiene la ventaja de ser un método analítico de fácil y rápida revisión, ya que se sustenta en información geológica existente y la capacidad de la formación conceptual en términos de rendimientos para poder transmitir los flujos, Los resultados se desglosan según las unidades identificadas:

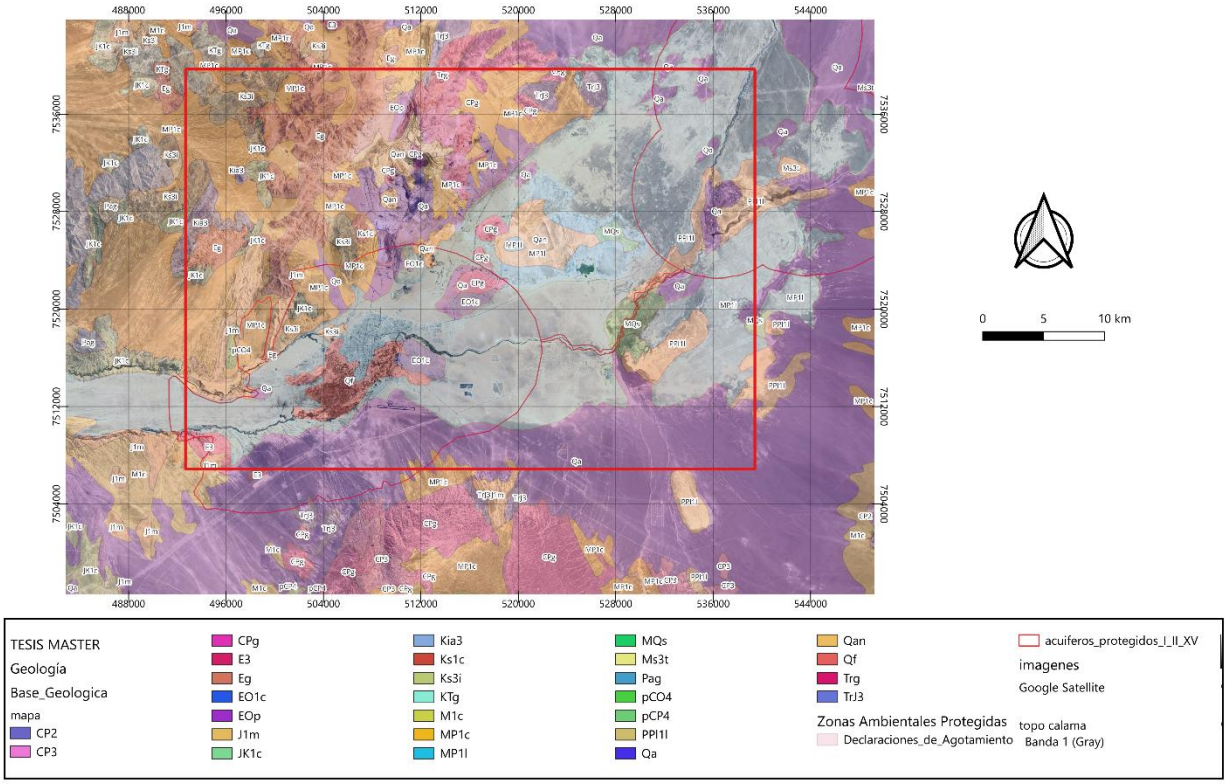
    - **Unidad mp1 (Abanicos y piedemonte):** Esta unidad representa los resultados más favorables para métodos superficiales. Cuenta con una conductividad hidráulica (K) elevada (rango de 10^{-3} a 10^{-2} m/s), lo que permite tasas de infiltración altas y justifica el uso de piscinas de infiltración con caudales de 20 a 50 L/s. Además, su alta transmisividad reduce el riesgo de sobrepresión local.

    - **Unidad qa (Arenas y limos):** Los resultados muestran una factibilidad condicionada debido a su heterogeneidad. Si bien existen lentes de arena con buena capacidad, la presencia de limos reduce la eficiencia, por lo que se recomienda un mapeo detallado antes de implementar cualquier método.

    - **Unidad EO1c (Rocas cementadas):** Resultó ser la menos apta para la recarga superficial. La cementación reduce la permeabilidad a valores de 10^{-6} a 10^{-4} m/s, lo que limita la difusión del agua y hace que la recarga permanezca estancada localmente sin beneficiar al sistema regional

En la Figura 36 se puede visualizar y verificar como estas unidades se relacionan con la zona estudio

Figura 36 Unidades geológicas y área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

- **Resultados por Método de Recarga Evaluado:** La matriz de evaluación (Tabla 23) asignó valoraciones objetivas basadas en el comportamiento hidráulico y los riesgos asociados:

    - **Piscinas o Balsas de Infiltración:** Calificadas como muy viables en la unidad **mp1**. Requieren áreas de 2 a 5 hectáreas para asegurar tiempos de retención y decantación adecuados.

    - **Zanjas de Infiltración:** Son efectivas para captar caudales estacionales o de crecidas (10 a 30 L/s), especialmente en abanicos aluviales.

    - **Pozos de Inyección (ASR):** Se consideran una alternativa de alto costo, pero necesaria para alcanzar el acuífero inferior (ACI) profundo. Requieren agua de alta calidad (desalada o tratada) para evitar la colmatación del pozo. Esta solución ya está contemplada dentro de la medida planteada por Codelco, si bien los resultados indican que es una opción viable de

implementar, se debe diferenciar por sector acuífero y teniendo en cuenta el sector donde se implemente

- **Atrapamiento Ribereño (Riverbank Filtration):** Factible en tramos del río Loa con sedimentos permeables, permitiendo caudales de 10 a 40 L/s y mejorando la calidad del agua de forma natural. Esta opción si bien es factible de realizar, representa una opción que debiese estudiar los tramos del rio loa donde se debiese implementar, lo anterior teniendo en cuenta que dada la descripción hidrogeológica del sector acuífero y balances hídricos (SGA, 2025) existen tramos del rio donde es un río ganador (acepta agua del acuífero) y zonas donde es un rio perdedor, siendo este último caso la única opción viable para el objetivo de recarga planteado.

- **Factores Geoquímicos y de Calidad de Agua:** El análisis determinó que la calidad química del acuífero receptor impone restricciones críticas a los métodos evaluados:
  - **Arsénico (As):** Los niveles naturales (100 µg/L) superan ampliamente los estándares de salud. Cualquier método de RAA en la zona corre el riesgo de movilizar este arsénico o alterar las condiciones redox, por lo que el pretratamiento específico es obligatorio para todas las alternativas.

  - **Sulfatos (So4):** Las altas concentraciones (300 a 800 mg/L) en algunos sectores y más, generan un riesgo elevado de colmatación e incrustación en filtros, tuberías y superficies de infiltración desde el puno de vista operativo. Esto incrementa los costos de mantenimiento y obliga a incluir sistemas de prefiltrado y manejo de sólidos en el diseño de los proyectos. Adicionalmente, en términos de mitigación, este parámetro se ha definido como un trazador e indicador de la eficiencia de las medidas a implementar en la zona, por lo que cualquier método, debe perseguir los umbrales objetivos de inyectar aguas de calidades con sulfatos bajo los 200 mg/l.

  - **Salinidad (Conductividad Eléctrica):** La CE elevada (1.2 a 2.5 mS/cm) puede favorecer el intercambio iónico que moviliza metales, condicionando el uso posterior del agua recargada. Además de ser un indicador interrelacionado con condiciones de infiltraciones, este debe apuntar a en caudal de inyección menor que en condiciones de línea base del acuífero.

- **Factibilidad Ambiental y Socioeconómica**: En la sección precedente 5.4 se analizaron variables externas que afectan la implementación de los métodos, los resultados relevantes son:
  - **Uso del Suelo:** Los métodos superficiales son factibles en zonas agrícolas y periurbanas, pero casi imposibles de implementar en el centro urbano consolidado debido a la falta de terreno y la impermeabilización. Se recomienda priorizar terrenos de propiedad minera (Codelco) para facilitar

la gestión de permisos, los cuales pueden ser una condicionante en términos de plazos.

- **Variables Sociales:** La presencia de 46 grupos humanos de pueblos indígenas y 160 organizaciones aprox. civiles en el sector de Calama representa un desafío de gobernanza. Los métodos de bajo costo (zanjas o lagunas) suelen tener mejor aceptación y menos invasivos se estima, mientras que los industriales (pozos de inyección) pueden generar mayor resistencia dada su alta complejidad técnica de demostrar ser una medida idónea para el objetivo de mitigar. Debido a la lejanía de los impactos y la alta sensibilidad social, las **zonas sur y sur-poniente se estiman con escasa probabilidad** para emplazar estos proyectos, lo anterior ya que debido a los impactos generados (obras mina, rajo), la conceptualización hidrogeológica y la dificultad que aumenta e intensifica al alza los caudales necesarios de inyectar para conseguir el efecto deseado.

- **Gestión y Monitoreo:** Se determinó que es indispensable contar con una red de monitoreo cercana al punto de recarga que incluya sensores de nivel, caudal y sondas multiparamétricas con datos abiertos al público para garantizar la transparencia y la eficiencia del método seleccionado. En términos de resultados se estima esta es una de las variables mejor cubierta actualmente dado el alto monitoreo del sector de Calama que mantiene Codelco, lo anterior sin contar a los otros usuarios del sector que sumarian datos y aportarían aún más a una red robusta.

Finalmente, en base a los resultados presentados en la Tabla 23 de evaluación de métodos de recarga en Calama donde se indican a modo de semáforo las posibilidades que cuenta cada método para ser una alternativa para tener en cuenta en el marco del objetivo del presente estudio, se descartaron métodos denotados en rojo evaluados como galerías de infiltración, recargas agrícolas y drenajes superficiales.

7.2 SECTORES FAVORABLES Y EXCLUYENTES

Mediante el análisis y evaluaciones se logró la identificación de sectores favorables y excluyentes, basándose en criterios técnicos, ambientales y socioeconómicos. A continuación, se detallan y resumen los hallazgos principales en términos de resultados respecto a las zonas analizadas:

- **Identificación de Zonas Favorecidas por Unidades Hidrogeológicas:** La factibilidad de las zonas se determinó inicialmente con un enfoque técnico de respuesta hidráulica de sus unidades sedimentarias, al igual en lo estimado para la selección de métodos:

- **Zona de Abanicos y Piedemonte (Unidad mp1):** Es la zona más favorable para la implementación de métodos de recarga superficial (como piscinas y zanjas). Presenta una conductividad hidráulica alta (10^{-3} a 10^{-2} m/s) y una transmisividad elevada, lo que reduce el riesgo de sobrepresión local y permite que el agua recargada sea recuperable por pozos cercanos.

- **Zona de Arenas y Limos (Unidad qa):** Se clasifica como una zona de factibilidad condicional o heterogénea. Aunque posee lentes de arena con buena capacidad, la alternancia con limos reduce la eficiencia general, requiriendo un mapeo fino previo a cualquier intervención.

- **Zona de Rocas Cementadas (Unidad EO1c):** Es la zona menos apta. Su baja permeabilidad (10^{-6} a 10^{-4} m/s) y escasa transmisividad provocan que la recarga permanezca estancada localmente, sin beneficiar al sistema regional.

- **Zonas de Exclusión y Restricción Ambiental:** Se aplicó criterios de exclusión para proteger ecosistemas y poblaciones, identificando áreas donde la recarga artificial no es viable lo cual dio como resultados relevantes:

  - **Ecosistemas Sensibles:** Se excluyen las zonas de vegas, humedales, vertientes y afloramientos. Asimismo, se estableció un área de restricción (buffer) de entre 50 y 200 metros como una referencia mínima alrededor de humedales para evitar alteraciones no deseadas en sus condiciones ecosistémicas.

  - **Zonas Urbanas y Consolidadas:** El área urbana de Calama, definida por el Plano Regulador vigente (PRC), se considera no factible para métodos superficiales debido a la alta impermeabilización del suelo y la falta de terrenos disponibles.

  - **Áreas de Inseguridad:** Se identificaron zonas con asentamientos no formales (informales) que agregan desafíos de seguridad para la instalación de infraestructura industrial, afectando la viabilidad operativa del proyecto. Esta variable si bien es un desafío difícil de cuantificar, es un criterio relevado dado la contingencia nacional de interrupciones de operaciones por efectos de robos entre otros que puede afrontar las medidas de mitigación.

- **Evaluación de Factibilidad Socioambiental por Sectores:** El análisis espacial arrojo resultados en torno a que la ubicación de las comunidades influye directamente en la posibilidad de éxito de los proyectos, entre otros factores están:

  - **Sectores Sur y Sur-poniente**: Se clasificaron con escasa probabilidad para el emplazamiento de proyectos de recarga. Los motivos incluyen su lejanía respecto a los efectos directos del proyecto minero, la alta densidad

de organizaciones indígenas (46 GHPPI) y la presencia de aproximadamente 160 organizaciones civiles que dificultan la obtención de acuerdos sociales y permisos en caso de que corresponda y adicionales a los ya obtenidos por Codelco.

- **Sectores de Propiedad Minera**: Se recomienda privilegiar zonas que ya cuenten con propiedad minera o directa de Codelco para facilitar la gestión de permisos regulatorios y la seguridad de los equipos. Este punto es crucial en términos de plazos para un proyecto RAA.

- **Parámetros Críticos Detectados en las Zonas:** El análisis específico de datos reales en los sectores de Hoya Quetena, DMH y Ojos de Opache reveló parámetros que condicionan la selección:

  - **Profundidad del Nivel Freático:** Se identificaron variaciones críticas; mientras que en el Salar del Indio los niveles aproximados son someros (5 a 15 metros), en otros sectores del norte las profundidades superan los 80 a 100 metros, lo que obliga a descartar métodos superficiales en favor de pozos de inyección profunda.

  - **Calidad de Agua Basal:** Todas las zonas evaluadas presentan concentraciones de arsénico (As) de 100 µg/L (superando el umbral de 10 µg/L) y sulfatos (300-800 mg/L). Esto significa que cualquier zona seleccionada requiere obligatoriamente pretratamiento de la fuente para no degradar aún más el acuífero. Adicionalmente como se menciona con anterioridad, el proyecto debe perseguir los objetivos planteados en la evaluación ambiental del parámetro trazador SO_4.

  - **Cono de Depresión:** Se analiza que en el sector específico de DMH existe una influencia directa del rajo de la mina, que induce las aguas hacia el fondo de la excavación, creando un cono de depresión que debe ser el foco principal de las barreras hidráulicas de recarga. Este factor obliga en términos de distancia en localizar un sector próximo a la fuente generadora de impactos para no incurrir en caudales de inyección excesivos.

Se propone una serie de criterios y resultados para un procedimiento jerárquico las zonas, asignando puntajes basados en:

- Prioridad Alta: Sectores con alta transmisividad (>50-100 m2/d), fuera de áreas protegidas y con seguridad para los equipos.

- Prioridad Media/Baja: Zonas con baja permeabilidad, cercanía a comunidades en conflicto o con riesgos de colmatación por alta turbidez de la fuente.

8 CONCLUSIONES

En base a los análisis, evaluaciones y resultados expuestos se pueden plantear las siguientes conclusiones.

1. Existe una clara importancia y relación en base a la Litología existente para la selección de métodos, la viabilidad de la recarga artificial en el noreste de Calama está estrictamente condicionada por las unidades sedimentarias, que a su vez condicionan la selección conceptual del método a implementar. La unidad mp1 (Abanicos y piedemonte) se consolida como la zona de mayor potencial para métodos superficiales (piscinas y zanjas) debido a su alta conductividad hidráulica (10^{-3} a 10^{-2} m/s), lo que permite manejar caudales de diseño de hasta 50 L/s o más dependiendo de los requerimientos. Por el contrario, la unidad EO1c debe ser descartada para estos métodos por su baja permeabilidad debido a la cementación. En términos estratégicos, a pesar de su alto costo operativo y de inversión, los pozos de inyección (ASR) son el único método factible para alcanzar el Acuífero Inferior (ACI) profundo, especialmente en sectores donde los niveles freáticos superan los 80-100 metros. Este método es crítico para cumplir con el compromiso de crear una barrera hidráulica positiva que mitigue el cono de depresión generado por el rajo de la mina ministro Hales, por lo que prescindir de esta opción en función de otra única alternativa no es viable.

2. Se confirma que parámetros como la transmisividad, conductividad hidráulica, la calidad del agua fuente y el cumplimiento del marco legal son factores de "muy alta" importancia, el éxito de cualquier método en Calama dependerá de equilibrar la alta capacidad de infiltración de las unidades superficiales (como mp1) con un control riguroso de los riesgos químicos (arsénico y sulfatos) y la aceptación de las comunidades locales.

3. Complementariamente, se visualiza que la presencia natural de arsénico (As) en concentraciones de 100 µg/L y de sulfatos (SO4) de origen antrópico (300-800 mg/L o más altos) entre otros parámetros de calidad de importancia impone la obligatoriedad de un pretratamiento y/o acondicionamiento avanzado para cualquier fuente de agua de recarga. Sin este tratamiento, la recarga artificial corre el riesgo de movilizar contaminantes o colmatar prematuramente los dispositivos de infiltración debido a la precipitación de sales. Así mismo, se cuenta con una restricción normativa y basal que indica el estricto cumplimiento de la regla que el agua a recargar debe ser de igual o mejor calidad que la condición basal del acuífero, lo que supone una complejidad importante dada las infiltraciones históricas presentes en el sector.

4. En función de las zonas a escoger, los resultados espaciales indican que las zonas Sur y Surponiente de Calama presentan una factibilidad muy baja para el

emplazamiento de infraestructura de recarga, por lo que claramente se descarta para cualquier emplazamiento de las alternativas. Lo anterior, entre otros factores a la densa presencia de 46 grupos humanos pertenecientes a pueblos indígenas (GHPPI), un alto número de organizaciones civiles y áreas de agricultura urbana, lo que elevaría significativamente el riesgo reputacional y los plazos de implementación de estas alternativas.

5. Finalmente se puede concluir en base a los análisis, evaluaciones y resultados que la alternativa con mayor probabilidad de éxito para Codelco es la combinación de pozos de inyección profunda en el entorno inmediato de DMH (para control de niveles) con piscinas de infiltración en la unidad mp1 (para recuperación ambiental), utilizando siempre agua desalinizada pretratada y manteniendo un monitoreo continúo abierto a la comunidad

9 RECOMENDACIONES

Es importante resaltar que el compromiso ambiental asumido por Codelco a través de la división Ministro Hales en la ciudad de Calama, represento la responsabilidad de asumir efectos ambientales históricos y pasados, en conjunto con la operación actual y futura. En función de lo anterior, se estima vital avanzar en diversificar las medidas para lograr contar una preparación preventiva en caso de que lo comprometido, no cuente con el grado de eficiencia esperable. A continuación, las recomendaciones en base a cada criterio evaluado.

1. Recomendaciones Técnicas e Hidrogeológicas

- Continuar con la recopilación de información base: Es imperativo establecer una línea base de monitoreo piezométrico y de calidad del agua de al menos un año, aunque lo óptimo para evaluar la variabilidad estacional y las tendencias a largo plazo es contar con registros de cinco años o más

- La ejecución de ensayos hidráulicos sistemáticos: Se recomienda realizar ensayos de bombeo, pruebas de infiltración (slug tests) y ensayos con trazadores en los sectores específicos donde se proyecten las obras

- Esto permitirá estimar con precisión la transmisividad, el almacenamiento y las rutas preferenciales de flujo, reduciendo la incertidumbre sobre la respuesta del acuífero ante recargas sostenidas

- Mapeo litológico de detalle: Dado que la unidad mp1 (Abanicos y piedemonte) es la más favorable para la infiltración superficial, se debe realizar un mapeo fino que identifique lentes de limos que podrían reducir la eficiencia de las piscinas o zanjas.

2. Recomendaciones de Calidad de Agua y Pretratamiento

- Tratamiento obligatorio de parámetros críticos: Debido a las altas concentraciones naturales de arsénico (As) (100 µg/L) y sulfatos de origen antrópico en la zona entre otros, cualquier proyecto de RAA debe analizar un proyecto que permita incorporar sistemas de pretratamiento específico (oxidación, adsorción o intercambio iónico) antes de la inyección o infiltración para evitar la degradación del acuífero

- Gestión de la colmatación: Se deben diseñar protocolos de mantenimiento rigurosos, como ciclos de llenado y secado para piscinas o sistemas de retrolavado para pozos de inyección, para mitigar la pérdida de eficiencia por la acumulación de sedimentos y sales (especialmente sulfatos)

- Caracterización de la fuente: Se recomienda avanzar en garantizar una fuente de agua fija (preferiblemente agua desalinizada), caracterizar de forma completa y exhaustivamente sus parámetros fisicoquímicos para asegurar que su calidad sea igual o superior a la del medio receptor.

3. Recomendaciones Operacionales y de Emplazamiento

- La implementación de proyectos piloto: Antes de escalar a una fase industrial las alternativas seleccionadas, es fundamental diseñar y ejecutar pruebas piloto (ya sea de piscinas o pozos ASR) con protocolos de monitoreo robustos para validar las tasas de infiltración reales y el comportamiento geoquímico local

- La Priorización de terrenos: Para facilitar la gestión de permisos y la seguridad de las instalaciones, se recomienda priorizar el emplazamiento de las obras en terrenos que sean de propiedad minera de Codelco u otra condición asimilable

- El Respeto de zonas de exclusión: Se deben mantener distancias de resguardo (buffers) y se propone evaluar los criterios de entre 50 y 200 metros respecto a ecosistemas sensibles como vegas, humedales y afloramientos, para evitar alteraciones en la dinámica de estos sistemas protegidos.

4. Recomendaciones Socio-Institucionales y de Gobernanza

- Elaborar un plan de participación temprana: Se debe implementar una estrategia de relacionamiento con los 46 Grupos Humanos Pertenecientes a Pueblos Indígenas (GHPPI) y las organizaciones civiles de Calama en caso de seleccionar alternativas distintas a las ya evaluadas, mediante mapas de actores, talleres y mecanismos de resolución de conflictos.

- Transparencia de datos: Es recomendable establecer un portal público de datos que muestre en tiempo real (vía telemetría) los resultados del monitoreo de niveles y calidad del agua, lo que permitiría reducir la desconfianza ciudadana hacia los proyectos mineros. Lo anterior homologable a cualquier compromiso actual que cuente Codelco

- La coordinación regulatoria: Se sugiere mantener reuniones técnicas constantes con la Dirección General de Aguas (DGA) regional para alinear los requisitos documentales de la tramitación del PAS 158 y los criterios para la futura constitución de "derechos de recuperación" sobre el agua recargada para las alternativas. Se recomienda incluir un análisis ambiental conjunto.

5. Recomendaciones de Monitoreo y Gestión de Riesgos

- La integración con el Plan de Alerta Temprana (PAT): La operación de los sistemas de recarga debe estar vinculada dinámicamente al PAT ya comprometido por DMH, utilizando umbrales operativos y protocolos de respuesta (stop-rules) claros que se activen ante cualquier detección de efectos adversos imprevistos.

- La evaluación de seguridad: Debido a la presencia de asentamientos informales en la periferia de Calama, se debe realizar un análisis de riesgo de seguridad física para la infraestructura y los equipos de monitoreo, garantizando accesos y vías de emergencia expeditas.

6. Recomendaciones Profesionales

- Adopción de un esquema híbrido de recarga: Los resultados del Capítulo 7 demuestran que ningún método por sí solo resuelve la totalidad de los objetivos ambientales y operacionales34. La unidad mp1 (abanicos y piedemonte), con conductividades hidráulicas elevadas y alta transmisividad, es idónea para métodos superficiales como piscinas de infiltración con caudales de diseño de 20 a 50 L/s y superficies de 2 a 5 hectáreas. Sin embargo, para mitigar directamente el cono de depresión inducido por la profundización del rajo de DMH y alcanzar el Acuífero Inferior (ACI) cuyos niveles freáticos superan los 80 a 100 metros de profundidad, los pozos de inyección profunda (ASR) constituyen la única alternativa técnicamente viable. Por tanto, el criterio profesional experto exige no descartar los pozos ASR, sino combinarlos sinérgicamente con piscinas superficiales en la unidad mp1

- Proximidad al cono de depresión de DMH: Para maximizar la eficiencia hidráulica de la barrera positiva y evitar la necesidad de bombear o inyectar caudales excesivos, las obras de inyección profunda deben localizarse en el contorno inmediato sur y norte del rajo minero, dentro de las zonas hidrogeológicas de influencia directa.

- Respeto irrestricto de fajas de protección (buffers): Toda obra de recarga superficial debe mantener un retiro o faja de resguardo de entre 50 y 200 metros respecto a vegas, humedales, vertientes y afloramientos naturales identificados, evitando perturbar la dinámica de estos ecosistemas dependientes del agua subterránea.

7. Recomendaciones de Aplicación

- Cierre de brechas mediante ensayos sistemáticos: Antes de congelar la ingeniería de detalle de las barreras hidráulicas, es indispensable ejecutar pruebas de bombeo de caudal constante y escalonadas, ensayos slug tests y pruebas con trazadores conservativos en los emplazamientos seleccionados. Esto permitirá

determinar in situ los valores reales de transmisividad, almacenamiento y rutas preferenciales de flujo en las unidades mp1 y ACI.

- La Contar con un plan de contingencia y seguridad física: Diseñar cerramientos perimetrales reforzados, accesos viales expeditos y sistemas de televigilancia en las estaciones de bombeo e inyección para prevenir actos delictivos o afectación de equipos de telemetría en sectores cercanos a zonas no formalizadas.

- Coordinación regulatoria temprana (PAS 158 y Código de Aguas): Mantener mesas técnicas formales con la Dirección General de Aguas (DGA) regional para armonizar la tramitación del PAS 158 en el marco del SEIA con la posterior constitución de derechos de recuperación de aguas recargadas (conforme a los artículos 66 bis, ter y quáter del Código de Aguas), asegurando la deducción precisa de las pérdidas del acuífero y el resguardo de terceros.

10 BIBLIOGRAFÍA Y WEBGRAFÍA

Aguas Andinas. (2025). Proyecto pionero de recarga artificial del acuífero Mapocho Alto. Aguas Andinas. https://www.aguasandinas.cl

Álamos, R., & Peralta, J. (1995). Estudio hidrogeológico sector Calama (Informe Técnico). Minera Leonor. https://cirh.dga.cl/

American Society of Civil Engineers, & Environmental and Water Resources Institute. (2020). Standard guidelines for managed aquifer recharge (ASCE/EWRI 69-19). *American Society of Civil Engineers*. https://asce.org

AMPHOS 21, & Dirección General de Aguas. (s. f.). Recarga artificial de acuíferos: Diagnóstico de metodología para presentación y análisis de proyectos. Ministerio de Obras Públicas. https://bibliotecadigital.ciren.cl/

Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo, & SGA Gestión Ambiental S.A. (2019). Anexos: Experiencias y comunicaciones sobre recarga artificial. *ALHSUD*. https://alhsud.com/

Bouwer, H. (2002). Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal, 10*(1), 121–142.

Bouwer, H. (2002). Artificial recharge of groundwater: Hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal, 10*(1), 121–142. https://doi.org/10.1007/s10040-001-0182-4

Bulboa, I. (2017). *Hidrogeología local de Pampa Llalqui: Circulación subterránea y desconexiones hidráulicas* [Tesis de Pregrado Universidad de Chile]. Repositorio UChile. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/144983

Cade-Idepe Consultores, & Dirección General de Aguas. (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del Río Loa. Ministerio de Obras Públicas. https://cirh.dga.cl/

Calderón, C. (2019). Aspectos jurídicos sobre la Recarga Artificial de Acuíferos (RAA): Revisión desde el derecho de aguas chileno, con referencia a España y Australia. *Revista Ius et Praxis, 25*(2), 151–186. https://doi.org/10.4067/S0718-00122019000200151

California Department of Water Resources. (2024). Sustainable Groundwater Management Act (SGMA). State of California. https://water.ca.gov/programs/groundwater-management/sgma-groundwater-management

Centro de Información de Recursos Naturales. (2021). Recursos naturales comuna de Calama. CIREN; Sistema de Información Territorial Rural. https://www.sitrural.cl/wp-content/uploads/2022/05/Calama_rrnn-1.pdf

Codelco. (2026, 14 de enero). Autoridad ambiental aprueba de manera unánime el proyecto que extiende la vida útil de la División Ministro Hales hasta 2054.

Corporación Nacional del Cobre de Chile. https://www.codelco.com/autoridad-ambiental-aprueba-de-manera-unanime-el-proyecto-que-extiende

Comisión Nacional de Riego, & CSIRO Chile. (2020). Guía metodológica: Marco cooperativo para proyectos de recarga artificial de acuíferos (Informe Final y Fichas RAG). Ministerio de Agricultura. https://www.cnr.gob.cl/wp-content/uploads/2020/07/Guia-Metodologica-y-fichas-280720_ver_final_3.pdf

Corporación de Fomento de la Producción, & Dirección General de Aguas. (1976). Investigación de los recursos hidráulicos en el Norte Grande. CORFO; DGA. https://cirh.dga.cl/

De Requesens Montiel, K. P. (2022). Experiencia de recarga gestionada de acuíferos en la cuenca de Santiago (Chile): lecciones aprendidas después de dos años de operación. [Tesis de Pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio UChile. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/176968

Departamento de Administración de Recursos Hídricos, & Dirección General de Aguas. (2000). Solicitud de declaración de agotamiento del Río Loa y afluentes (Informe DARH). Ministerio de Obras Públicas. https://cirh.dga.cl/

Departamento de Estudios y Planificación, & Dirección General de Aguas. (2003a). Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del Río Loa: Sectores Calama y Llalqui (SIT N° 85). Ministerio de Obras Públicas. https://cirh.dga.cl/

Departamento de Estudios y Planificación, & Dirección General de Aguas. (2003b). Modelación hidrogeológica de la cuenca de Pampa Llalqui (SDT N° 152). Ministerio de Obras Públicas. https://cirh.dga.cl/

Dillon, P. (2005). Future management of aquifer recharge. Hydrogeology Journal, 13(1), 313–316. https://doi.org/10.1007/s10040-004-0413-6

Dirección General de Aguas. (1987). Balance hídrico de Chile. Ministerio de Obras Públicas. https://cirh.dga.cl/

Dirección General de Aguas. (2014). Evaluación hidrogeológica del acuífero de Calama y del Río Salado. Ministerio de Obras Públicas. https://cirh.dga.cl/

Dirección General de Aguas. (2024). Circular DGA N° 3: Actualiza criterios e instrucciones para la tramitación de permisos de recarga artificial de acuíferos. Ministerio de Obras Públicas. https://dga.mop.gob.cl/uploads/sites/13/2024/06/circular_3_2024.pdf

Dirección General de Aguas. (2025a). Circular y resoluciones sobre aplicabilidad y permisos para recarga artificial en Chile. Ministerio de Obras Públicas. https://www.dga.cl

Dirección General de Aguas. (2025b, 21 de octubre). DGA expuso sobre recarga artificial de acuíferos en el Water Congress 2025 de Santiago. Ministerio de Obras Públicas. https://dga.mop.gob.cl/dga-expuso-sobre-recarga-artificial-de-acuiferos-en-el-water-congress-2025-de-santiago/

Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology* (2nd ed.). Wiley.

Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1998). Physical and chemical hydrogeology (2nd ed.). John Wiley & Sons. https://www.wiley.com/

EcuRed. (2018). Comuna de Calama. Enciclopedia Colaborativa Cubana. https://www.ecured.cu/index.php?title=Comuna_de_Calama

El Independiente. (2023, 7 de mayo). Israel, el paradigma de la reutilización de agua que ha acabado con la escasez. El Independiente. https://www.elindependiente.com/economia/2023/05/07/israel-el-paradigma-de-la-reutilizacion-de-agua-que-ha-acabado-con-la-escasez/

European Commission. (2025). Managed Aquifer Recharge (MAR) – Guidance Document No. 39.

Fernández Escalante, E., Henao Casas, J. D., & Calero Gil, R. (2024). Water quality aspects from Spanish sites to support managed aquifer recharge (MAR) guidelines not based on maximum allowable concentration standards. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, *13*(1), 55-74. https://doi.org/10.7343/as-2024-751

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall.

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). Groundwater. Prentice-Hall. https://openlibrary.org/books/OL4413155M/Groundwater

Greene, E. (2024). Comunidades de aguas subterráneas: El primer paso para la gestión integral de cuencas. Junta de Vigilancia del Río Elqui. https://www.rioelqui.cl/comunidades-de-aguas-subterraneas-el-primer-paso-para-la-gestion-integral-de-cuencas/

Hídrica Consultores, & Dirección General de Aguas. (2017). Sectorización de acuíferos y estudio de recarga en cuencas del Norte Grande. Ministerio de Obras Públicas. https://cirh.dga.cl/

Ingenieros Politécnicos Asociados, & Dirección General de Aguas. (1986). Mapa hidrogeológico nacional: Escala 1:1.000.000. Ministerio de Obras Públicas. https://cirh.dga.cl/

Ingenieros Politécnicos Asociados, & Dirección General de Aguas. (1995). Análisis de extracciones y sustentabilidad en el tramo Calama–Quillagua (SIT N° 20). Ministerio de Obras Públicas. https://cirh.dga.cl/

Instituto Nacional de Estadísticas. (2024). Resultados oficiales Censo de Población y Vivienda 2024: Región de Antofagasta. INE. https://censo2024.ine.gob.cl/wp-content/uploads/2025/03/02_PRESENTACION-R_REGIONAL-ANTOFAGASTA.pdf

International Groundwater Resources Assessment Centre. (s. f.). Global inventory of managed aquifer recharge schemes. IGRAC MAR Portal. https://marportal.un-igrac.org/

Kruseman, G. P., & de Ridder, N. A. (1994). *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data* (2nd ed.). International Institute for Land Reclamation and Improvement.

Kruseman, G. P., & de Ridder, N. A. (1994). Analysis and evaluation of pumping test data (2nd ed., Publication 47). International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI). https://www.wur.nl/en/show/Analysis-and-evaluation-of-pumping-test-data.htm

Madrid Aris, M. (2019). *Gobernanza y Economía del Agua* (Diapositiva de PowerPoint). Repositorio Master of Water Management MWM 510. Universidad Técnica Federico Santa María. https://aula.usm.cl.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023). Reglamentación y fichas técnicas sobre recarga gestionada en España. MITECO. https://www.miteco.gob.es/

Natural Resource Management Ministerial Council, Environment Protection and Heritage Council, & National Health and Medical Research Council. (2009). Australian guidelines for water recycling: Managing health and environmental risks (Phase 2) - Managed aquifer recharge (NWQMS Document 24). Australian Government. https://www.waterquality.gov.au/legacy/nwqms/publications/managed-aquifer-recharge

Portal Frutícola. (2025, 28 de mayo). Recarga de acuíferos: La estrategia que gana terreno frente al estrés hídrico en Chile. Portal Frutícola. https://www.portalfruticola.com/noticias/2025/05/28/acuiferos-estrategia/

Rivera-Vidal, R., Arumí, J. L., Melo, O., Delgado, V., Parra, V., Stehr, A., & Daniele, L. (2025). Managed aquifer recharge implementation challenges: Lessons from Chile's water-scarce regions. Groundwater for Sustainable Development

SGA Gestión Ambiental S.A. (2016). Experiencia de recarga gestionada de acuíferos en la cuenca de Santiago (Chile). Universidad de Chile. https://repositorio.uchile.cl/

SGA Gestión Ambiental S.A. (2025). Actualización modelo hidrogeológico conceptual: Proyecto Desarrollo Futuro DMH (Adenda EIA). Codelco División Ministro Hales; Servicio de Evaluación Ambiental. https://seia.sea.gob.cl/

Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry, 17*(5), 517–568.

Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. Applied Geochemistry, 17(5), 517–568. https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5

U.S. Environmental Protection Agency. (2023). Enhanced aquifer recharge research. EPA. https://www.epa.gov/water-research/enhanced-aquifer-recharge

Zheng, Y., Ross, A., Villholth, K. G., & Dillon, P. (Eds.). (2021). Managing aquifer recharge: A showcase for resilience and sustainability. UNESCO Publishing. http://hdl.handle.net/1885/296914

11 GLOSARIO Y ACRONIMOS

B

BAS

Basamento rocoso, 57

C

CASUB

Comunidades de Aguas Subterráneas, 69

CE

Conductividad Eléctrica, 101

CNR

Comisión Nacional de Riego, 45

Cochilco

Comisión Chilena del Cobre, 18

D

DAA

Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas, 81

DGA

Dirección General de Aguas, 15

DMH

División Ministro Hales, 17

G

GHPPI

Grupos Humanos Pertenecientes a Pueblos Indígenas, 121

GIRH

Gestión Integrada de Recursos Hídricos, 47

M

MAR

Managed Aquifer Recharge, 31

MAS

Medida, Acción y Solución, 46

MOP

Ministerio de Obras Públicas, 90

O

OMS

Organización Mundial de la Salud, 130

P

PAS

Permiso Ambiental Sectorial, 43

PAT

Plan de Alerta Temprana, 74

PRC

Plano Regulador y vigente de Calama, 125

PSCI

Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones, 24

R

RAA

Recarga Artificial de Acuíferos, 19

S

SAT

Soil-Aquifer Treatment, 49

SEIA

Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, 43

SHAC

Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común, 14

SMA

Superintendencia de Medio Ambiente, 99

SRA

Sistema de Recarga Artificial, 36

SST

Sólidos Suspendidos Totales, 99

T

TDS

Sólidos Disueltos Totales, 81

12 ANEXOS

12.1 ANEXO: EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO DE CALAMA (SECTOR DMH)

Metodología empleada

La evaluación se realizó mediante un **polinomio multicriterio de factibilidad** que integra parámetros hidrogeológicos, piezométricos y de calidad del agua. El polinomio se define como:

$$F(m) = \alpha \cdot K + \beta \cdot T + \gamma \cdot S + \delta \cdot N + \varepsilon \cdot Q$$

donde Kes la permeabilidad relativa, Tla transmisividad, Sla capacidad de almacenamiento, Nla respuesta piezométrica y Qla calidad del agua (As, SO_4, CE, pH). Los pesos asignados fueron: $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.20$, $\gamma = 0.15$, $\delta = 0.20$, $\varepsilon = 0.20$(Bouwer, 2002; Freeze & Cherry, 1979; Smedley & Kinniburgh, 2002).

Fundamentación y justificación técnica por método

Piscinas de infiltración

- **Factibilidad:** Alta en mp1; condicional en qa; baja en EO1c.
- **Justificación:** Alta permeabilidad y transmisividad permiten caudales de 20–50 L/s y áreas de 2–5 ha. La calidad del agua (As >100 µg/L; SO_4 300–800 mg/L) obliga a pretratamiento (Smedley & Kinniburgh, 2002).
- **Semáforo:** ◍ (condicional).

Zanjas de infiltración

- **Factibilidad:** Alta en mp1; condicional en qa; no recomendable en EO1c.
- **Justificación:** Caudales de 10–30 L/s; profundidad 1–2 m. Riesgo de colmatación por sulfatos y sólidos (Bouwer, 2002).
- **Semáforo:** ◍.

Atrapamiento ribereño

- **Factibilidad:** Alta en tramos con bancos aluviales conectados.
- **Justificación:** Filtración natural mejora turbidez, pero As persiste. Caudales de 10–40 L/s; profundidad 5–10 m (Bouwer, 2002).
- **Semáforo:** ◍.

Pozos vadose

- **Factibilidad:** Factible en mp1; condicional en qa; no recomendable en EO1c.
- **Justificación:** Espesor no saturado >20 m; caudales de 5–15 L/s. Riesgo de migración vertical de As (Freeze & Cherry, 1979).
- **Semáforo:** ◍.

ASR (pozos de inyección)

- **Factibilidad:** Baja sin tratamiento; condicional con agua tratada.
- **Justificación:** Baja transmisividad del ACI; riesgo de sobrepresión y movilización de As. Requiere agua tratada y ensayos de admisibilidad (Bouwer, 2002).
- **Semáforo:** ● (sin tratamiento) → ◍ (con tratamiento).

Galerías de infiltración

- **Factibilidad:** Baja.
- **Justificación:** Costos elevados y dificultad de control geoquímico en EO1c.
- **Semáforo:** ●.

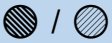
Recarga agrícola

- **Factibilidad:** No recomendable.
- **Justificación:** Alta CE y As limitan uso agrícola; riesgo de contaminación difusa (Smedley & Kinniburgh, 2002).
- **Semáforo:** ●.

Drenajes subsuperficiales

- **Factibilidad:** Baja.
- **Justificación:** Baja transmisividad y riesgo de acumulación de contaminantes.
- **Semáforo:** ●.

Cuadro resumen ejecutivo

Método	Factibilidad	Semáforo	Recomendación
Piscinas de infiltración	Alta en mp1; condicional en qa		Pilotos en mp1 con tratamiento previo
Zanjas de infiltración	Alta en mp1; condicional en qa		Zanjas estacionales en mp1
Atrapiemiento ribereño	Alta en mp1/qa ribereños		Pilotos en tramos ribereños
Pozos vadose	Factible en mp1		Pilotos controlados con monitoreo
ASR	Baja sin tratamiento		Solo con agua tratada y ensayos
Galerías	Baja		No priorizar
Recarga agrícola	No recomendable		Evitar salvo control estricto
Drenajes subsuperficiales	Baja		No priorizar

Fuente: Elaboración propia.

Conclusión generales

Los métodos más factibles para el acuífero de Calama son piscinas de infiltración, zanjas y atrapamiento ribereño, implementados en unidades mp1 y lentes favorables de qa, siempre con tratamiento previo del agua y monitoreo intensivo. Los métodos profundos (ASR, pozos vadose) son condicionales y requieren ensayos piloto y agua tratada. Los métodos restantes (galerías, recarga agrícola, drenajes) no se recomiendan por limitaciones hidrogeológicas y riesgos de calidad.

12.2 ANEXO: FICHAS BIBLIOGRÁFICAS

En la siguiente sección se ha seleccionado e incluido las fichas bibliográficas fundamentales que han permitido en su conjunto ser un pilar para el desarrollo de la presente investigación

	TIPO de lectura (fundamental, específica, complemento)
Referencia bibliográfica o Dirección web completa:	https://www.1ta.cl/en-audiencia-especial-se-constata-el-estado-de-cumplimiento-de-la-conciliacion-entre-el-cde-y-la-compania-minera-candelaria/
Palabras claves:	Conciliación Ambiental, daño ambiental al acuífero del río Copiapó,
Conceptos y/o Ideas fundamentales: **1.“Citas textuales”** **2. Redacciones propias**	1. “*En este sentido, en abril de 2025, la DGA señaló que una de las medidas –la Conducción de agua al Río Copiapó y al Parque Kaukari— se encontraría parcialmente cumplida. Según el organismo, el agua descargada por la compañía se infiltra antes de alcanzar el parque, quedando a unos 500 metros aguas arriba. Por esto, la DGA propuso que el volumen comprometido se contabilice desde el punto en que el agua llega efectivamente al parque”.* 2. *“El CDE demandó a la Compañía Contractual Minera Candelaria por haber causado daño ambiental en el Sector N° 4 del acuífero del río Copiapó, debido al descenso de los niveles estáticos históricos de los pozos. Según el CDE, esta situación se habría producido por la sobreexplotación de aguas subterráneas más allá de los límites autorizados en la evaluación ambiental del proyecto “Segunda Fase Proyecto Candelaria”, incumpliendo además otras obligaciones ambientales destinadas a proteger el recurso hídrico, como la reducción del uso de agua fresca en la medida que se incorporaban nuevas fuentes de abastecimiento”*. 3. Recarga artificial para restaurar un río: En un hecho inédito en Chile, Minera Candelaria (Región de Atacama) acordó reinyectar agua al acuífero de Copiapó para recuperar el caudal superficial del Río Copiapó. Este compromiso surgió tras un acuerdo de conciliación con el Consejo de Defensa del Estado (CDE) en un proceso legal medioambiental. Después de décadas con el lecho seco por sobreexplotación, el río volvió a fluir de forma permanente gracias a la recarga, demostrando un caso exitoso de RAA aplicada por la industria minera como medida de compensación ambiental.

	4. Características del proyecto de inyección: El acuerdo estableció que Compañía Minera Candelaria inyectaría 6,3 millones de m³ de agua al acuífero de Copiapó en un plazo de 15 años, a razón de 25 L/s permanentes. Esta agua proviene de los excedentes de su propio sistema de producción y permite realimentar las napas subterráneas que nutren el río. La minera coordina la operación con la Junta de Vigilancia del Río Copiapó y la comunidad de aguas locales, cediendo incluso parte de sus derechos de aprovechamiento de agua para asegurar el flujo comprometido. En la práctica, se perforaron pozos de inyección cercanos al cauce seco, por donde se introduce el agua tratada, elevando el nivel freático y emergiendo nuevamente en el lecho del río más abajo. Este aporte constante ha logrado revitalizar un tramo significativo del Río Copiapó que permanecía seco, beneficiando ecosistemas y usuarios aguas abajo, y generando un precedente innovador en la gestión hídrica minera.
Aporte específico que se cree obtener sirve para: **Orientar** **Avalar** **Complementar** **Definir** **Contrapropuesta** **Otros aportes**	Este artículo expone un caso interesante de daño ambiental por efectos de mayores extracciones de agua fresca desde un acuífero y posterior medida compensatoria ejecutada a través de la descarga a un curso superficial de aguas como lo es el río Copiapó lo cual tendría entre sus efectos provocar la recarga del acuífero subyacente por efectos de infiltración en el avance del curso de agua. Otra orientación relevante que presenta este caso es la aproximación que realiza a una medida de compensación ambiental comprometida que permite recargar un acuífero afectado mediante el vertimiento de aguas a un lecho o cauce por efectos de una operación minera Finalmente se presenta por parte de la operación minera un estudio de demanda hídrica que pretende diagnosticar los consumos del sistema acuífero tanto naturales(bióticos) como antrópicos(agricultura), entre otros factores. Este caso de Minera Candelaria **avala** la eficacia de la RAA como herramienta de *restauración ambiental* y **complementa** el panorama nacional con un ejemplo concreto de colaboración público-privada en beneficio de una cuenca. Funciona como **orientación** al mostrar cómo una empresa minera, en respuesta a sus impactos pasados y presiones legales, implementó la recarga artificial para **definir** una solución sostenible: reponer el agua subterránea extraída y reparar un ecosistema fluvial dañado. Además, sirve de **contrapropuesta** y referencia para otras faenas mineras, indicando que la RAA puede ser exigida no solo por la normativa ambiental (vía PAS 158) sino también por acuerdos judiciales para asegurar la protección de recursos hídricos críticos

Materiales más significantes: **Tablas** **Gráficos** **Ejemplos** **Fotografías** **Mapas** **Otros**	1. Cifras (caudal 25 L/s, volumen total 6,3 millones m³); Ejemplos (fotografías del río con caudal recuperado; referencias al convenio con autoridades)

	TIPO de lectura (fundamental, específica, complemento)
Referencia bibliográfica o Dirección web completa:	https://dga.mop.gob.cl/dga-expuso-sobre-recarga-artificial-de-acuiferos-en-el-water-congress-2025-de-santiago/
Palabras claves:	Política hídrica Chile; Código de Aguas 2022 (art. 66 bis); solicitudes de recarga (2015–2023); sequía estructural; gestión en minería, PAS 158; sostenibilidad en minería; desafíos regulatorios
Conceptos y/o Ideas fundamentales: **1.“Citas textuales”** 2. **Redacciones propias**	**Situación actual y cifras nacionales:** En un contexto de **16 años consecutivos de sequía en Chile**, la DGA reveló que entre 2015 y 2023 se registraron **solo 8 solicitudes formales de proyectos de recarga artificial** en el SEIA (3 en la Región de Tarapacá, 1 en Valparaíso, y 4 en la Región Metropolitana). Esta cifra refleja que la adopción de la RAA en la gestión hídrica nacional todavía es incipiente. Varias de estas solicitudes provienen del sector minero, donde la prolongada escasez hídrica (que tiene al 33% de los acuíferos del país con restricciones de extracción) ha motivado a explorar soluciones innovadoras para asegurar agua en el futuro. La DGA destacó que la **minería enfrenta una presión especial** debido a su alto consumo de agua y la competencia con otros usos, por lo cual la RAA se presenta como una **solución basada en la naturaleza** importante para mejorar la seguridad hídrica en cuencas áridas y reducir la dependencia de fuentes tradicionales. [Adelante,...estigación | Word] [Adelante,...estigación | Word], [Adelante,...estigación | Word]

	Normativa y Permiso PAS 158: Tras la entrada en vigor del Reglamento del SEIA (D.S. 40/2012), es obligatorio tramitar el **Permiso Ambiental Sectorial Nº 158** ante la DGA para cualquier obra de recarga artificial de acuíferos dentro de un proyecto sujeto a evaluación ambiental. Con la reforma al Código de Aguas en 2022, los artículos 66 bis, ter y quáter del Código **reconocen explícitamente la RAA y establecen condiciones**: la DGA debe autorizar previamente tales obras (verificando que no afecten el agua potable ni la calidad del acuífero), se exige permiso especial si la recarga busca crear nuevos derechos de agua, y se atribuye responsabilidad al titular por eventuales perjuicios a terceros. La legislación ahora permite infiltrar aguas de diversas fuentes (canal, pozos, lluvias, **aguas desalinizadas o tratadas**) siempre que no causen colmatación ni contaminación. En 2024, la DGA actualizó la **Circular N°3/2024** para aclarar la aplicación del PAS 158, eximiendo del mismo ciertas obras (por ejemplo, reinyección de aguas residuales industriales reguladas por otros permisos, o recarga incidental no intencional), mientras que enfatiza que las obras de recarga intencional para aumentar disponibilidad o mejorar calidad **deben tramitar el PAS 158**. [Adelante,...estigación | Word], [Adelante,...estigación | Word] [Adelante,...estigación | Word] [Minuta téc...AS158_RevB | Word], [Minuta téc...AS158_RevB | Word] **Desafíos para la implementación en minería:** El Subdirector de la DGA, Cristián Núñez, subrayó la necesidad de **fortalecer la gobernanza de aguas subterráneas**, fomentando la organización de Comunidades de Aguas Subterráneas en áreas de restricción, e implementar un **monitoreo hidrogeológico continuo** para controlar extracciones y recargas. También se identificó como prioridad **simplificar la tramitación del PAS 158**, dado que procedimientos engorrosos y prolongados han retrasado proyectos clave. Pese a los obstáculos, la autoridad considera la RAA vital para la minería sostenible, por su potencial de **proteger ecosistemas frágiles (bofedales altoandinos), prevenir la intrusión salina en acuíferos costeros, y facilitar la reutilización de aguas residuales o desaladas** en zonas mineras áridas.

Aporte específico que se cree obtener sirve para: **Orientar** **Avalar** **Complementar** **Definir** **Contrapropuesta** **Otros aportes**	Esta fuente aporta un fundamento normativo y estratégico de primer orden, útil para orientar y definir el marco del estado del arte en Chile. La exposición del regulador avala la importancia de la recarga artificial con datos oficiales y explica el procedimiento legal, complementando la investigación con la perspectiva gubernamental y los desafíos específicos (gobernanza de aguas subterráneas, trámites) en el sector minero y otras industrias.
Materiales más significantes: **Tablas** **Gráficos** **Ejemplos** **Fotografías** **Mapas** **Otros**	Contexto normativo actualizado

Recarga Artificial de Acuíferos en Chile

Marco Legal, Casos Mineros y Desafíos Nacionales

Resumen ejecutivo de investigaciones y documentos oficiales sobre la incorporación de la RAA en la gestión hídrica chilena y su aplicación en minería.

Claves del Marco Jurídico Actualizado

- **RAA reconocida legalmente** por el Código de Aguas (arts. 66 bis, ter y quáter).
- **PAS 158 obligatorio** para toda obra destinada a recarga artificial.
- **Protección de usos prioritarios**: evitar afectar agua potable o calidad del acuífero.
- **Aguas permitidas**: superficiales, subterráneas extraídas, tratadas o desalinizadas.

Estadísticas Nacionales

8
Solicitudes de RAA (2015–2023)

33%
Acuíferos con restricciones

16
Años consecutivos de sequía

25 L/s
Caudal de recarga en casos mineros

Desafíos Identificados por DGA

- **Fortalecer gobernanza** de aguas subterráneas.
- **Monitoreo** hidrogeológico continuo.
- **Simplificación** de la tramitación del PAS 158.
- **Transparencia** en datos de extracción y recarga.

Casos Mineros Relevantes

Cerro Colorado (Tarapacá)
Sistema de Recarga Artificial Lagunillas: reinyecta 25 L/s para mantener bofedal altoandino. PAS 158 aplicado.

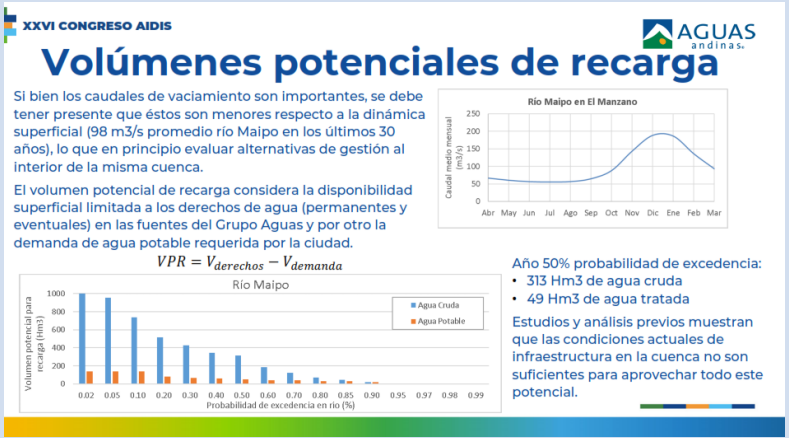
Minera Candelaria (Atacama)
Compromiso legal: inyectar 6,3 millones m^3 en 15 años (25 L/s). Restituye flujo al Río Copiapó.

Cerro Negro (Valparaíso)
Barrera hidráulica con posible inyección de aguas tratadas. DGA exige PAS 158 en el EIA.

Rol Estratégico de la RAA

- **Mitigación minera**: compensación por extracción.
- **Protección de ecosistemas**: bofedales y ríos.
- **Control** de intrusión salina.
- **Reutilización** de aguas tratadas y desalinizadas.

	TIPO de lectura (fundamental, específica, complemento)
Referencia bibliográfica o Dirección web completa:	https://www.aguasandinas.cl/web/aguasandinas/noticias/-/asset_publisher/mv8Gi69FCubE/content/aguas-andinas-lanza-pionero-proyecto-de-recarga-artificial-del-acu%25C3%25ADfero-que-almacenar%25C3%25A1-el-equivalente-al-consumo-mensual-de-agua-potable-de-47-mil-hogares
Palabras claves:	Proyecto “Recarga Mapocho Alto”; sector Los Trapenses (Lo Barnechea); aguas potables tratadas; seguridad hídrica urbana; empresa sanitaria (privada)
Conceptos y/o Ideas fundamentales: **1.“Citas textuales”** 3. **Redacciones propias**	5. Primer sistema de recarga plenamente autorizado: “Después de 5 años de trabajo, el 25 de marzo de 2025 el proyecto Recarga Trapenses consiguió la autorización por parte de la DGA, constituyéndose así en el primer sistema de infiltración de acuíferos que cuenta con permisos de infiltración y extracción” . Redacción propia: Este proyecto, desarrollado por la sanitaria Aguas Andinas en coordinación con el Ministerio de Obras Públicas, es el primero en Chile en obtener autorización oficial para inyectar agua en un acuífero y luego extraerla. Marca un precedente regulatorio que allana el camino para futuros proyectos de recarga gestionada (MAR) a gran escala. 6. Objetivo y magnitud del proyecto Mapocho Alto: El sistema innovador “busca fortalecer la seguridad del suministro de agua potable para más de 8 millones de personas... mediante la reserva de agua en el subsuelo en tiempos de mayor disponibilidad, buscando... mayor independencia de las aguas superficiales” . Con una capacidad de recarga en pozos de ~60 L/s, se espera inyectar más de 950 millones de litros anuales (0,95 Hm³/año) al acuífero, “el equivalente al consumo de agua de un mes de 47 mil hogares” . Redacción propia: En términos prácticos, durante períodos de abundancia (lluvias o deshielos) el proyecto deriva agua tratada de la planta La Dehesa hacia pozos en el sector Las Hualtatas, almacenándola bajo tierra para uso en épocas de sequía. Esta iniciativa de “agua para tiempos de escasez” evidencia cómo la colaboración público-privada (empresa estatal-regulada y autoridades) puede implementar exitosamente soluciones basadas en la naturaleza para reforzar el abastecimiento urbano frente al cambio climático.

Aporte específico que se cree obtener sirve para: **Orientar** **Avalar** **Complementar** **Definir** **Contrapropuesta** **Otros aportes**	Este caso emblemático avala la puesta en práctica de la recarga artificial a gran escala en Chile, complementando la investigación con detalles técnicos (caudales, volúmenes) y evidencias de éxito. Asimismo, orienta sobre mejores prácticas, al servir de modelo reproducible para futuras iniciativas (públicas y privadas) de MAR, y avala la eficacia de la recarga para mejorar la resiliencia hídrica de ciudades y sectores productivos bajo estrés hídrico
Materiales más significantes: **Tablas** **Gráficos** **Ejemplos** **Fotografías** **Mapas** **Otros**	Presentación caso estudio con datos de volúmenes a recargar 

	TIPO de lectura (fundamental, específica, complemento)
Referencia bibliográfica o Dirección web completa:	https://minerialocal.cl/actualidad/el-gran-desafio-recargar-acuiferos-con-agua-desalada/

Palabras claves:	Desalación y recarga; evolución normativa; plantas desaladoras en Chile; proyectos piloto (Mapocho Alto, Canalistas Maipo); barreras administrativas
Conceptos y/o Ideas fundamentales: **1.“Citas textuales”** 2. **Redacciones propias**	1. Integración de agua desalada en la RAA: “Gracias a la evolución normativa impulsada por la DGA, ahora es posible infiltrar agua desalinizada y residuos líquidos tratados. Este avance representa un hito crucial, especialmente si consideramos que la desalinización se ha consolidado como una fuente hídrica clave en Chile, con 23 plantas operativas y 12 proyectos en desarrollo”. Redacción propia: A partir de 2022, la ley chilena permite que la recarga artificial utilice agua de mar desalinizada u otras fuentes no convencionales. Dado el rápido aumento de capacidad de desalación en el país, resulta lógico y necesario combinar la infraestructura desaladora con proyectos de recarga para almacenar el excedente de agua desalada y asegurar el abastecimiento futuro. 2. Desafíos para masificar la recarga: “No obstante, el principal obstáculo para la expansión de estas vitales iniciativas radica en la excesiva tramitación administrativa. Esta burocracia ralentiza su implementación y frena el avance. Simplificar estos procesos es una prioridad ineludible si buscamos un impacto real en plazos razonables”. Redacción propia: Si bien la recarga de acuíferos se vislumbra como estrategia imprescindible para fortalecer la resiliencia hídrica del país, el sector privado subraya que la burocracia y la demora en permisos constituyen un freno considerable. La adopción de tecnologías de monitoreo en tiempo real y el aprovechamiento de infraestructuras existentes también se mencionan como vías para mejorar la eficiencia y garantizar la calidad del agua recargada
Aporte específico que se cree obtener sirve para: **Orientar** **Avalar** **Complementar** **Definir** **Contrapropuesta** **Otros aportes**	Esta fuente complementa la investigación con una perspectiva de la industria minera/privada. Aporta orientación sobre oportunidades innovadoras (vincular la desalinización con la recarga) y avala la necesidad de ajustes administrativos, reforzando el argumento de que, para el caso chileno, es crucial simplificar la tramitación y adoptar nuevas tecnologías. Funciona como contrapunto propositivo, resaltando soluciones y condiciones necesarias para que la recarga artificial se masifique efectivamente frente a la crisis hídrica. Este documento **orienta y define** el marco jurídico y comparado de la RAA en Chile. Proporciona un **aval conceptual y legal**, al destacar que la RAA es viable y ya adoptada con éxito en otros países, y al detallar los requisitos normativos chilenos (como el PAS 158) que deben cumplir los proyectos mineros que incorporan recarga artificial. En consecuencia, **complementa** la investigación ofreciendo un trasfondo legal y ejemplos internacionales que **orientan** la correcta evaluación ambiental de la RAA en Chile.

Materiales más significantes: **Tablas** **Gráficos** **Ejemplos** **Fotografías** **Mapas** **Otros**	Aporta datos específicos un marco general que adiciona fuentes para ejecutar recargas artificiales que antes no estaban incorporadas en los cuerpos normativos, siendo esto una traba para su implementación y posterior ejecución. Adicionalmente, las características específicas para ejecutar MAR con fuente de agua desalinizada se describen en CIRCULAR-DGA-N°-2-2025 donde se detallan específicamente los parámetros químicos a considerar, los respectivos umbrales y monitoreo de seguimiento, lo cual aportara un marco reglamentario claro para este tipo de desarrollos.

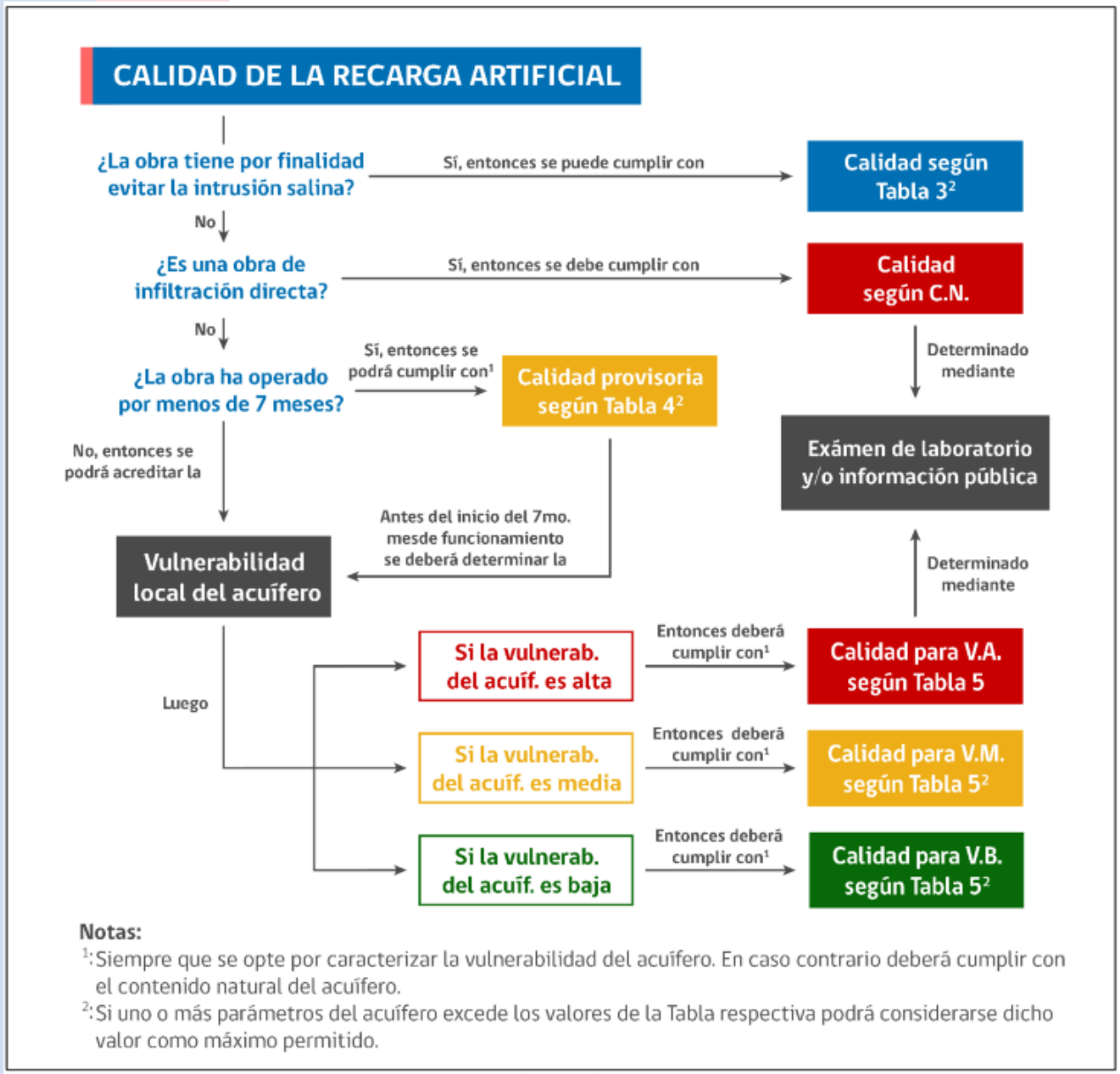


Figura 1: Diagrama de calidades a inyectar según propósito, tipo y fase de una obra de recarga artificial. Fuente: Elaboración propia.

	TIPO de lectura (fundamental, específica, complemento)
Referencia bibliográfica o Dirección web completa:	https://repositoriodirplan.mop.gob.cl/biblioteca/items/19806b9e-4f2e-45c7-9257-a6bb6deb4789
Palabras claves:	Recarga artificial de acuíferos; Aguas subterráneas; Gestión hídrica; Código de Aguas (Chile 2005); Proyectos piloto; Infiltración; Regulación ambiental; Dirección General de Aguas (DGA); Comisión Nacional de Riego (CNR); Dirección de Obras Hidráulicas (DOH).
Conceptos y/o Ideas fundamentales: **1.“Citas textuales”** 2. **Redacciones propias**	**Definición y objetivos de la recarga artificial:** La *recarga artificial de acuíferos* se define como **“cualquier acción antrópica destinada a incrementar la tasa de infiltración natural sobre un acuífero con el objeto de aprovechar la capacidad de regulación natural de éste para su aprovechamiento en un tiempo posterior o bien para reducir el nivel de sobreexplotación de largo plazo”**. En otras palabras, consiste en intervenir deliberadamente el ciclo hidrológico para almacenar excedentes de agua en las capas subterráneas (acuíferos) con fines posteriores de aprovechamiento o para mitigar problemas como la sobreexplotación de las aguas subterráneas. Los *principales objetivos* de la recarga artificial incluyen aumentar la disponibilidad de recursos hídricos al **almacenar aguas superficiales excedentes en acuíferos**, evitando pérdidas por evaporación, **transferir agua entre zonas a través del subsuelo** usando el acuífero como medio de transporte natural, y **mitigar problemas hidrogeológicos** (por ejemplo, frenar la sobreexplotación de acuíferos, controlar la intrusión salina en zonas costeras o evitar subsidencia). [DGA_2013_a...cial_Chile | PDF] [DGA_2013_a...cial_Chile | PDF], [DGA_2013_a...cial_Chile | PDF] **Ventajas y condiciones requeridas:** Entre las **ventajas de la recarga artificial** de acuíferos se destaca la posibilidad de **reducir el descenso de los niveles freáticos causado por el sobrebombeo**, prolongando la vida útil de los pozos existentes, así como utilizar el acuífero **“como embalse regulador natural, favoreciendo la reducción de pérdidas por evaporación” y permitiendo una disponibilidad más constante del agua a lo largo del tiempo**. Además, la recarga artificial puede servir para crear **barreras hidráulicas** contra la intrusión marina en acuíferos costeros o contra la propagación de contaminantes en aguas subterráneas. Para implementar con éxito un proyecto de recarga artificial **se requieren ciertas condiciones técnicas**: suelos y estratos **permeables para infiltrar**

eficientemente el agua hasta la napa, un acuífero con capacidad de almacenamiento y transmisión adecuada, y agua de recarga de calidad apropiada (libre de sedimentos en exceso y con química compatible con la del acuífero). También es necesario realizar estudios base detallados: análisis de disponibilidad de agua, caracterización hidrogeológica e hidroquímica, modelaciones numéricas, construcción y monitoreo de **proyectos piloto**, entre otros, para asegurar que la recarga artificial cumpla sus objetivos sin causar impactos negativos. [DGA_2013_a...cial_Chile | PDF] [DGA_2013_a...cial_Chile | PDF], [DGA_2013_a...cial_Chile | PDF]

 Métodos de recarga artificial (superficiales y profundos): Los métodos u obras de recarga artificial se clasifican en **dos grandes grupos: **obras **superficiales** y **obras profundas**. Las **obras superficiales** infiltran el agua desde la superficie, sea **dentro del cauce de un río** (por ejemplo, construcción de *diques o barreras transversales* que incrementan el tiempo de retención e infiltración del agua en ríos de cauce perdedor, escarificación del lecho para remover sedimentos finos y favorecer la infiltración, *zanjas filtrantes* o pequeñas barreras transversales en cauces temporales) o **fuera del cauce** (por ejemplo, *zanjas o canales de infiltración* paralelos a las curvas de nivel, *balsas o lagunas de infiltración* de poca profundidad donde el agua almacenada percola al subsuelo, *superficies de riego o campos de inundación* donde se aplica agua excedentaria para que infiltre, o *filtración inter-dunar* en valles entre dunas costeras para formar barreras contra la cuña salina). Por su parte, las **obras profundas o subterráneas** inyectan el agua directamente en profundidad, aplicables tanto a acuíferos libres profundos como confinados, mediante **pozos de inyección** (inyección de agua por gravedad o presión bajo el nivel freático), **sistemas combinados de pozos con zanjas o balsas** (infiltración mixta), **galerías filtrantes o pozos horizontales** (túneles o drenes subterráneos que captan/infiltran agua, inspirados en métodos tradicionales), **pozos con galerías radiales** (pozo vertical con ramificaciones horizontales para infiltración), uso de **formas kársticas (simas o dolinas)** como sumideros naturales, y **filtración inducida en cauces** (bombeo cercano para crear gradiente e inducir infiltración desde el lecho de un río). Cada método tiene aplicaciones y limitaciones específicas; por ejemplo, las obras superficiales suelen usarse en acuíferos libres, mientras que las profundas pueden inyectar incluso en acuíferos confinados. [DGA_2013_a...cial_Chile | PDF] [DGA_2013_a...cial_Chile | PDF], [DGA_2013_a...cial_Chile | PDF]

 Marco legal e institucional (Chile): El informe examina detalladamente la normativa chilena vigente hasta 2013 relacionada con la recarga artificial de acuíferos. La *reforma al Código de Aguas de 2005* incorporó por primera vez la figura de la recarga artificial, estableciendo que **"cualquier persona podrá ejecutar obras para la recarga artificial de acuíferos, teniendo por ello la preferencia para que se le constituya un derecho de aprovechamiento provisional sobre las aguas subterráneas derivadas de tales obras"** (Art. 66 del Código de

Aguas modificado). Esto significa que la ley chilena **permite y fomenta** las iniciativas de recarga, otorgando *derechos de aprovechamiento de agua subterránea provisionales* equivalentes al volumen infiltrado mientras la obra de recarga funcione. Sin embargo, dichos derechos provisionales **no pueden hacerse permanentes** mientras persista la recarga artificial, y su eventual transformación a definitivos está supeditada a condiciones estrictas (por ejemplo, mínimo 5 años de ejercicio sin causar perjuicios a terceros). Además, se destaca que para construir ciertas obras de recarga superficial se requieren permisos de la DGA (p. ej., modificar cauces, construir embalses mayores de 50.000 m³ o acueductos de gran capacidad). En cuanto al *marco ambiental*, aunque **los proyectos de recarga artificial no están explícitamente listados** en la Ley de Bases de Medio Ambiente como actividades de ingreso obligatorio al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), **podrían requerir evaluación ambiental** si involucran obras mayores (e.g. embalses, grandes modificaciones de cauces) o si se ubican en zonas protegidas. Asimismo, el **DS Nº46/2003** fija límites de calidad para descargas de **residuos líquidos a acuíferos**, lo cual aplica cuando se utilicen aguas tratadas para recarga, exigiendo que la calidad del efluente infiltrado no exceda los parámetros establecidos para proteger las aguas subterráneas. En resumen, el entorno regulatorio chileno **reconoce la recarga artificial** y define procedimientos para su autorización y control, pero al 2013 *aún estaba pendiente la publicación de reglamentos específicos* (como el "Reglamento de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas") necesarios para detallar las condiciones técnicas y administrativas de estas prácticas. [DGA_2013_a...cial_Chile | PDF] [DGA_2013_a...cial_Chile | PDF], [DGA_2013_a...cial_Chile | PDF]

- **Estudios y experiencias en Chile (2006–2013):** El documento recopila y sintetiza múltiples **iniciativas de recarga artificial de acuíferos financiadas por organismos del Estado chileno** (DGA, CNR, DOH, entre otros) hasta el año 2013, además de algunas iniciativas privadas, proporcionando un panorama amplio de la experiencia nacional en esta materia. En la **Dirección General de Aguas (DGA)** se destaca un estudio pionero en las cuencas de los ríos Choapa y Quilimarí (Región de Coquimbo), finalizado en 2012, que investigó la factibilidad de recarga artificial en esos acuíferos. La **Comisión Nacional de Riego (CNR)** impulsó varios proyectos entre 2012 y 2013 orientados al uso de la recarga para *mejorar la disponibilidad de aguas subterráneas para riego*: por ejemplo, estudios de factibilidad en la cuenca del río Copiapó (Atacama), en los valles de **Ligua-Petorca** (Valparaíso), y un diagnóstico de zonas potenciales de recarga desde Arica hasta el Maule. La **Dirección de Obras Hidráulicas (DOH)** también desarrolló estudios en el **valle del Aconcagua** (Región de Valparaíso), evaluando la recarga con aguas excedentarias (*derechos eventuales*) del río Aconcagua y diseñando **proyectos piloto** para recargar los acuíferos de la Primera y Tercera Sección de ese valle (2012), cuyos ensayos continuaban en ejecución hacia 2013. Otras instituciones públicas han participado: el **Instituto Nacional de Hidráulica (INH)** trabajó en la caracterización de la cuenca del río San José

(Región de Arica y Parinacota, 2012–2014) con miras a implementar un programa de recarga artificial, y la **Universidad Católica del Norte** estudió (con un enfoque técnico, legal, económico y ambiental) la factibilidad de recarga de acuíferos en la provincia de Elqui, Región de Coquimbo. En el ámbito privado, la **Sociedad de Canal del Maipo (SCM)**, junto con la Universidad de Chile, desarrolló un proyecto piloto de recarga artificial en el **acuífero de Colina** (Región Metropolitana) en 2012, explorando métodos de infiltración en pozos para almacenar caudales del *canal Batuco* en un "embalse subterráneo". Asimismo, la SCM presentó en 2013 un proyecto de recarga para el **acuífero de Santiago**, con una planta piloto que combina balsas de infiltración e **inyección en pozos**, capaz de infiltrar hasta 70 L/s, ubicado en el sector **Fundo La Platina (Santiago)**. Estas experiencias, junto con otras tesis y estudios referenciados en el informe, demuestran un creciente interés por la recarga artificial en Chile, aunque **la implementación práctica ha sido limitada**. De hecho, a la fecha del informe, solo *unos pocos proyectos de recarga se encuentran en funcionamiento pleno* – por ejemplo, la recarga mediante lagunas de infiltración en el Dren Las Vegas (Río Aconcagua) para mejorar el agua captada por un sistema de drenaje subterráneo. [DGA_2013_a...cial_Chile | PDF] [DGA_2013_a...cial_Chile | PDF], [DGA_2013_a...cial_Chile | PDF]

- **Conclusiones y recomendaciones:** El informe concluye que, a pesar de haberse reconocido la importancia de la recarga artificial en la legislación desde 2005, **el progreso en su implementación ha sido lento**, con **tan solo proyectos piloto aislados tras 8 años**. No obstante, todos los estudios revisados aportan metodologías para identificar y priorizar sectores donde la recarga sería factible (según criterios hidrogeológicos, disponibilidad de aguas excedentes, etc.), lo que permitiría **"generalizar una metodología aplicable, al menos a escala de cuenca, para todo el país"**. Para impulsar esta técnica, la DGA resalta **la importancia de acelerar la normativa pendiente**: en particular, se espera la pronta publicación del *Reglamento de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas*, actualmente en trámite ante la Contraloría, ya que se considera **"fundamental para la agilización de la aplicación de esta técnica"**. Asimismo, se recomienda mejorar la recopilación y disponibilidad de información hidrogeológica (expedientes de pozos, datos de calidad de agua, etc.) en el sector público y privado, y **fomentar la realización de estudios hidrogeológicos y proyectos piloto** en acuíferos estratégicos antes de que enfrent(en) situaciones críticas de agotamiento. En resumen, el documento de la DGA sirve como *base técnica y referencial* para entender el estado de las iniciativas de recarga artificial en Chile, identificando logros, desafíos pendientes (tanto técnicos como legales) y pasos necesarios para consolidar la recarga artificial como herramienta de gestión hídrica en el país. [DGA_2013_a...cial_Chile | PDF], [DGA_2013_a...cial_Chile | PDF] [DGA_2013_a...cial_Chile | PDF]

Aporte específico que se cree obtener sirve para:

Orientar

Avalar

Complementar

Definir

Contrapropuesta

Otros aportes

Este documento **orienta** en el tema de recarga artificial de acuíferos a nivel nacional, proporcionando un **marco conceptual** (definiciones, objetivos, métodos y condiciones técnicas) y un **estado del arte actualizado** de las iniciativas desarrolladas en Chile hasta 2013. También **avala** y **complementa** proyectos o propuestas técnicas, al recopilar información oficial y resultados de estudios piloto y antecedentes legales que pueden **definir** criterios de diseño y regulación. No se presenta como una **contrapropuesta** a políticas existentes, sino más bien como un insumo para respaldar decisiones y orientar nuevas acciones. **Otros aportes:** el informe identifica vacíos de información y necesidades de regulación, sirviendo de base para planificar futuros estudios y normativas sobre recarga artificia.

El cuadro a continuación se presentan criterios de evaluación ambiental que son considerados para evaluar la recarga

COMPONENTE	SECTOR 3	SECTOR 4	SECTOR 5
Biota Acuática	Sólo se tienen referencias bibliográficas de presencia de especies vulnerables en los sectores 3-A y 3-B	No se presenta curso de agua natural	
Vegetación Terrestre	Sector 3-B: Extencida distribución de formaciones xerofíticas, especialmente formaciones de alta valor ecológico	Sector 4-A: Extendida distribución de formaciones xerofíticas, especialmente formaciones de alta valor ecológico	
Fauna Terrestre	No se evidenciaron especies en categorías de conservación	No se evidenciaron especies en categorías de conservación	En el sector 5-B se encontraron especies endémicas de poblaciones reducidas (Philodryas chamissonis, Liolaemus atacamensis y Liolaemus platei)
Asentamientos Humanos y población	En el sector 3-A, la población solo se vería afectada por el movimiento de maquinaria durante la etapa de construcción	No se contempla población afectada	No se contempla población afectada
Arqueología	En los sectores de estudio no se estima alteración en el componente arqueológico debido a que no se evidenciaron hallazgos		

Tabla 2: Evaluación ambiental de alternativas

	TIPO de lectura (fundamental, específica, complemento)
Referencia bibliográfica o Dirección web completa:	Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) – DGA Tarapacá (2022). *Informe Técnico de Fiscalización Ambiental: Faena Minera Cerro Colorado* (Septiembre 2022, Extracto). Disponible en SNIFA/SMA (pp. 2-3, 8-9 del Informe).https://snifa.sma.gob.cl/General/Descargar/1104314425 https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2023/02/cerro-colorado-bhp-cierra-2023-buscando-solucion-problema-acuifero
Palabras claves:	Minera Cerro Colorado (BHP); Bofedal Lagunillas; Tarapacá; Sistema de Recarga Artificial (SRA); extracción e infiltración; caudales de compensación
Conceptos y/o Ideas fundamentales: **1.“Citas textuales”** 2. **Redacciones propias**	□ **Caso Cerro Colorado – Recarga para un bofedal altoandino:** *Compañía Minera Cerro Colorado* (BHP, Región de Tarapacá) **implementó un Sistema de Recarga Artificial (SRA) en el Bofedal Lagunillas** como medida de mitigación para contrarrestar los efectos de su extracción de agua subterránea en la Pampa del Tamarugal. Conforme a la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) N°13/2022, correspondiente al proyecto *“Continuidad Operacional Cerro Colorado”*, **la minera debe inyectar 25 litros por segundo de agua al acuífero de Lagunillas**. Este caudal proviene de dos pozos (P-3 y P-R) que extraen agua subterránea autorizada y la conducen hacia **pozas de infiltración** en el área del bofedal, con el objetivo de compensar el agua extraída por la mina. Las fiscalizaciones de la DGA y la SMA en 2021-2022 confirmaron que el SRA operaba de acuerdo a lo comprometido: ambos pozos aportaban conjuntamente ~25 L/s, salvo incidentes puntuales (por ejemplo, una detención temporal de un pozo fue suplida con el funcionamiento del otro para mantener la recarga). Esta reposición hídrica ha buscado **mantener un nivel freático adecuado en el humedal** y prevenir su desecación debido al bombeo minero intensivo. □ Permiso **ambiental y resultados:** La incorporación del SRA en el proyecto implicó gestionar el **Permiso Ambiental Sectorial 158** durante la evaluación ambiental, siendo *Cerro Colorado uno de los primeros proyectos mineros en Chile en tramitar formalmente el PAS 158* en el SEIA. La RCA 13/2022 de la Comisión de Evaluación de Tarapacá aprobó la continuación de la faena condicionada a esta medida. No obstante, *Cerro Colorado enfrentó dificultades hídrico-ambientales*: su prolongada extracción histórica agotó significativamente el acuífero de Lagunillas, y ante la imposibilidad de obtener nuevos derechos de

	agua, BHP **anunció el cese anticipado de las operaciones de la mina a fines de 2023**. Pese a ello, la empresa destaca que el SRA y un manejo adaptativo del bofedal **lograron frenar el deterioro ecológico**: se observó recuperación de la vegetación y un mejoramiento de las condiciones del humedal, sentando las bases para su regeneración natural a futuro. **Permiso ambiental y estado del proyecto:** La obligación de recarga del acuífero Lagunillas implicó tramitar el **PAS 158** durante la evaluación ambiental del proyecto de continuidad de Cerro Colorado. Este fue uno de los **primeros proyectos mineros en Chile en requerir formalmente el permiso de recarga artificial** dentro del SEIA. El SRA se diseñó como parte de las medidas de mitigación para la **RCA 13/2022**, otorgada por la Comisión de Evaluación de Tarapacá. Pese a estos esfuerzos, la minera enfrentó dificultades: el **sobreconsumo histórico de agua subterránea** en Lagunillas y la falta de autorización para nuevas extracciones forzaron a BHP a **cesar las operaciones de Cerro Colorado a fines de 2023**[1]. No obstante, la compañía subraya que el SRA y un manejo adaptativo del bofedal **permitieron recuperar la vegetación del humedal**, estableciendo condiciones para que en el futuro este ecosistema pueda sostenerse naturalmente.
Aporte específico que se cree obtener sirve para: **Orientar** **Avalar** **Complementar** **Definir** **Contrapropuesta** **Otros aportes**	Este caso **avala** la aplicación práctica de la RAA en una gran operación minera, proporcionando lecciones sobre su efectividad y sus límites. Sirve para **orientar** a otras faenas en la integración de recarga artificial en sus EIAs y RCAs como medida de compensación ecológica, especialmente para la **protección de ecosistemas sensibles (humedales altoandinos) impactados por la extracción minera de agua**. Asimismo, **complementa** la investigación al evidenciar la necesidad de un seguimiento riguroso (monitoreo de caudales, comités de expertos ambientales, etc.) y la importancia de contar con un marco regulatorio claro (PAS 158 y resoluciones) que asegure la implementación y continuidad de estas medidas de recarga durante la vida del proyecto.

Materiales más significantes:

Tablas

Gráficos

Ejemplos

Fotografías

Mapas

Otros

Datos cuantitativos (caudal de recarga 25 L/s; volúmenes infiltrados); Referencias a documentos oficiales (RCA 13/2022; informes de la SMA y DGA); Ejemplos visuales (ubicación del bofedal, diseño de las pozas de infiltración, fotografías del humedal en recuperación)

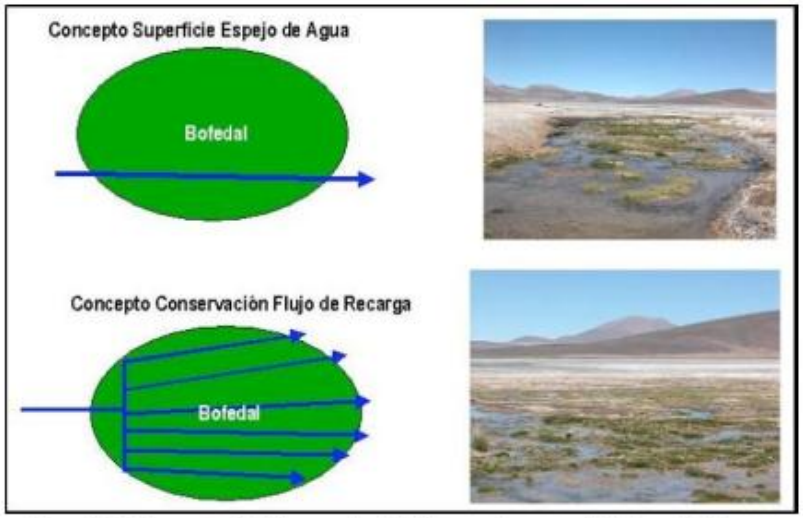


Figura 4-7: Conceptos histórico y actual del sistema de recarga hídrica artificial.

El diseño del SRA fue entregado a COREMA Tarapacá a través de la carta de CMCC N° 128/05 con fecha 28 Noviembre 2005. El cual requirió, en una primera etapa, la construcción de una línea de recarga tipo "peineta" que se construyó a partir de la línea única existente, estableciendo 17 puntos adicionales de descarga, llegando a un total de 18 puntos de recarga y 10,5 L/s que establecieron flujo superficial (canales) hacia el interior del bofedal. Los flujos puntuales en superficie generaron infiltración horizontal, humectando las áreas adyacentes.

La segunda fase se inició en noviembre de 2007, consistente en la optimización del SRA a través de la incorporación de nuevos puntos de descarga y aumentos de flujo de riego. La optimización del SRA ha sido fundamentada por la demanda hídrica del bofedal, la cual se considera desde los inicios del Plan de Manejo de la RE67/2011.

A través del monitoreo y la gestión adaptativa del SRA, se ha afinado en el tiempo el caudal requerido. CMCC ha realizado los estudios de evapotranspiración y actividad fotosintética, entre otros, cuyos resultados permiten afinar la estimación del requerimiento hídrico. La distribución y evolución del SRA se muestra en la siguiente Figura 4-8.

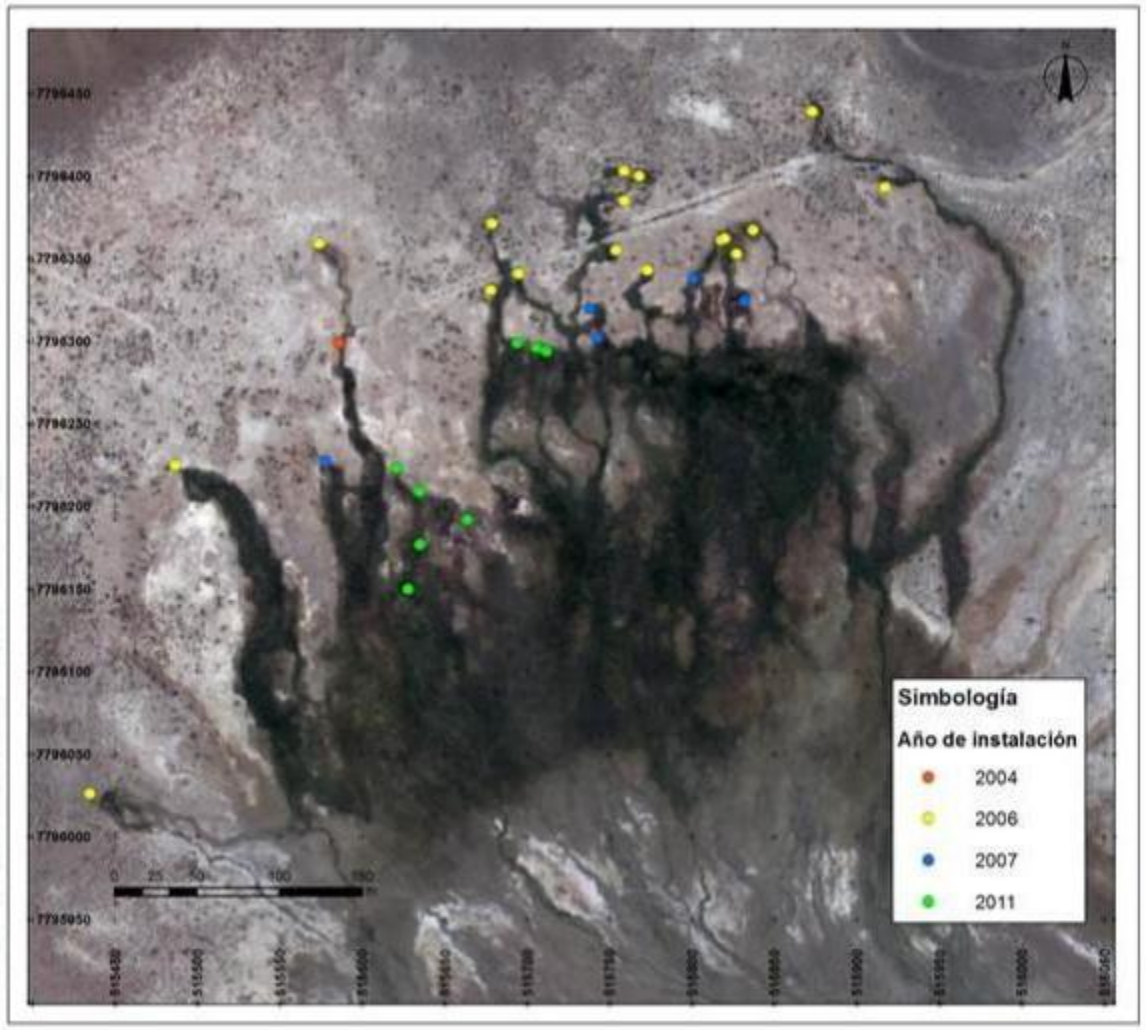
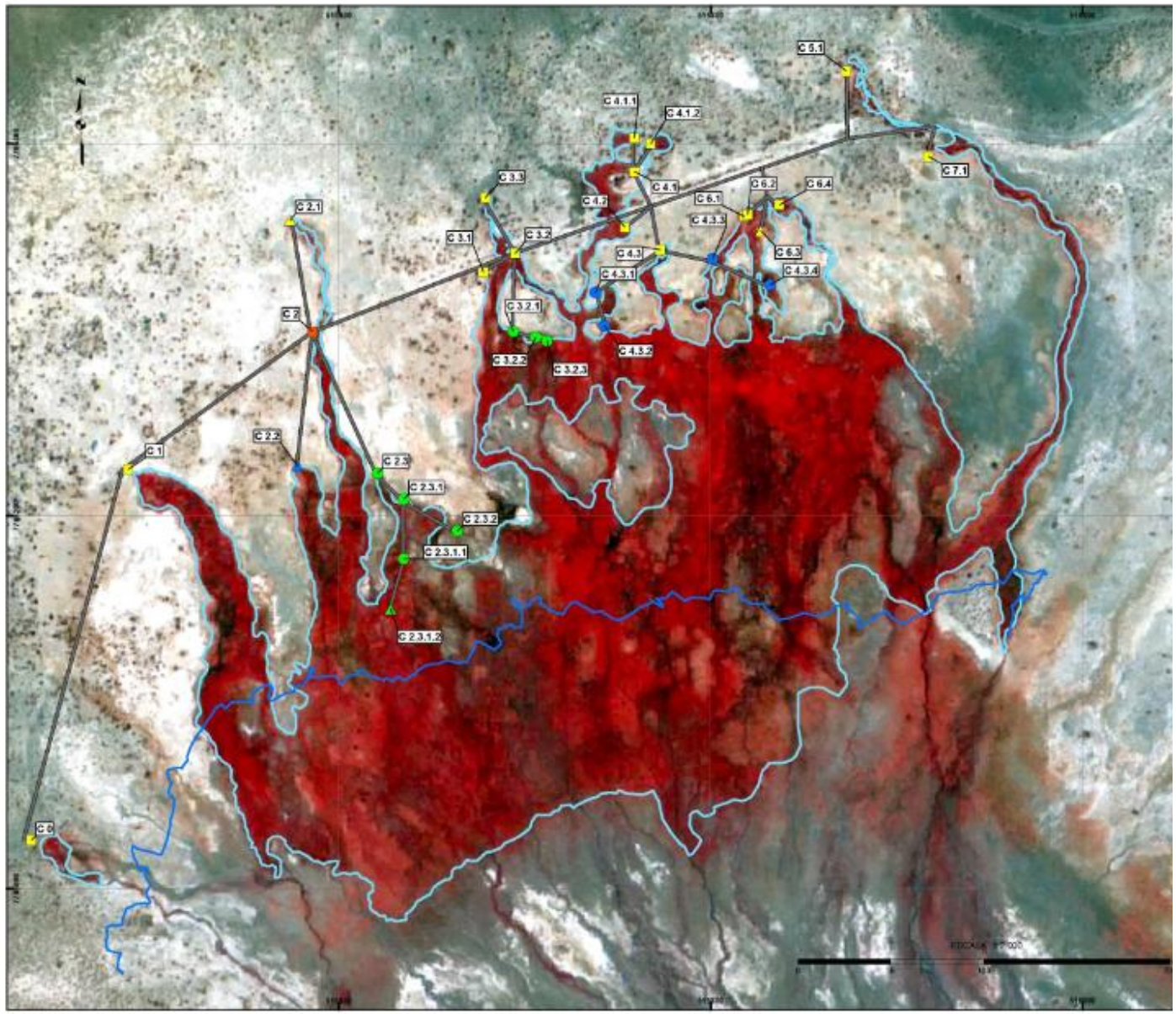


Figura 4-8: Distribución de los puntos de recarga del SRA.

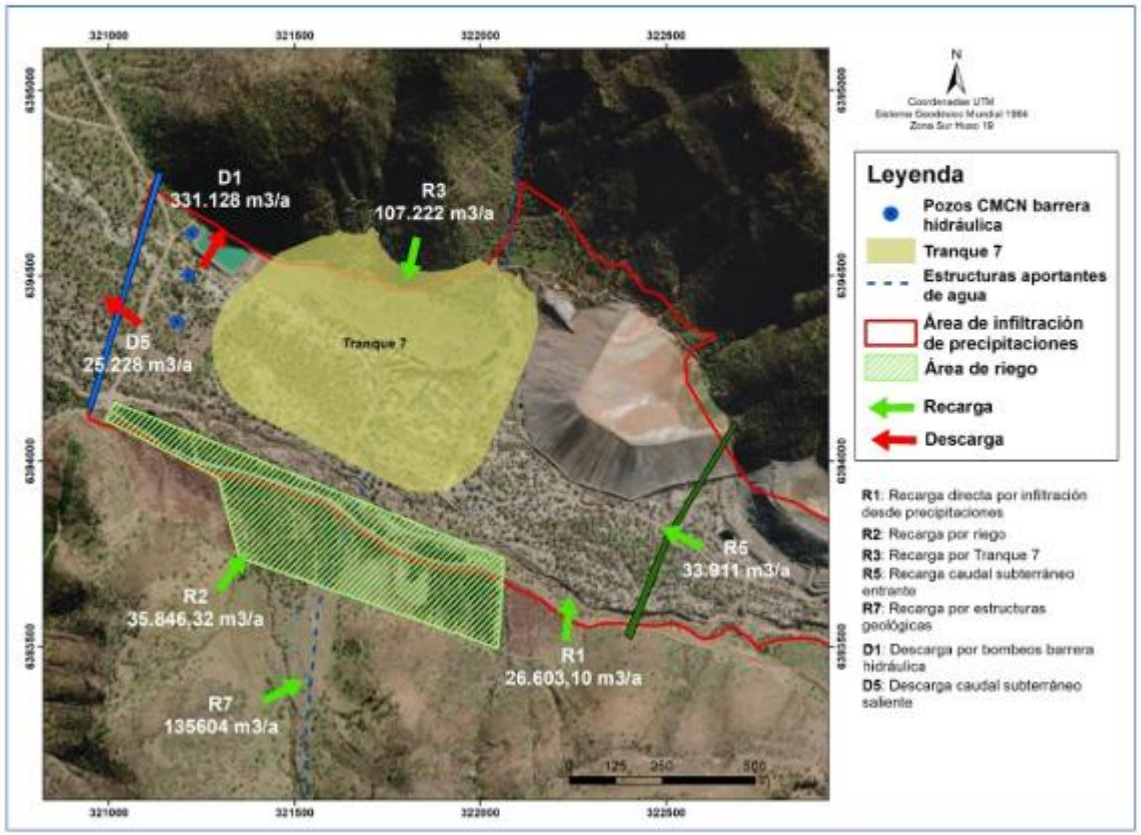

C 5.1
C 4.1.1
C 4.1.2
C 7.1
C 3.3
C 4.6
C 6.2
C 6.4
C 4.7
C 6.1
C 4.3.3
C 2.1
C 3.1
C 3.2
C 4.3
C 6.3
C 4.3.1
C 4.3.4
C 3.2.1
C 2
C 4.3.2
C 3.2.2
C 3.2.3
C 2.2
C 1
C 2.3
C 2.3.1
C 2.3.2
C 2.3.1.1
C 2.3.1.2
C 6

	TIPO de lectura (fundamental, específica, complemento)
Referencia bibliográfica o Dirección web completa:	
Palabras claves:	Minera Cerro Negro (Petorca, Valparaíso); proyecto de largo plazo; barrera hidráulica; tranque de relaves; infiltración vs extracción; permiso PAS 158
Conceptos y/o Ideas fundamentales: **1.“Citas textuales”** 4. **Redacciones propias**	1. **Proyecto Cerro Negro y barrera hidráulica:** La *Compañía Minera Cerro Negro S.A.* (Región de Valparaíso) sometió a evaluación un plan de ampliación de su faena que incluyó medidas para manejar posibles filtraciones contaminantes de sus nuevos depósitos de relaves. En su Estudio de Impacto Ambiental, el titular propuso una **“barrera hidráulica”** aguas abajo del nuevo Tranque de Relaves Nº7, consistente en pozos para extraer agua subterránea potencialmente afectada por infiltraciones de relaves, con la posibilidad de **tratarla y reinyectarla** en el mismo acuífero. La *Dirección Regional de Aguas (DGA)*, en su revisión, detectó una ambigüedad: “El proyecto… tiene por objetivo principal diseñar una infraestructura que **inyectará agua en el acuífero inmediatamente aguas abajo del Tranque de Relaves**”[2]. Por tanto, **solicita al titular aclarar si la barrera hidráulica implicará solo extracción (bombeo) de agua subterránea contaminada o si también se contempla la infiltración de aguas tratadas al acuífero**. En caso de optar por la recarga artificial, el titular deberá **presentar todos los contenidos técnicos y formales para obtener el PAS 158** dentro del SEIA. 2. **Permiso y estado de la tramitación:** Esta observación de la DGA evidencia que **el proyecto minero Cerro Negro debía incorporar el PAS 158 en su EIA al contemplar obras de recarga artificial como medida de mitigación**. El EIA (ingresado en 2019) pasó por rondas de consultas de las autoridades; la cita corresponde a un Oficio de observaciones en 2021, en el cual la DGA reitera la exigencia de clarificación del diseño de la barrera e indica formalmente la necesidad del PAS 158. Este ejemplo demuestra cómo **los proyectos mineros integran la recarga artificial principalmente cuando está ligada al manejo de contaminación de aguas subterráneas (p.ej., contención de filtraciones de efluentes mineros)**. La tramitación en Cerro Negro destaca la rigurosidad técnica requerida: se piden

[2] https://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSEA/MostrarDocumento?docId=77/ae/d02361bf8a783a071865ace4aadc141e09f3

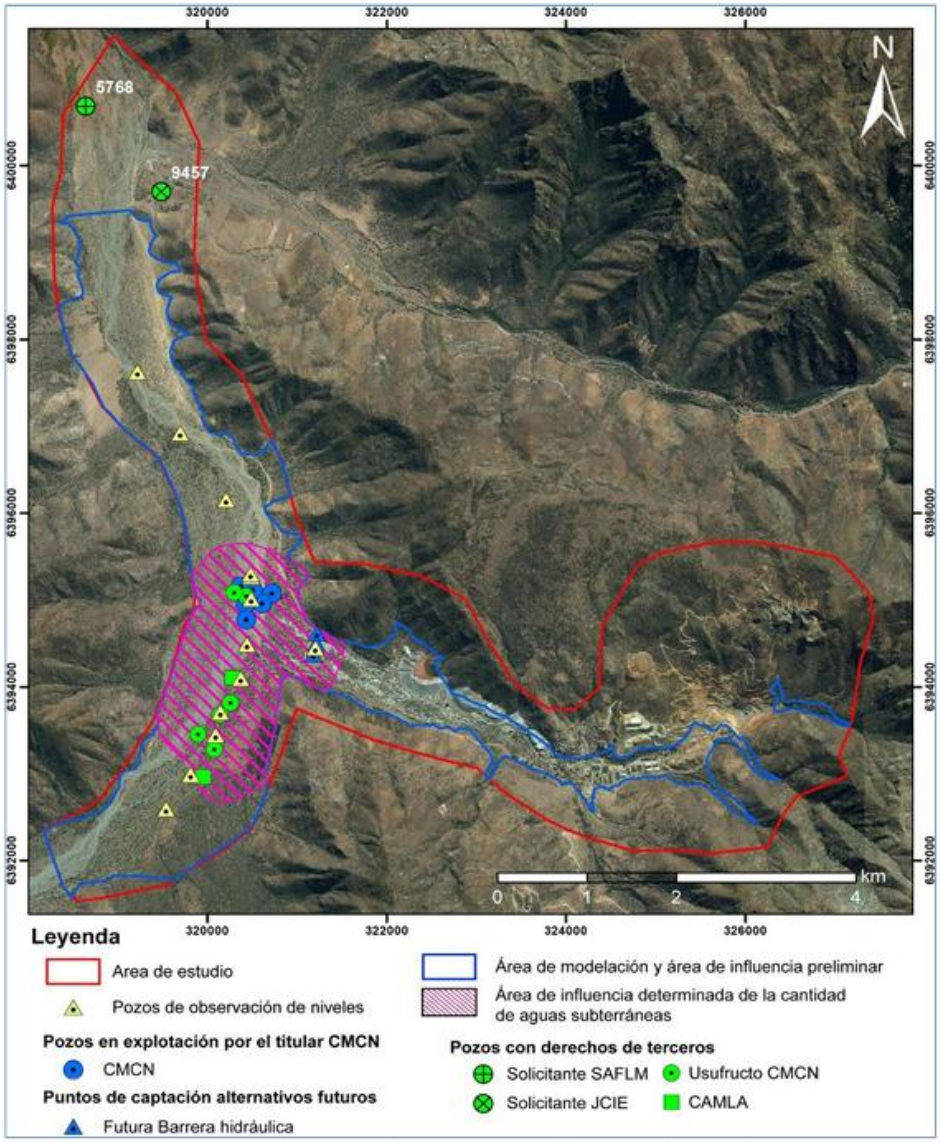
	detalles de los volúmenes a extraer e inyectar, modelos hidrogeológicos de flujo y transporte de contaminantes, y planes de seguimiento específicos para la recarga. El proyecto finalmente fue aprobado en 2021, con condiciones que incluían la correcta implementación de la barrera hidráulica y el cumplimiento del PAS 158 para cualquier inyección en el acuífero.
Aporte específico que se cree obtener sirve para: **Orientar** **Avalar** **Complementar** **Definir** **Contrapropuesta** **Otros aportes**	Esta ficha **avala y define** un caso concreto de **aplicación del PAS 158 en minería**: la DGA exige su cumplimiento cuando la recarga artificial se usa como medida de mitigación ambiental en un EIA minero. Sirve para **orientar** a otros proyectos mineros sobre la necesidad de identificar claramente si sus obras hidráulicas equivalen a recarga artificial, y **complementa** la investigación subrayando la importancia de la precisión técnica y legal en la planificación de RAA en contexto minero. Muestra cómo el PAS 158 no solo se aplica para proyectos dedicados a recarga hídrica, sino también en acciones dentro de proyectos mineros que involucren **infiltración de agua al subsuelo (ya sea para compensar extracciones o controlar contaminación)**.
Materiales más significantes: **Tablas** **Gráficos** **Ejemplos** **Fotografías** **Mapas** **Otros**	

Figura 93: Imagen de detalle con balance hídrico caso con PDLP Sector bajo de la Quebrada Pitipeumo (barrera hidráulica)



Fuente: Taypi 2021

Figura 94: Ubicación de los puntos con derechos de agua ubicados en las proximidades de CMCN



Fuente: Anexo 19.10. Evaluación de sustentabilidad hídrica, CMCN (Taypi 2022)

Figura 95: Pozos observación evaluación afectación de la cantidad de agua

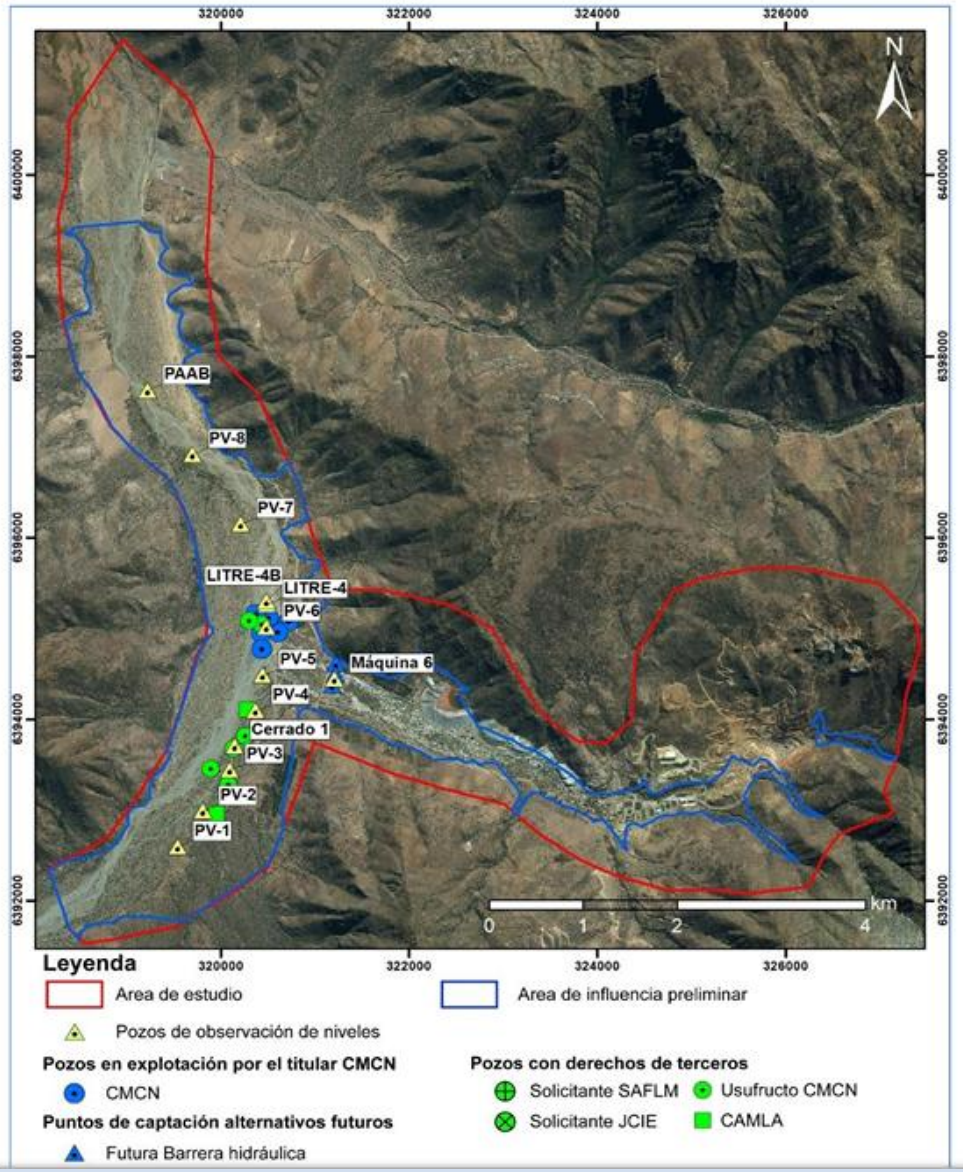
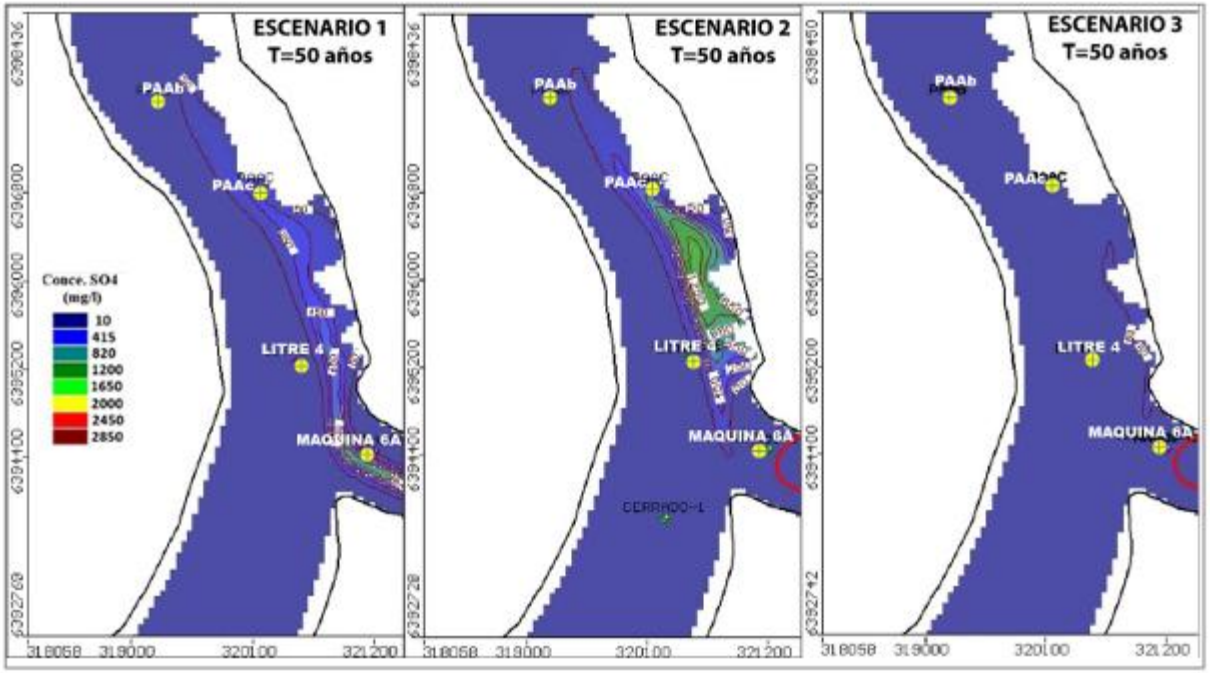


Tabla 157. Valores máximos de concentración en los pozos Litre 4, PAAb, PAAc y Máquina 6A en los tres escenarios simulados.

POZO	Quebrada	ESCENARIO 1 Caso Base sin PDLP		ESCENARIO 2 Con PDLP		ESCENARIO 3 Con PDLP y BH		UMBRAL [SO4] (mg/l)	LÍNEA BASE [SO4] (mg/l)
		[SO4] máxima (mg/l)	Tiempo (año)	[SO4] máxima (mg/l)	Tiempo (año)	SO4] máxima (mg/l)	Tiempo (año)		
Máquina 6A	Pitipeumo	868.0	29.8	1418.8	17.6	220.5	0.02	406.1	868.0
Litre 4	Guayacán	23,5	0,02	26,3	22,9	23,5	0,02	250	39.9
PAAb		23,5	0,02	28,0	58,7	23,5	0,02		
PAAc		338,4	73,3	1055,5	61,4	47,9	62,7		

Fuente: Anexo 19 "Actualización Modelo Hidrogeológico Conceptual y Numérico". Capítulo 3.6.3.

Figura 117: Pluma de sulfatos en el año 50 de simulación para los 3 escenarios.



Fuente: Anexo 19 "Actualización Modelo Hidrogeológico Conceptual y Numérico". Capítulo 3.6.3.

	TIPO de lectura (fundamental, específica, complemento)
Referencia bibliográfica o Dirección web completa:	https://snifa.sma.gob.cl/SeguimientoAmbiental/Ficha/1062180 https://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSEA/MostrarDocumento?docId=68/32/1d5ca612486ce4b1e1b6e600522f27bb963a#:~:text=Pampa%20del%20Tamarugal%20debido%20a%20la%20extracci%C3%B3n,el%20programa%20de%20la%20Oficina%20Regional%20de

	https://www.1ta.cl/en-el-marco-de-demanda-por-dano-ambiental-minera-maricunga-y-comunidad-indigena-colla-del-rio-jorquera-presentan-protocolo-de-acuerdo/
Palabras claves:	Medidas de reinyección, Recarga del acuífero, umbrales PAT, pozos de monitoreo ambiental, Recarga artificial de acuíferos; **Medida de Mitigación** (inyección en puquios); Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico (PSAH); **Plan de Alerta Temprana** (PAT); Acuíferos Salar de Llamara, Pampa del Tamarugal, Sur Viejo; Monitoreo hidrogeológico; **Tamarugos**; **Puquios de Llamara**.
Conceptos y/o Ideas fundamentales: **1.“Citas textuales”** 2. **edacciones propias**	**Descripción general del proyecto y PSAH:** Este informe corresponde al **seguimiento hidrogeológico semestral** de dos iniciativas integradas de *SQM* en la Región de Tarapacá (Pozo Almonte): el *Proyecto Pampa Hermosa* (expansión productiva de yodo/nitratos) y su componente de modificación de recarga artificial de agua en los puquios del Salar de Llamara. El Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico (**PSAH**) se diseñó para **monitorear sistemáticamente los acuíferos del Salar de Llamara, Sur Viejo y Pampa del Tamarugal**, de los cuales **se extrae agua subterránea para las operaciones mineras**. El PSAH tiene como objetivo principal **proteger los sistemas bióticos asociados al agua subterránea** en estas cuencas – particularmente los bosques de **Tamarugos** en la Pampa del Tamarugal y Salar de Llamara, y los **puquios** (manantiales lacustres) del Salar de Llamara – asegurando que los **niveles freáticos y la calidad del agua** se mantengan dentro de los rangos previstos en la evaluación ambiental del proyecto. Para ello, el PSAH contempla la **medición regular** de diversas variables: *niveles de agua subterránea y superficial, caudales y volúmenes de bombeo*, además de la **calidad física-química del agua** (p. ej., conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, concentraciones iónicas) tanto en pozos como en cuerpos de agua superficiales. Un componente central es la **Medida de Mitigación** en los puquios de Llamara, que consiste en la **inyección controlada de agua subterránea** extraída en la parte norte del salar hacia el acuífero del sector de los puquios, con el fin de mantener los niveles de esos manantiales y su calidad química dentro de límites aceptables. Dicha medida de recarga artificial opera en conjunto con un **Plan de Alerta Temprana (PAT)**, que define umbrales predeterminados (de nivel freático y de calidad del agua) cuya superación gatillaría acciones de mitigación adicionales. El PSAH se ha actualizado recientemente (RCA 20239900145/2023) para **robustecer la red de monitoreo** – incorporando nuevos puntos de control y parámetros – y para unificar en un solo instrumento las obligaciones de seguimiento del proyecto original y de su modificación de recarga en Llamara. En total, **136 puntos de monitoreo** conforman la red actualizada, abarcando desde los pozos de extracción en el norte hasta los manantiales de la zona sur (Quebrada Amarga), e incluyendo **pozos de bombeo (extracción), pozos de observación, pozos de inyección, estaciones de medición en cauces superficiales (río Loa y Quebrada Amarga) y regletas en puquios**. [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF], [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF] [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF] **Principales resultados del monitoreo (enero–junio 2024):** Los datos recopilados muestran que las **variables hidrológicas se han mantenido dentro de los rangos previstos** en la evaluación ambiental, sin detectarse desviaciones significativas ni activación del PAT en el período analizado. En el **Salar de Llamara**, los pozos de observación cercanos al **área**

	de bombeo presentaron **descensos acumulados de nivel de agua subterránea del orden de 1 a 5 metros** en los ~10 años de operación, **coincidiendo con lo proyectado en el EIA**. Hacia zonas alejadas del bombeo, el **descenso es mucho menor** (decímetros o estable), evidenciando que el radio de influencia ha sido acotado. En los **puquios** del Salar de Llamara (a ~11 km del sector de bombeo), la **Medida de Mitigación de inyección de agua ha logrado mantener los niveles dentro de los rangos históricos**, con fluctuaciones estacionales normales (~20 cm entre verano e invierno) atribuibles a cambios en evaporación y a los ajustes estacionales de la inyección. Durante la suspensión temporal de la inyección (por medidas urgentes de la autoridad ambiental a fines de 2017), se observó una caída en los niveles de los puquios – particularmente en N3 y N4 – pero éstos se recuperaron una vez que se reanudó parcialmente la inyección en 2018. **No se han detectado cambios adversos en la calidad del agua de los puquios**: la conductividad eléctrica (CE), como indicador principal, **se ha mantenido dentro de los umbrales establecidos** (por ejemplo, ~20–52 mS/cm en puquio N1, ~78–206 mS/cm en puquio N2), y las concentraciones de sales disueltas no muestran incrementos sostenidos fuera de lo normal. En el **acuífero Sur Viejo**, que no tiene ecosistemas asociados, **no se evidencian filtraciones** desde las piscinas de evaporación de lixiviados ubicadas sobre él, ya que **los parámetros químicos en los pozos de monitoreo permanecen en los rangos históricos** y sin tendencias crecientes anómalas. Los niveles piezométricos en Sur Viejo muestran una **tendencia general estable**, con ligeras recuperaciones en pozos cercanos a los puntos de extracción que quedaron fuera de operación por la optimización del bombeo, y variaciones menores (del orden de centímetros) en los puntos alejados. En el **acuífero Pampa del Tamarugal**, los **bosques de tamarugo del sector Bellavista** no han sufrido impactos: los **niveles freáticos en los 17 pozos de control** se han mantenido cercanos a sus valores históricos, con **descensos muy leves (1–4 m) a lo largo de casi 20 años** debido principalmente a la extracción regional existente. Incluso en los pozos ubicados dentro y en los bordes del bosque de tamarugos (e.g., pozo B-03), **los niveles se mantienen estables o muestran ligeros aumentos recientes**, sin sobrepasar en ningún caso los **umbrales de alerta definidos en el PAT**. Los **caudales de bombeo** en todos los sectores se han mantenido bajo los límites autorizados: en el Salar de Llamara, el proyecto extrajo un máximo de ~124,7 L/s hasta 2023 (con una reducción programada al 77% de ese caudal a partir del año 2030); en el acuífero Pampa del Tamarugal se respetaron los escalones graduales de extracción aprobados (150 L/s hasta 2017, 249,5 L/s hasta 2021, y 321,6 L/s desde 2021 en adelante); y en Sur Viejo la extracción se mantuvo en ~64,5 L/s (adicional a 120 L/s previamente existentes) sin evidencias de sobrexplotación. En suma, *durante el primer semestre de 2024 no se activaron alarmas ni medidas adicionales*, ya que **los niveles, caudales y la calidad del agua observados se ajustaron a las previsiones del EIA y a las condiciones de las RCA vigentes**.

Aporte específico que se cree obtener sirve para: **Orientar** **Avalar** **Complementar** **Definir** **Contrapropuesta** **Otros aportes**	Este informe **avala con datos empíricos la eficacia de la recarga artificial** en un contexto minero, demostrando cómo la inyección controlada de agua subterránea puede mitigar los impactos del bombeo minero sobre humedales y vegetación protegida. Sirve para **complementar** la investigación del *estado del arte* con un **caso práctico y reciente** en Chile: entrega información detallada de la implementación real de un PSAH con recarga artificial en operación, incluyendo la infraestructura (pozos de inyección, red de monitoreo de 136 puntos), las metodologías de seguimiento y los resultados obtenidos tras años de funcionamiento. Asimismo, **orienta** sobre las mejores prácticas y lecciones aprendidas en la gestión hídrica minera: por ejemplo, la importancia de definir umbrales de alerta y de adaptar dinámicamente la recarga según las condiciones del acuífero (mediante la "regla operacional" y el PAT). También **avala** la robustez de la normativa chilena reciente (Artículo 66 bis del Código de Aguas, PAS 158, RCA específicas) al mostrar un caso exitoso de cumplimiento y eficacia de una medida de recarga artificial bajo supervisión de la autoridad ambiental. En conjunto, este documento técnico **provee evidencia concreta** para sustentar futuras iniciativas de recarga en minería, al demostrar que, con un monitoreo riguroso y un marco regulatorio claro, es posible mantener la estabilidad de los acuíferos y ecosistemas asociados, incluso en operaciones mineras de gran escala.
Materiales más significantes: **Tablas** **Gráficos** **Ejemplos** **Fotografías** **Mapas** **Otros**	El informe incluye extensas **tablas y gráficos** que detallan los datos de monitoreo y las condiciones hidrogeológicas: por ejemplo, **tablas de puntos de monitoreo** con coordenadas UTM y cotas de referencia por acuífero, **umbrales permitidos vs. observados** (p. ej., rangos de **conductividad eléctrica** en los puquios), y **volúmenes de agua inyectada vs. extraída**. También se presentan **gráficos de tendencias temporales** de niveles piezométricos, caudales de bombeo y de inyección, y concentraciones químicas en distintos puntos de control (ejemplos: Fig. 1-3 muestra la evolución del nivel freático en pozos cercanos y alejados al bombeo; Fig. 1-4 y 1-5 ilustran la historia de caudales inyectados y niveles en puquios, destacando la reducción y posterior reanudación de la inyección en 2017-2018). Fotografías de los **puquios de Llamara** y esquemas conceptuales de los acuíferos (Fig. 4-4, 4-5, 4-6, etc.) brindan contexto visual a las áreas de estudio. En síntesis, los materiales incluidos permiten verificar la implementación en terreno de la recarga artificial y sus efectos, respaldando con evidencia gráfica y numérica las conclusiones del informe.

Aspecto técnico clave	Descripción / Valores
Ubicación del proyecto	Región de Tarapacá, comuna de *Pozo Almonte* (Chile) [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF]. Áreas de extracción: acuíferos **Salar de Llamara**, **Sur Viejo** y **Pampa del Tamarugal** [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF]. Zonas protegidas: bosque de tamarugos (Pampa del Tamarugal) y puquios (manantiales) en el Salar de Llamara [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF].
Empresa / Titular	SQM S.A. – Vicepresidencia de Operaciones (Nitratos y Yodo), **Gerencia de Producción Nueva Victoria** (Región de Tarapacá) [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF], [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF].
Infraestructura de recarga artificial	*Medida de Mitigación:* **sistema de inyección de agua subterránea** al acuífero del Salar de Llamara mediante **pozos de inyección** en el sector de los puquios [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF], [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF]. El agua proviene de pozos de extracción ubicados ~11 km al norte (sector explotado), y se **inyecta en el subsuelo** para mantener el nivel y calidad de los puquios [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF], [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF]. El sistema cuenta inicialmente con **17 pozos de inyección** (aumentando a 37 previstos) [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF] y se controla mediante una **"regla operacional"** que ajusta los caudales de inyección según niveles y conductividad en los puquios [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF].
Autorizaciones de extracción de agua	- **Salar de Llamara:** 124,7 L/s totales aprobados (RCA 890/2010) [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF], escalonados en tres años (49 → 80 → 124,7 L/s). Reducción programada a **57,2 L/s** desde 2030 para sostener solo la inyección en puquios [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF]. - **Pampa del Tamarugal: 321,6 L/s** totales aprobados (escalones: 0 L/s años 1–2, 150 L/s años 3–6, 249,5 L/s años 7–10, **321,6 L/s** desde el año 11) [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF]. Extracción operacional iniciada en 2014, actualmente dentro del tercer escalón (≤321,6 L/s). - **Sur Viejo: 64,5 L/s** autorizados en RCA 890/2010 (adicionales a ~120 L/s de derechos previos) [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF]. Sin régimen escalonado; extracción real en torno a ese caudal, sin superar derechos históricos combinados (~185 L/s).

Variables monitoreadas	- **Niveles de agua subterránea** (piezométricos) en pozos de observación y de bombeo (profundidad de la napa) [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF]. - **Niveles de agua superficial** en puquios (mediante regletas) y caudales en cauces (quebradas/ríos) [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF], [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF]. - **Volúmenes y caudales de bombeo** en cada pozo de extracción (registro continuo / mensual) [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF], [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF]. - **Caudal y volumen inyectado** por los pozos de recarga (monitorización continua del flujo de inyección total y por pozo) [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF], [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF]. - **Calidad química del agua** (parámetros físico-químicos y químicos): Conductividad eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT) in situ, más muestreo semestral/trimestral de agua subterránea y superficial para análisis de laboratorio (iones mayoritarios: *sulfatos, cloruros, nitratos, etc.*, metales y otros indicadores) [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF], [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF].
N° de puntos de monitoreo	**136 puntos en total** (PSAH refundido 2023) [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF]: • 7 pozos de **bombeo** (extracción operativa) [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF] • 54 pozos de **observación** (monitoreo de niveles y calidad) [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF] • 37 pozos de **inyección** (17 existentes + 20 proyectados para la recarga) [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF] • 6 **regletas** en puquios (medición nivel superficial) [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF] • 3 puntos en tuberías de distribución de inyección (medición caudal/calidad) [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF] • 6 estaciones superficiales (2 en **Quebrada Amarga**, 4 en **río Loa**) para caudal y calidad aguas superficiales [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF].
Enfoque ambiental y medidas de mitigación	– **Recarga artificial** como medida de mitigación principal: inyección de **~25 L/s** permanentes (promedio) de agua subterránea para mantener el caudal de los puquios de Llamara, implementada desde 2011 (y reforzada tras 2018) [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF], [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF]. La recarga evita la desecación de los humedales (puquios) compensando el agua extraída para la operación minera. – **Plan de Alerta Temprana (PAT):** sistema de umbrales de nivel y calidad que, de ser excedidos, activan fases de alerta y acciones contingentes (p. ej., reducción de bombeo, aumento de inyección) [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF], [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF]. Durante este periodo no fue

necesario activar el PAT, ya que *no se registraron incumplimientos de los umbrales* [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF].
– **Protección ecosistémica:** El PSAH está orientado a resguardar el **bosque de tamarugos** en la Pampa del Tamarugal y los ecosistemas asociados a los **puquios**. Los datos de 2024 confirman que **no hubo impactos adversos significativos**: los niveles freáticos en el área de tamarugos de Bellavista se mantuvieron en rangos seguros, y los puquios conservaron **caudal y calidad adecuados**, preservando las comunidades biológicas que dependen de ellos [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF], [HIDRO.SQM8...stral N°27 | PDF].

Figura 5-3: Caudales de inyección en todos los pozos de la Medida de Mitigación

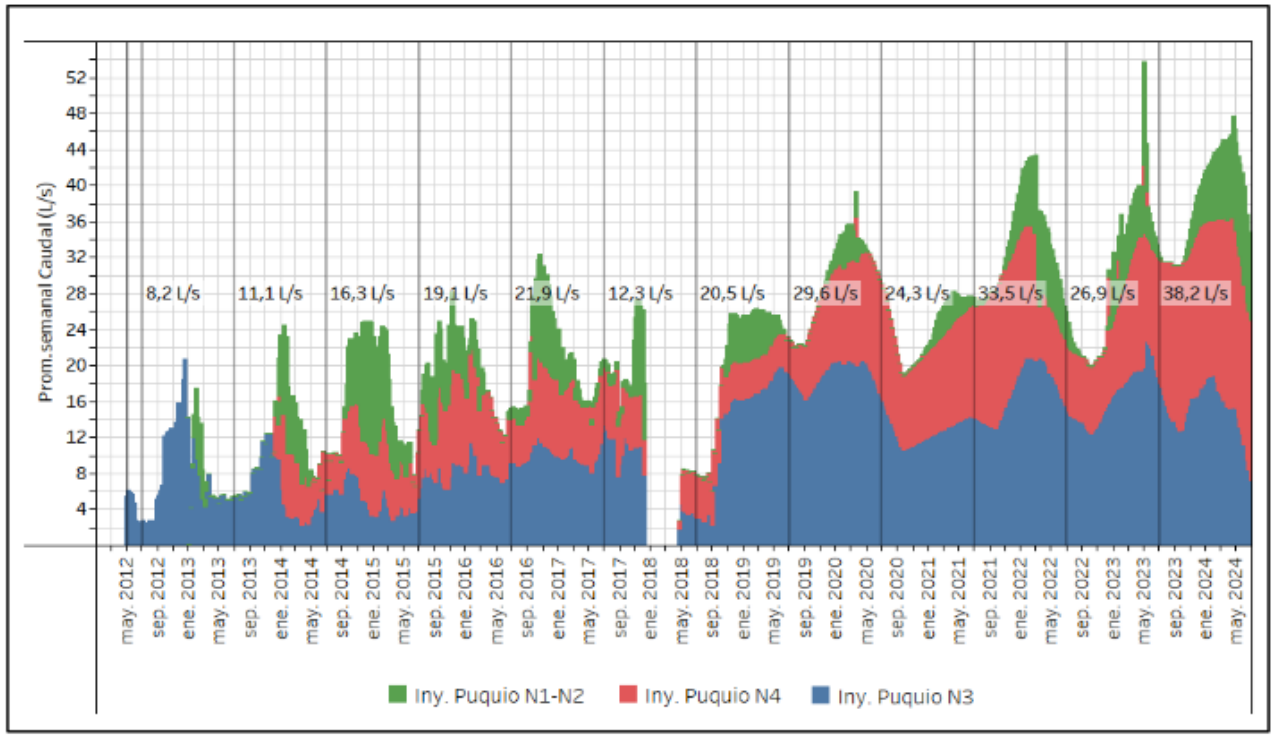


Figura 4-7: Puntos de monitoreo del PSAH en el Salar de Llamara, PSAH Pampa Hermosa y MPSR

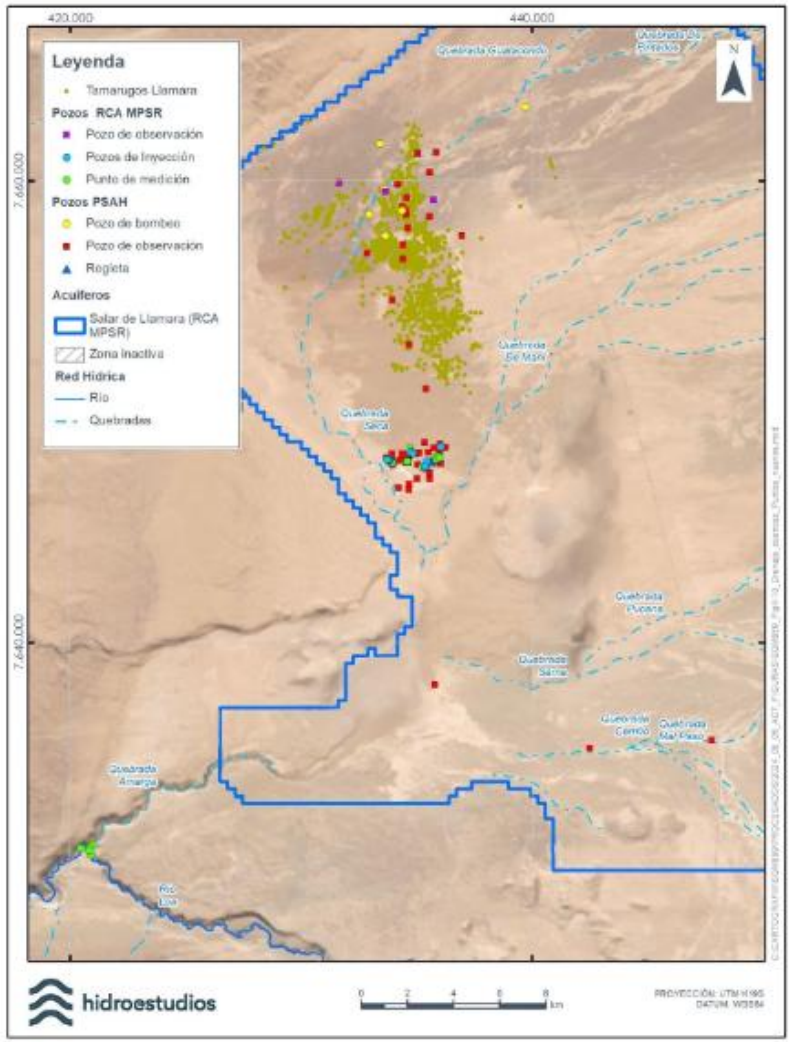


Figura 4-10: Puntos de monitoreo del PSAH Modificación Sistema de Reinyección puquios de Llamara

