

Medidas Vegetacionales Pedernales EST-01 y EST-02

Informe de Gestión Anual 2026

Apéndice 07 – Pluviometría e hidrogeología

Preparado para: Codelco Salvador

DSAEST_Anual26_Apendice07_Rev0

Santiago, 24 de junio 2026



Control del documento

REV	Fecha	Elaborado por	Revisado por	Aprobado por
A	14-05-2026	Dilan Campos Pablo Bustos	Jacques Wiertz	Jacques Wiertz
B	18-06-2026	Dilan Campos Daniela Gamboa	Mauricio Vera	Jacques Wiertz
C	24-06-2026	Dilan Campos	Mauricio Vera	Jacques Wiertz
0	24-06-2026	Dilan Campos		

Índice de Contenidos

1. Introducción.....	1
2. Objetivos	1
2.1 Objetivo general	1
2.2 Objetivos específicos	1
3. Materiales y Métodos	2
3.1 Definición de Área de Estudio	2
3.2 Revisión de antecedentes y levantamiento de información histórica	4
3.3 Análisis de datos	4
4. Resultados	8
4.1 Pluviometría	8
4.2 Hidrogeología.....	13
5. Discusiones	18
6. Conclusiones.....	20
7. Referencias	21

Índice de tablas

Tabla 1. Ubicación estaciones meteorológicas en la cuenca del Salar de Pedernales Coordenadas UTM.....	5
Tabla 2. Punteras ubicadas dentro de los polígonos de los sitios estudiados.	7
Tabla 3. Distribución de los sitios en cuencas.....	8
Tabla 4. Altitud referencial de los 13 sitios de estudio.....	9
Tabla 5. Precipitación media mensual de las estaciones meteorológicas del área de estudio.....	13

Índice de figuras

Figura 1. Área de Estudio Medidas EST-01 y EST-02.	3
Figura 2. Distribución de estaciones meteorológicas: Centro Salar, La Ola y Los Arroyos en Cuenca Salar de Pedernales.	6
Figura 3. Distribución de punteras en: Salar de Pedernales, La Ola y Leoncito.	7
Figura 4. Serie temporal de las precipitaciones mensuales (mm) medidos por la estación Centro Salar.	11
Figura 5. Serie temporal de las precipitaciones mensuales (mm) medidos por la estación La Ola.....	11
Figura 6. Serie temporal de las precipitaciones mensuales (mm) medidos por la estación Los Arroyos.	12

Figura 7. Series temporales de niveles freáticos medidos en punteras ubicadas en: La Ola (a); Leoncito (b); y Salar de Pedernales (c).	17
--	----

1. Introducción

La presente sección da cuenta de los antecedentes que caracterizan la pluviometría e hidrogeología del Proyecto “Medidas Vegetacionales Pedernales EST-01 y EST-02” (en adelante el Proyecto), en conformidad en lo establecido en el Avenimiento entre el Consejo del Estado de Chile y Codelco Salvador, aprobado por el Primer Tribunal de Antofagasta (causa ROL D-7-2020).

Este documento presenta la revisión y análisis de los antecedentes disponibles que permiten caracterizar las variables involucradas en el ciclo hidrológico, como la precipitación que permite entender de forma preliminar el comportamiento hídrico en el Área de Estudio. Por otro lado, la sección de hidrogeología tiene por objetivo caracterizar los recursos hídricos subterráneos para así interpretar el estado actual del sistema y la disponibilidad de agua en cada sector, considerando dos escalas espaciales distintas (regional y local) que dan cuenta de la geología, unidades hidrogeológicas, niveles de agua subterránea o freáticos y direcciones de flujo.

Los resultados incluyen el análisis de la información recopilada de datos históricos de fuentes de uso público para realizar la caracterización inicial, debido a que por razones externas a SMI Chile, no se ha podido realizar la instalación de punteras ni estaciones meteorológicas comprometidas en el Proyecto. En acuerdo con Codelco Salvador, se proyecta que esta actividad inicie en enero de 2027.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Caracterizar de manera integrada la dinámica pluviométrica e hidrogeológica de los 13 sectores del Área de Estudio, mediante el análisis comparativo de registros históricos, con el fin de cuantificar la variabilidad espacio-temporal del recurso hídrico y proporcionar el soporte técnico necesario para la validación de los modelos ecosistémicos y el cumplimiento de las medidas EST-01 y EST-02.

2.2 Objetivos específicos

- Analizar las series temporales de precipitaciones entre 2020 y 2025.
- Establecer la línea de base hidrogeológica y analizar las tendencias espacio-temporales de los niveles de aguas subterráneas, integrando registros históricos para identificar la variabilidad del sistema (tanto natural como por cambios en las zonas intervenidas por bombeo).
- Determinar la variabilidad del nivel freático y las direcciones de flujo local mediante la red de monitoreo de punteras presentes actualmente en el Área de Estudio.

3. Materiales y Métodos

Para conocer la dinámica del sistema en base a la caracterización hidrogeológica de los 13 sectores del Área de Estudio, y en consideración con la falta de datos *in situ* debido al atraso en la instalación de estaciones meteorológicas y punteras, a la espera de permisos, la metodología se estructuró en base a la sistematización y análisis crítico de información bibliográfica y de datos históricos para establecer el estado actual de los sitios. Las actividades principales incluyeron:

- Revisión bibliográfica: análisis de estudios regionales previos, cartografía geológica, de modelos hidrogeológicos existentes para definir las unidades hidrogeológicas (UHG) y el funcionamiento de la red de drenaje.
- Análisis hidrometeorológico: procesamiento de series históricas de precipitación provenientes de estaciones meteorológicas de la zona.
- Caracterización hidrodinámica histórica: evaluación de registros de niveles freáticos y caudales para identificar tendencias estacionales y variabilidad interanual del acuífero y su red de drenaje.

3.1 Definición de Área de Estudio

El Área de Estudio (AE) de la Medida EST-02 corresponde a los diferentes SVAHT ubicados en las inmediaciones del Salar de Pedernales y que se encuentran considerados en las acciones de compensación del Avenimiento y Transacción entre Codelco y el Consejo de Defensa del Estado. En específico, los SVAHT a monitorear comprenden en total una superficie de 175,18 ha, las cuales se distribuyen según el siguiente detalle de áreas (Figura 1):

- SVAHT activo del Salar de Pedernales con una superficie de 37,48 ha.
- SVAHT ubicados en cuencas cercanas los Salares La Laguna y Piedra Parada que en total representan 8,91 Ha.
- Las quebradas aledañas de agua dulce denominadas: Ciénaga, Pastos Largos, Río Negro, Tinajas, Tordillo, Vertiente 2, El Colorado y Cabecera sur río La Ola las cuales representan una superficie de 79,77 ha.
- Quebrada Leoncito con una superficie de 46,22 ha.
- Quebrada aledaña de agua dulce denominada “Quebrada Asiento” con 2,8 ha.

De las áreas monitoreadas, los salares de Pedernales, La Laguna y Piedra Parada se emplazan dentro del sitio prioritario para la conservación de la biodiversidad “Salar de Pedernales”, lo que refuerza la relevancia de su conservación debido a su alto valor estratégico por ser prioridad para la protección de la biodiversidad.

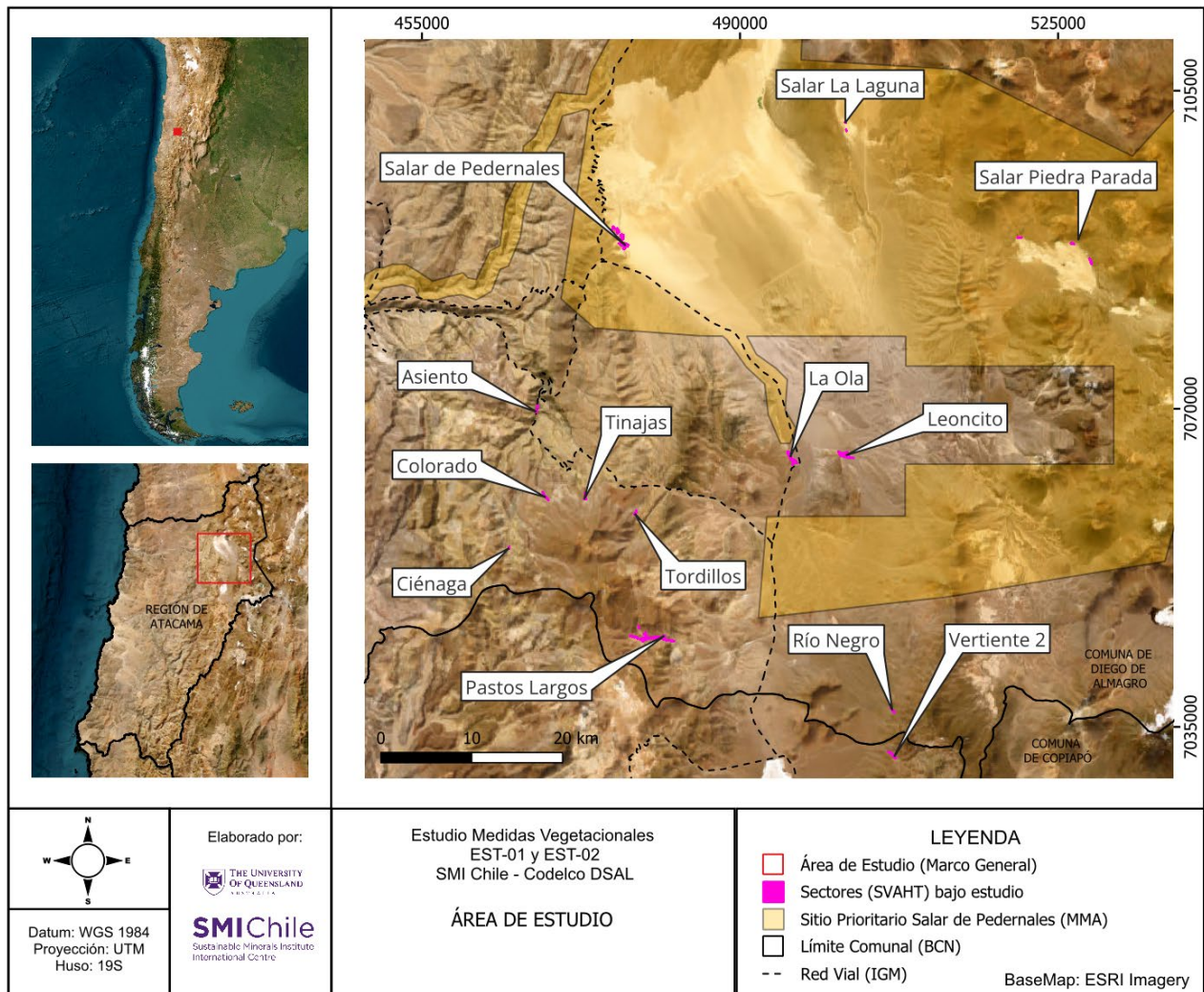


Figura 1. Área de Estudio Medidas EST-01 y EST-02.

3.2 Revisión de antecedentes y levantamiento de información histórica

Esta etapa tuvo como objetivo identificar y organizar la información técnica preexistente para establecer el estado del conocimiento actual de la zona. Se priorizó la obtención de datos crudos y registros históricos que sirvan de base para la caracterización pluviométrica e hidrogeológica de los 13 sectores de estudio. En específico, se revisó la información disponible relacionada con:

- Estudios ambientales y reportes técnicos (EIA, Adendas).
- Series de datos en fuentes públicas (DGA).
- Información técnica de Codelco (informes semestrales de monitoreo).

3.3 Análisis de datos

Para el análisis y procesamiento de datos se emplearon 2 esquemas de trabajo: análisis de información histórica (pluviometría y niveles freáticos) y análisis de información levantada en terreno (evapotranspiración y caudales).

En específico, para el análisis de información histórica se definió como ventana temporal el período comprendido entre el año 2020 y la actualidad. Esta acotación responde a un criterio metodológico fundamentado en la concurrencia de los compromisos ambientales que actualmente rigen la operación de Codelco División Salvador sobre la cuenca del Salar de Pedernales. En febrero de 2020 se obtuvo la Resolución de Calificación Ambiental N° 19/2020 del Proyecto Rajo Inca, que estableció el límite máximo de extracción de 860 l/s, el traslado del 50% de los derechos de aprovechamiento subterráneos a más de 5 km del actual campo de pozos del Llano Pajaritos y el Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario con sus respectivos valores umbrales piezométricos. A ello se sumó, a partir del 15 de enero de 2021, la entrada en vigor del Avenimiento y Transacción suscrito entre Codelco y el Consejo de Defensa del Estado, el cual incorporó medidas adicionales de restitución y liberación hídrica (entre ellas el restablecimiento de un caudal promedio mensual de 30 l/s aguas abajo del Tranque La Ola, en operación desde el 1 de abril de 2021) así como la complementación del Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario (PSAV) con 19 nuevos pozos y dos puntos de control adicionales. En consecuencia, el año 2020 marca el punto de inflexión a partir del cual se activan progresivamente las medidas de regulación del bombeo, restitución y liberación de agua que constituyen el objeto del presente análisis, de modo que la evaluación de la respuesta pluviométrica e hidrogeológica del sistema requiere centrarse en este período para caracterizar de manera consistente la trayectoria del recurso bajo la nueva configuración de gestión hídrica. Cabe precisar, asimismo, que la red de monitoreo considerada en este estudio corresponde a la infraestructura ya implementada en el marco de los instrumentos señalados, dado que la incorporación de punteras y estaciones meteorológicas adicionales se encuentra supeditada a la obtención de los permisos correspondientes por parte de Bienes Nacionales, gestión actualmente en trámite y que constituye una limitación documentada de la cobertura espacial del análisis.

3.3.1 Pluviometría

El análisis de la variabilidad de las precipitaciones en el área de estudio se realizó mediante el procesamiento de registros primarios obtenidos de la red de monitoreo administrada por Codelco y llevada a cabo por AGQ y Amphos21, siguiendo los pasos que se describen a continuación:

- Sistematización de datos: se recopilaron las series de tiempo de precipitación líquida para el período comprendido entre diciembre de 2020 y el último monitoreo llevado a cabo en

diciembre de 2025, asegurando la continuidad cronológica de los registros. El registro considera 3 estaciones meteorológicas: La Ola, Centro Salar y Los Arroyos, que, dependiendo del año, registraban datos cada 5, 15 y/o 60 min. La ubicación de las estaciones se detalla en la Tabla 1.

- Agregación temporal: los valores diarios se totalizaron mensualmente para construir la serie temporal, permitiendo visualizar la estacionalidad y la variabilidad interanual de los últimos años.
- Cálculo de la precipitación media anual: se determinó el acumulado anual. La precipitación anual media del periodo de estudio se obtuvo mediante la media aritmética de estos acumulados, expresada en milímetros por año (mm/año):

$$P_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$$

, donde P_i representa el acumulado del año i y n el número de años del periodo de análisis.

- Representación gráfica: se elaboraron series temporales de las precipitaciones.

Tabla 1. Ubicación estaciones meteorológicas en la cuenca del Salar de Pedernales Coordenadas UTM.

Estación meteorológica	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m s.n.m.)
La Ola	493579	7073180	3.550
Los Arroyos	501854	7054150	3.865
Centro Salar	490106	7095633	3.362

Fuente: Amphos 21 (2018a).

En la siguiente Figura 2 se observa además la distribución de estaciones meteorológicas en la cuenca del Salar de Pedernales, que actualmente están activas y sus datos son utilizados por la Compañía para realizar monitoreos.

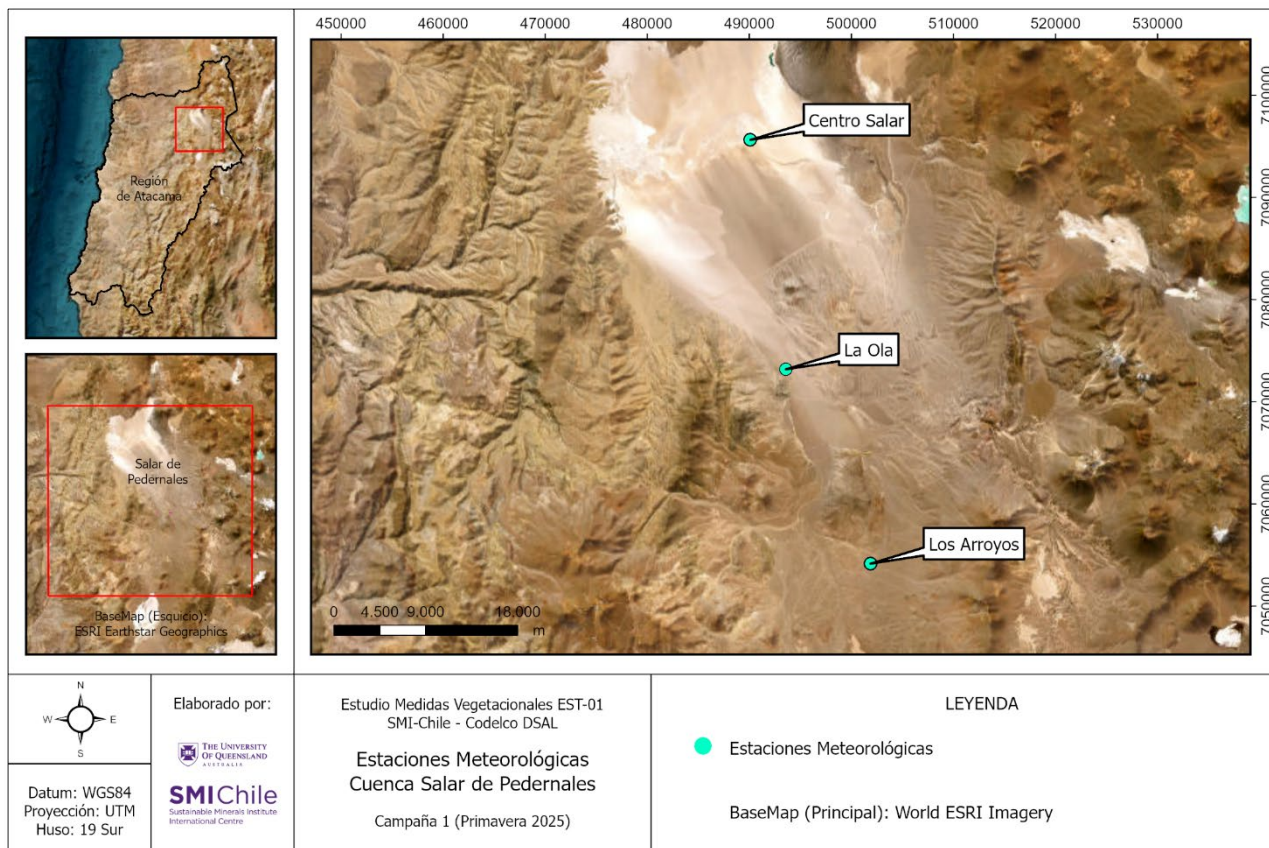


Figura 2. Distribución de estaciones meteorológicas: Centro Salar, La Ola y Los Arroyos en Cuenca Salar de Pedernales.

3.3.2 Niveles freáticos

De acuerdo con lo establecido en el Plan de Seguimiento y Alerta Temprana (PAT) de Aguas Subterráneas Sector Pedernales y los compromisos asociados al EIA Proyecto Rajo Inca, el seguimiento de los niveles freáticos se lleva a cabo mediante una red de monitoreo que incluye 18 punteras distribuidas estratégicamente dentro y en las cercanías de los sitios de estudio.

En cuanto a su representatividad espacial, se determinó que 6 de estas punteras se encuentran localizadas dentro de los polígonos originales definidos en el Avenimiento. No obstante, al aplicar el buffer de 100 metros, el número de punteras vinculadas a los sectores de interés aumenta a 11, las cuales se distribuyen específicamente en 3 de los 13 sitios monitoreados: Salar de Pedernales, La Ola y Leoncito. Para los sitios restantes comprendidos en el estudio, aún no se dispone de información sistematizada respecto a los niveles freáticos.

El análisis de niveles freáticos se llevó a cabo con la información disponible en la página del Avenimiento ([Biblioteca Documental - Codelco](#)). Específicamente, se tomó la información levantada por GP Consultores y de los reportes de Amphos21 y AGQ en el periodo dic-2020 a dic-2025, en base a la cual se elaboraron series temporales. La Tabla 2 detalla las punteras empleadas para el análisis y la distribución espacial en relación al Área de Estudio en el Proyecto, se puede observar en la Figura 2.

Tabla 2. Punteras ubicadas dentro de los polígonos de los sitios estudiados.

ID Puntera	Coordenada E	Coordenada N	Cota (m s.n.m.)	Sitio
PU-1	496.042	7.064.207	3.635	La Ola
PU-2	495.877	7.064.067	3.637	La Ola
PU-3	495.396	7.065.021	3.611	La Ola
PU-4	500.876	7.065.305	3.721	Leoncito
PU-5	502.477	7.064.577	3.740	Leoncito
PU-6	501.949	7.064.866	3.744	Leoncito
PU-31	477.255	7.088.087	3.357	Salar de Pedernales
PU-44	476.511	7.088.181	3.357	Salar de Pedernales
PU-45	476.775	7.089.102	3.356	Salar de Pedernales
PU-46	475.894	7.089.612	3.355	Salar de Pedernales
PU-48	477.596	7.088.149	3.357	Salar de Pedernales

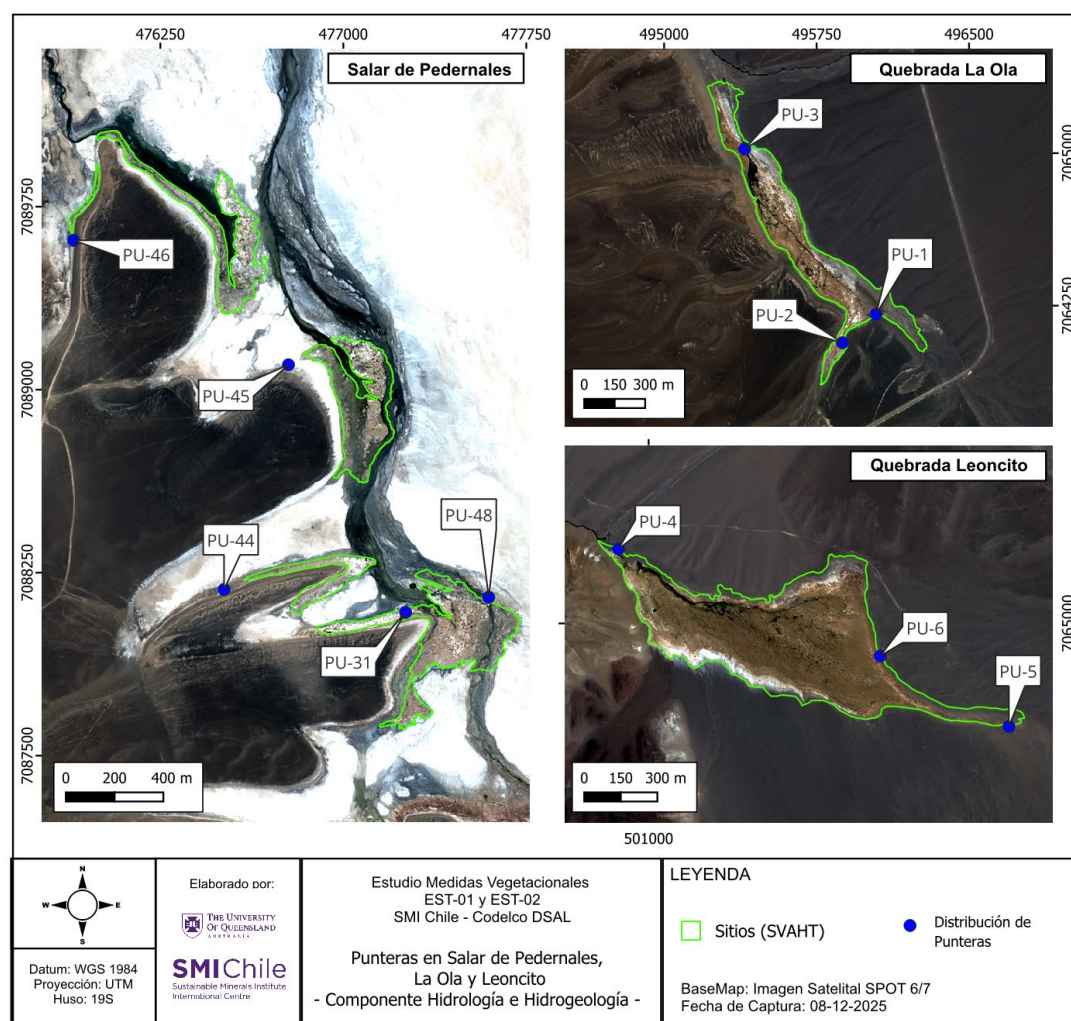


Figura 3. Distribución de punteras en: Salar de Pedernales, La Ola y Leoncito.

4. Resultados

4.1 Pluviometría

El área de estudio se emplaza en la Región de Atacama, en el sector altoandino de la comuna de Diego de Almagro, en un dominio fisiográfico correspondiente a la Puna seca, caracterizado por relieves volcánicos, cuencas cerradas con depósitos salinos como nivel base y una red de drenaje predominantemente intermitente y efímera. La caracterización hidrográfica de los 13 sitios asociados a EST-02 se realizó a partir de la cobertura oficial de cuencas hidrográficas de la Dirección General de Aguas [DGA] (2024), que organiza el territorio nacional en un sistema jerárquico de cuencas, subcuencas y subsubcuencas. Bajo este esquema, los 13 sitios se distribuyen en 2 cuencas, 3 subcuencas y 5 subsubcuencas, cuyo detalle se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Distribución de los sitios en cuencas.

Cuenca	Subcuenca	Subsubcuenca	Sitios
Endorreicas entre Frontera y Vertiente del Pacífico	Salar de Pedernales	Salar de Pedernales	- Salar de Pedernales - Salar La Laguna
		Río La Ola	- La Ola - Leoncito - Tordillos - Pastos Largos - Río Negro
		Salar Piedra Grande	- Salar Piedra Parada
	Salar de Maricunga	Campo de Piedra Pómez y Río Lamas	- Vertiente 2
	Río Salado Alto	Quebrada Potrerillos	- Asiento - Ciénaga - Colorado - Tinajas

El área de estudio se emplaza en un dominio climático correspondiente a un clima árido frío y de tundra de alta montaña, según la clasificación de Köppen-Geiger actualizada para Chile continental (Sarricolea, Herrera-Ossandon & Meseguer-Ruiz, 2017). En este dominio, a escala regional, la pluviometría está condicionada por dos factores: el marcado gradiente altitudinal y la influencia estacional del fenómeno conocido como invierno altiplánico o invierno boliviano (Garreaud, 2009).

El gradiente altitudinal de las precipitaciones en el flanco occidental de los Andes de Atacama es uno de los más pronunciados del país. De acuerdo con Houston (2006), la precipitación media anual aumenta progresivamente desde valores inferiores a 20 mm/año bajo los 2.300 m s.n.m. hasta alcanzar valores cercanos a 300 mm/año sobre los 5.000 m s.n.m. en las cumbres cordilleranas, gradiente que ha sido posteriormente verificado y aplicado al análisis del comportamiento hidrometeorológico regional (Vargas, Pérez & Aldunce, 2018).

Los diferentes sitios estudiados se ubican entre ~ 3.100 y 4.500 m s.n.m (Tabla 4), donde según Gestión Ambiental Consultores [GAC] (2018), se distinguen dos regímenes pluviométricos principales:

- Régimen Marginal de Altura (~ 2.000-3.500 m s.n.m.): precipitaciones escasas. En la cuenca Salar de Pedernales, las estaciones ubicadas en este rango altitudinal registran precipitaciones medias anuales del orden de 20-45 mm (El Salvador, 2.250 m s.n.m.: 20,7 mm/año; Potrerillos, 2.850 m s.n.m.: 44,0 mm/año, estos valores no consideran los eventos extremos de 2015 y 2017).
- Régimen Altoandino (> 3.500 m s.n.m.): corresponde a un clima de tundra de alta montaña, donde las precipitaciones anuales pueden alcanzar valores significativamente mayores en las cumbres más altas, predominando la precipitación sólida. En las cercanías de los sitios Salar de Pedernales (~ 3.370 m s.n.m.) y La Ola (~ 3.639 m s.n.m.), los registros pluviométricos disponibles indican una precipitación media anual del orden de 20,4 mm para el periodo de los últimos 6 años (calculado en base a datos de la estación La Ola), con un máximo de 68,6 mm/año (2022) y un mínimo de 4,2 mm/año (2023). Estos valores deben interpretarse con cautela dado que la serie de solo 6 años es insuficiente para establecer una media climatológica robusta en una zona caracterizada por una alta variabilidad interanual, donde un solo evento extremo puede duplicar o triplicar la precipitación media.

Tabla 4. Altitud referencial de los 13 sitios de estudio.

Sitio	Altitud referencial (m s.n.m.)
Salar de Pedernales	3.382
La Ola	3.639
Leoncito	3.709
Río Negro	4.244
Ciénaga	3.684
Colorado	3.873
Asiento	3.118
Salar La Laguna	3.502
Tinajas	3.904
Tordillo	3.977
Salar Piedra Parada	4.135
Pastos Largos	4.024
Vertiente 2	4.324

A escala regional, el “invierno altiplánico” (entre noviembre y marzo) constituye el principal mecanismo de aporte hídrico al sistema. Este fenómeno se origina por el desplazamiento estacional hacia el sur de la Alta de Bolivia, lo que favorece el ingreso en altura de masas de aire cálido y húmedo provenientes de la cuenca amazónica y del Atlántico tropical hacia el altiplano sudamericano, generando precipitaciones de tipo convectivo asociadas a tormentas vespertinas (Garreaud, 2009; Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia [CR2], 2020). Su influencia decrece progresivamente hacia el sur, alcanzando con menor intensidad y frecuencia las cuencas

altoandinas de la Región de Atacama, entre las que se encuentran las cuencas del Salar de Pedernales y del Salar de Maricunga (Houston, 2006).

Adicionalmente, el área se encuentra expuesta a eventos de precipitación extrema asociados a mecanismos meteorológicos distintos al invierno altiplánico, principalmente a la presencia de núcleos fríos en altura (*cutoff lows*) que, combinados con anomalías positivas de temperatura superficial del mar y flujos de humedad desde el Pacífico tropical, generan tormentas inusuales en sectores normalmente áridos. La alta variabilidad interanual, característica de los climas hiperáridos a semiáridos de altura, se ve acentuada por la modulación del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) y de la Oscilación de Madden-Julian (MJO), que condicionan tanto la intensidad del invierno altiplánico como la ocurrencia de eventos extremos de origen frontal o ciclónico (Houston, 2006; Wilcox et al., 2016; CR2, 2020).

A escala local, las estaciones meteorológicas con información de precipitaciones presentes en la zona son: Centro Salar (3.362 m s.n.m.), La Ola (3.550 m s.n.m.) y Los Arroyos (3.895 m s.n.m.). La Figura 4 y la Figura 5 muestra las series temporales entre diciembre de 2020 y diciembre de 2025 para el caso de las estaciones de Centro Salar y La Ola, respectivamente. Para el caso de la estación Los Arroyos la serie temporal abarca entre diciembre de 2020 y octubre de 2023 (Figura 6).

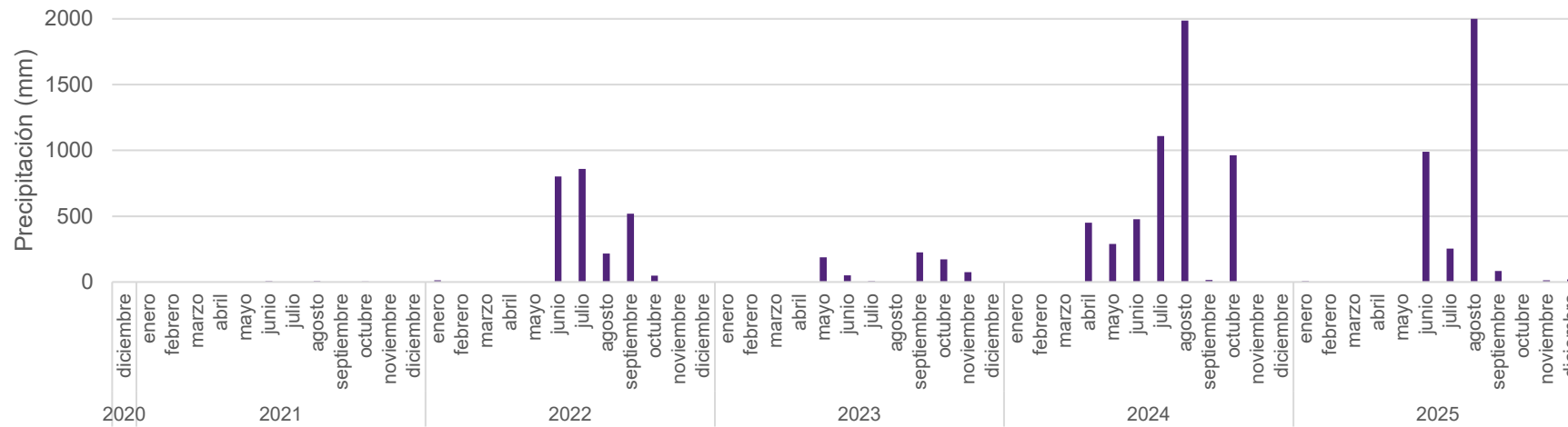


Figura 4. Serie temporal de las precipitaciones mensuales (mm) medidos por la estación Centro Salar.

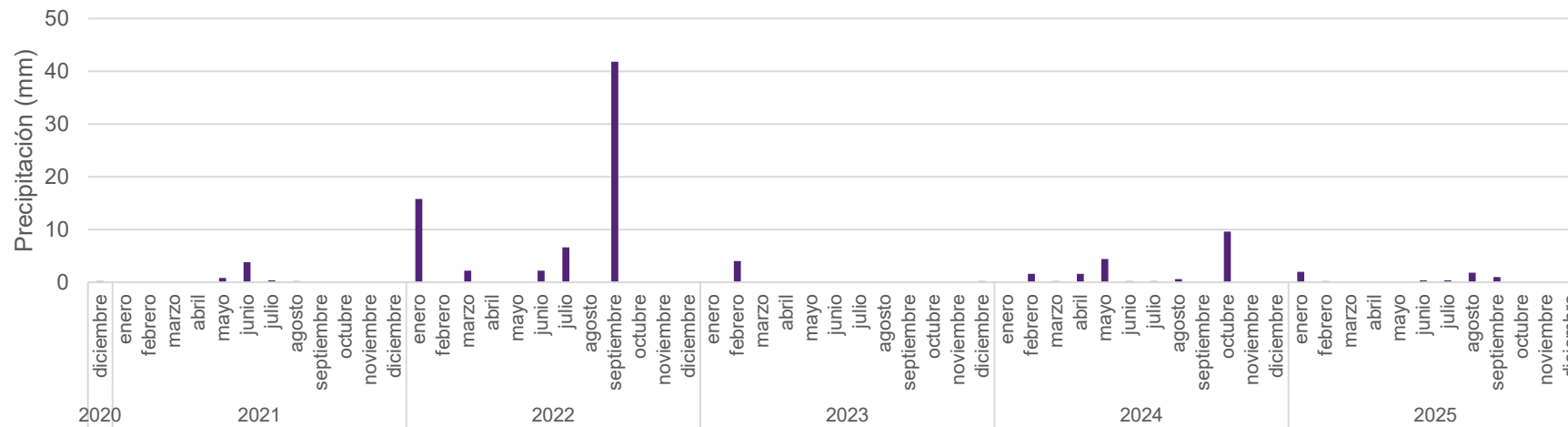


Figura 5. Serie temporal de las precipitaciones mensuales (mm) medidos por la estación La Ola.

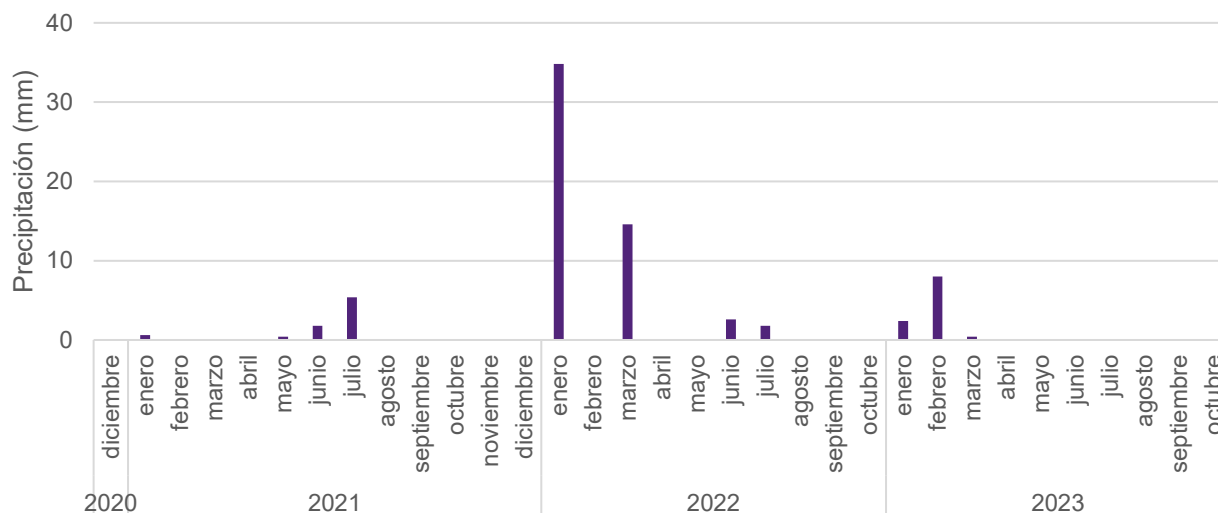


Figura 6. Serie temporal de las precipitaciones mensuales (mm) medidos por la estación Los Arroyos.

Como se puede apreciar en la Figura 4, el nivel de precipitaciones reportado por la estación Centro Salar son de un orden de magnitud muy superior a lo reportado por las otras dos estaciones, alcanzando valores mensuales de hasta 2.465 mm (agosto 2025) y registrando incluso valores de 205 mm en solo una hora, valores atípicos para la zona que sugieren una revisión más profunda para su validación o descarte. En la Figura 5 se puede ver la serie temporal de precipitaciones mensuales registradas por la estación La Ola, donde se pueden ver eventos de precipitación intensos durante primavera (septiembre-octubre), así como otros eventos durante fines de la temporada estival (enero-febrero). También existen registros de precipitaciones de menor intensidad durante el otoño tardío e invierno, entre los meses de mayo y julio. Por otro lado, en la Figura 6, se puede ver la serie temporal de la estación Los Arroyos, ubicada al sur de la estación La Ola, donde se aprecia que los principales eventos de precipitaciones se concentran a mediados y finales del verano, entre enero y marzo, mientras que las precipitaciones invernales son bastante menores. A diferencia de lo registrado en la estación La Ola, en Los Arroyos no se registran precipitaciones durante la primavera en los pocos años de datos disponibles. La diferencia estacional entre La Ola (con eventos relevantes en primavera) y Los Arroyos (sin registros en ese período), a pesar de ubicarse a mayor altitud, sugiere que el régimen de precipitaciones en la cuenca no responde principalmente a un gradiente altitudinal simple, sino al comportamiento de cada sistema (subcuencas) y sus fuentes de aporte: los eventos de primavera registrados en La Ola, no se presentan con la misma frecuencia que en Los Arroyos. Vale destacar, que la cantidad de datos en Los Arroyos impide hacer una comparación para todo el periodo. Un breve resumen con las estadísticas de la precipitación mensual de las diferentes estaciones se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Precipitación media mensual de las estaciones meteorológicas del área de estudio.

Mes	Precipitación media mensual (mm) (Media $\pm$ Error Estándar)		
	Centro Salar*	La Ola	Los Arroyos**
Enero	3,9 $\pm$ 2,5	6,9 $\pm$ 3,1	12,6 $\pm$ 11,1
Febrero	0,6 $\pm$ 0,4	1,7 $\pm$ 0,8	2,7 $\pm$ 2,7
Marzo	0,6 $\pm$ 0,6	1,0 $\pm$ 0,4	5,0 $\pm$ 4,8
Abril	90,9 $\pm$ 90,0	0,7 $\pm$ 0,3	0,0 $\pm$ 0,0
Mayo	95,4 $\pm$ 60,4	1,9 $\pm$ 0,9	0,1 $\pm$ 0,1
Junio	465,6 $\pm$ 196,3	1,6 $\pm$ 0,7	1,5 $\pm$ 0,8
Julio	446,4 $\pm$ 228,1	2,8 $\pm$ 1,3	2,4 $\pm$ 1,6
Agosto	934,9 $\pm$ 534,0	0,8 $\pm$ 0,3	0,0 $\pm$ 0,0
Septiembre	168,8 $\pm$ 96,3	18,6 $\pm$ 8,3	0,0 $\pm$ 0,0
Octubre	237,5 $\pm$ 183,9	4,3 $\pm$ 1,9	0,0 $\pm$ 0,0
Noviembre	17,4 $\pm$ 14,3	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0
Diciembre	3,1 $\pm$ 3,1	0,1 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0

*Presenta datos atípicos cuya validez debe ser revisada con mayor detalle.

**Datos disponibles solo entre diciembre de 2020 y octubre de 2023.

4.2 Hidrogeología

El presente subcapítulo caracteriza el comportamiento hidrogeológico de los 13 sitios asociados a EST-02, considerando como marco regional los antecedentes disponibles en la literatura técnica y como nivel local las observaciones específicas levantadas en cada sitio durante el desarrollo del estudio. Dado que los sitios se distribuyen en tres unidades hidrográficas con distinto grado de cobertura por la cartografía hidrogeológica oficial (Servicio Nacional de Geología y Minería [SERNAGEOMIN]) el análisis se estructura en dos niveles: una caracterización regional que permite establecer el marco geológico–hidrogeológico común y los patrones generales de flujo, recarga y descarga, y una caracterización local por sitio orientada a identificar las particularidades del entorno hidrogeológico inmediato de cada uno.

4.2.1 Contexto hidrogeológico regional

La caracterización hidrogeológica regional se sustenta en tres líneas principales de antecedentes técnicos, cuya cobertura espacial es complementaria:

- Mapa Hidrogeológico de la Cuenca Salar de Pedernales (Aguirre & Venegas, 2005), publicado por el SERNAGEOMIN como primer número de la Serie Hidrogeología de la Carta Geológica de Chile, escala 1:100.000. Este mapa cubre exclusivamente la subcuenca del Salar de Pedernales (coordenadas 26°00'-26°52' S / 69°20'-68°35' O) y constituye la cartografía hidrogeológica oficial del sector. En él se identifican las unidades hidrogeológicas según la clasificación de Struckmeier & Margat (1995), las isopiezas, los puntos de muestreo, las direcciones de flujo subterráneo y la red hidrográfica asociada. Bajo su cobertura quedan 7 de los 13 sitios del estudio: Salar de Pedernales, Salar La Laguna, La Ola, Leoncito, Tordillos, Pastos Largos y Río Negro.

- Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Rajo Inca (GAC, 2018), elaborado con base en los modelos hidrogeológicos conceptuales y numéricos desarrollados por Amphos 21 (2018a, 2018b, 2018c) y SRK Consulting (2018) para los sectores Pedernales, Salvador y Pampa Austral. Estos antecedentes complementan al Mapa SERNAGEOMIN con información actualizada de unidades hidrogeológicas, parámetros hidráulicos, balances hídricos y piezometría, y constituyen la principal fuente de información hidrogeológica para los 4 sitios localizados en el sector Salvador / Quebrada Potrerillos (Asiento, Ciénaga, Colorado y Tinajas), los cuales no se encuentran dentro de la cobertura del mapa SERNAGEOMIN.
- Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto-Andinas de la Región de Atacama (DGA & Amphos 21, 2016), que aborda de forma sistemática las 34 cuencas alto-andinas de la región, incluyendo balances hídricos, isoyetas y estimaciones de recarga. Es la principal fuente de antecedentes hidrogeológicos para el sitio Vertiente 2, ubicado en la subcuenca del Salar de Maricunga, fuera del alcance de los dos antecedentes anteriores.

Adicionalmente, se han considerado los antecedentes de DGA-DIHA PUC (2009), DGA (2009) y DGA-Aquaterra (2013), que entregan información de contexto regional para el conjunto de cuencas endorreicas y exorreicas del altiplano de Atacama.

4.2.2 Marco geológico-hidrogeológico

El área de estudio se emplaza en el sector altoandino occidental de la región de Atacama, en un dominio geológico caracterizado por la convergencia de tres elementos morfoestructurales mayores: la Cordillera de Domeyko y la Sierra Bórax al oeste, el cordón volcánico altiplánico de orientación N-S al centro y este, y un conjunto de depresiones endorreicas rellenas con depósitos sedimentarios y evaporíticos cuaternarios, entre las cuales destacan los salares de Pedernales, Maricunga y Piedra Parada (Aguirre & Venegas, 2005; Amphos 21, 2018a). El conjunto se enmarca en una cuenca alto-andina de gran extensión: la subcuenca del Salar de Pedernales, por sí sola, abarca aproximadamente 3.596 km², con altitud media de 3.992 m s.n.m. y máximas que superan los 6.000 m s.n.m. en su límite oriental (GAC, 2018).

Desde el punto de vista hidrogeológico, este marco da origen a dos grandes tipos de medios acuíferos que se repiten consistentemente en las distintas subcuencas del área de estudio:

- Acuíferos detríticos no consolidados, asociados a los rellenos sedimentarios cuaternarios de los llanos, depósitos aluviales, fluvioaluviales y coluviales que cubren las depresiones centrales de las cuencas. Son de comportamiento libre, con conductividades hidráulicas variables —desde muy bajas (en zonas con alto contenido limo-arcilloso) hasta moderadas (en gravas y arenas)— y constituyen los acuíferos de mayor potencial e interés práctico del sistema. En el sector Pedernales presentan potencias estimadas de hasta 600 m en la zona meridional de la cuenca, decreciendo hacia el norte (Amphos 21, 2018a).
- Acuíferos fracturados en rocas volcánicas e intrusivas, asociados al basamento volcánico-plutónico del cordón andino. Presentan permeabilidades de muy bajas a bajas, ligadas exclusivamente a zonas de fractura, y forman acuíferos menores de potencial hidrogeológico bajo. Habitualmente subyacen a la cobertura detrítica y se encuentran en conexión hidráulica con esta, configurando un sistema acuífero único de comportamiento libre (GAC, 2018).

El basamento impermeable está conformado por rocas plutónicas y volcanosedimentarias jurásico-cretácicas (Plutón Sierra Áspera, Pórfidos dacíticos, Grupo Punta del Cobre y Formación La Negra,

entre otras), que afloran en los flancos de las cuencas y delimitan lateralmente los sistemas acuíferos.

4.2.3 Patrones generales de flujo, recarga y descarga

A escala regional, el funcionamiento hidrogeológico del área responde al carácter endorreico de la mayoría de las cuencas y se caracteriza por:

- Recarga predominantemente por infiltración de la precipitación nival y líquida en los flancos altos de las cuencas, complementada por la infiltración localizada de la escorrentía superficial en los cauces y por aportes laterales subterráneos desde cuencas adyacentes. En la subcuenca del Salar de Pedernales, las entradas totales al sistema acuífero se han estimado en 1.044,9 l/s (valor probable), provenientes de recarga directa, recarga por escorrentía, conexión subterránea con las cuencas laterales de La Laguna y Quebrada Los Maranceles, y entrada subterránea por el Llano La Ola (Amphos 21, 2018a).
- Flujo subterráneo orientado preferentemente desde los flancos elevados hacia las depresiones centrales que constituyen el nivel base local de cada subcuenca. En el sector Pedernales, las isopiezas reflejan en gran medida la superficie topográfica, configurando una dirección de flujo principal SSE-NNO, desde las cabeceras del Río La Ola hacia el Salar de Pedernales (Amphos 21, 2018a).
- Descarga principalmente por evaporación directa desde los salares, vegas y zonas de afloramiento del nivel freático, y secundariamente por bombeo (campos de pozos asociados a la operación de CODELCO División Salvador) y descarga lateral hacia drenes y cauces como el Dren Agua Helada. Las salidas totales del sistema acuífero del Salar de Pedernales se han estimado en 1.083,3 l/s, generando un balance ligeramente deficitario de -38,2 l/s atribuible al efecto del bombeo (Amphos 21, 2018a).

Para los sitios localizados en la subsubcuenca de la Quebrada Potrerillos (sector Salvador), el funcionamiento hidrogeológico difiere del descrito para Pedernales. Se trata de un sistema con recargas muy bajas, del orden de 3 a 5 l/s para los sectores Las Salinas, El Salvador y Pisqueros (GAC, 2018), asociadas a precipitaciones medias anuales mucho menores y a una topografía abrupta con pendientes elevadas que favorecen la escorrentía sobre la infiltración. El sitio Vertiente 2, por su parte, se inserta en el sistema hidrogeológico de la cuenca del Salar de Maricunga, cercano al límite sur de la subcuenca Salar de Pedernales.

4.2.4 Análisis de niveles freáticos

Para la caracterización del estado actual de los sistemas evaluados, se procesaron los registros de niveles freáticos correspondientes al periodo dic-2020 a dic-2025. La evaluación se sustenta en 11 punteras que, tras aplicar un buffer de 100 metros sobre los polígonos de interés, permiten representar la dinámica hídrica de tres sitios: Salar de Pedernales, La Ola y Leoncito (Figura 3). Los niveles se analizan en base a la profundidad (metros bajo el nivel del terreno, m b.n.t.) con el fin de identificar tendencias y posibles fluctuaciones estacionales. En la Figura 7 se presenta la evolución temporal de los niveles para cada punto de monitoreo en los tres sitios evaluados.

En La Ola (Figura 7a) se observa una tendencia general al ascenso del nivel freático durante 2021-2023, con mínimos históricos de profundidad en PU-1 (0,39 m b.n.t. en noviembre de 2022) y PU-3 (0,25 m b.n.t. en julio de 2023). A partir de enero de 2024 las tres punteras experimentan una profundización sostenida: PU-1 pasa de 0,52 m a un máximo de 0,75 m b.n.t. en junio de 2025, y

PU-3 de 0,40 m a 0,57 m b.n.t. en abril de 2025. PU-2 muestra el comportamiento más marcado: tras ascender hasta su nivel más somero en enero de 2023 (0,64 m b.n.t.), se profundiza abruptamente en 2024-2025, alcanzando valores de entre 0,86 y 1,02 m b.n.t. que superan los registros iniciales del monitoreo (0,92 m en diciembre de 2020). La serie de PU-1 finaliza en agosto de 2025 (0,68 m b.n.t.), dado que la puntera registró condición de pozo seco a partir de septiembre de 2025.

En el SVAHT de Leoncito (Figura 7b las tres punteras muestran un quiebre hacia niveles más profundos a partir de 2024. PU-4 registra un escalón abrupto en enero de 2024 (~0,14 m de profundización respecto a diciembre de 2023), pasando de un rango de 0,82-1,01 m b.n.t. durante 2020-2023 a niveles de 0,99-1,17 m b.n.t. en 2024-2025, con su máximo histórico de 1,17 m en marzo de 2024. La puntera registra condición de pozo seco a partir de octubre de 2025. PU-5 es la más estable de la red, con niveles entre 0,58 y 0,71 m b.n.t. durante 2020-2023, profundizándose levemente en 2024-2025 hacia un rango de 0,70–0,80 m b.n.t. PU-6 exhibe la mayor variabilidad del sitio con un patrón estacional: los niveles más profundos ocurren en verano (febrero-marzo, ~0,85-0,98 m b.n.t.) y los más someros en invierno (agosto-septiembre, ~0,65-0,70 m b.n.t.), patrón que se repite en noviembre-diciembre con valores de 1,01 m b.n.t.

En el SVAHT del Salar de Pedernales (Figura 7c), las cinco punteras muestran comportamientos diferenciados a lo largo del período. PU-46 y PU-48 son las más estables de la red, con niveles en rangos acotados de 0,16-0,25 m y 0,12-0,22 m b.n.t. durante todo el período evaluado. PU-31 presenta la mayor cantidad de datos faltantes por congelamiento invernal, con 37 mediciones válidas sobre 61 meses; sus registros muestran niveles entre 0,07 y 0,23 m b.n.t. sin una tendencia clara. PU-45 es la que exhibe el cambio más consistente en el tiempo: presenta niveles en un rango de 0,36-0,49 m b.n.t. durante 2020-2022, para luego establecerse en un rango notoriamente más profundo de 0,45-0,55 m b.n.t. a partir de 2023, nivel que se mantiene hasta el fin de la serie. PU-44 es la de mayor variabilidad interanual: sus niveles promedio anuales varían entre 0,06 y 0,17 m b.n.t. sin una tendencia lineal clara, con un año 2023 notoriamente más profundo (promedio 0,17 m, máximo 0,20 m b.n.t.) respecto a 2021-2022 y a 2024-2025. En este último bienio los niveles han ascendido progresivamente hacia los valores más someros de toda la serie, con un mínimo histórico de 0,02 m b.n.t. registrado en julio de 2025.

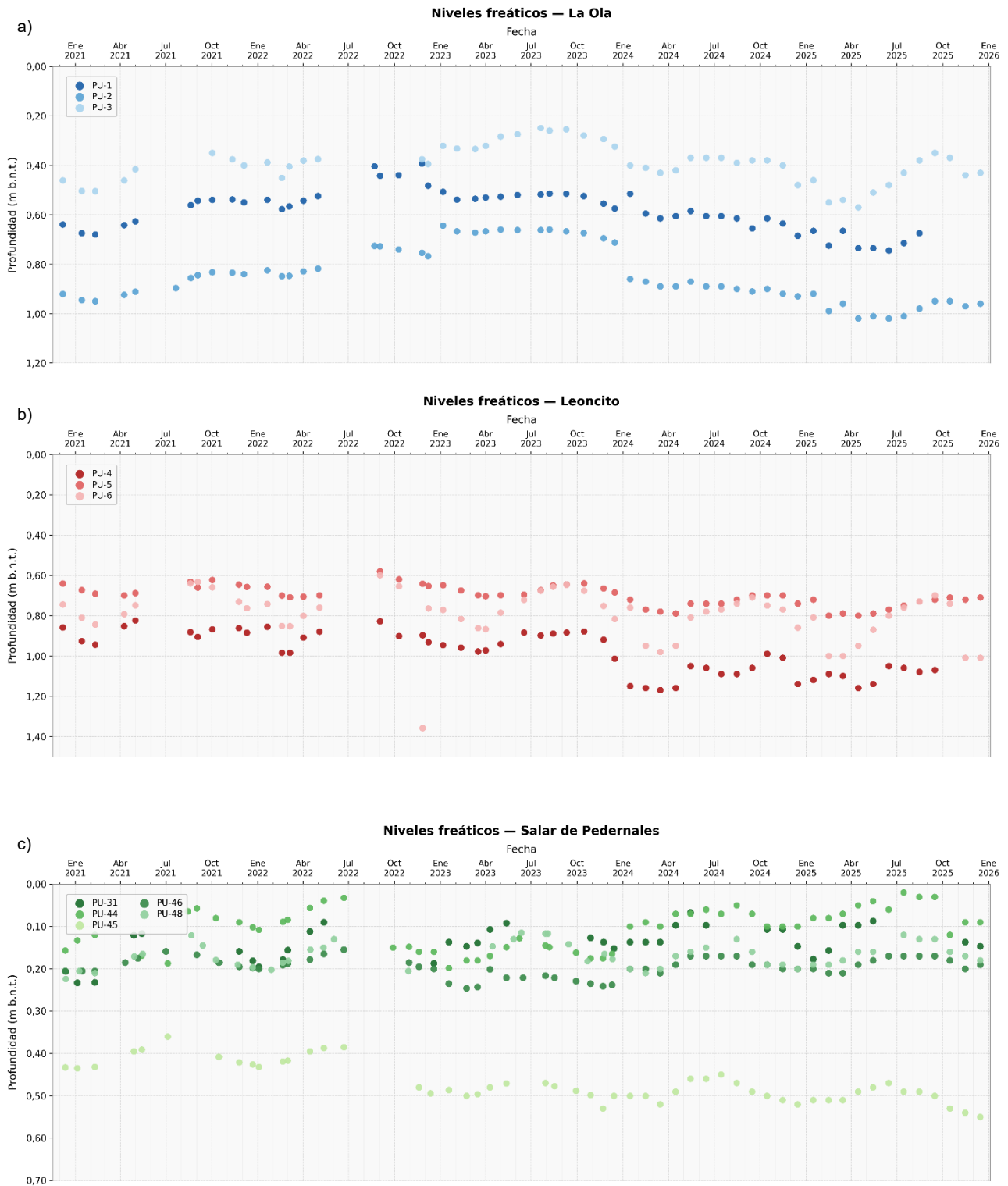


Figura 7. Series temporales de niveles freáticos medidos en punteras ubicadas en: La Ola (a); Leoncito (b); y Salar de Pedernales (c).

5. Discusiones

5.1.1 Pluviometría

Los antecedentes pluviométricos analizados ubican al Área de Estudio inserta en un dominio climático de transición entre el Régimen Marginal de Altura y el Régimen Altoandino, controlado por un fuerte gradiente altitudinal y por la influencia estacional del invierno altiplánico (Houston, 2006; Garreaud, 2009; GAC, 2018). La contrastante distribución de precipitaciones en el flanco occidental de los Andes de Atacama implica que los 13 sitios estudiados, distribuidos entre los ~ 3.000 y 4.500 m s.n.m., reciben aportes hídricos heterogéneos. Con la información disponible a la fecha (3 estaciones meteorológicas), no es posible identificar un patrón claro en la distribución de las precipitaciones asociado a un gradiente altitudinal, en consecuencia, no se puede extrapolar un comportamiento a los 13 sitios.

Esta heterogeneidad espacial debe interpretarse, además, en un marco de alta variabilidad interanual modulada por El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) y la Oscilación Madden-Julian (MJO), que controlan tanto la intensidad del invierno altiplánico como la ocurrencia de eventos extremos de origen frontal o ciclónico (Houston, 2006; Wilcox *et al.*, 2016; CR2, 2020). En consecuencia, los acumulados anuales registrados en estaciones locales (La Ola, Los Arroyos), representan medidas puntuales de un sistema de alta variabilidad, donde un solo evento extremo puede aportar fracciones equivalentes a la precipitación de varios años de precipitaciones menores, como ha sido documentado para los aluviones de marzo de 2015 en Atacama (Wilcox *et al.*, 2016) y para el comportamiento general del altiplano chileno (CR2, 2020).

Adicionalmente, una proporción importante de la precipitación en el rango altitudinal del área de estudio se produce en forma sólida (nieve), particularmente sobre los 3.500 m s.n.m. Este componente nival aporta de manera diferida a la recarga de los acuíferos y al sostenimiento estival de los cauces a través de los procesos de fusión, lo que es coherente con el régimen nivo-pluvial reportado para el río La Ola en estudios previos (Amphos 21, 2018a; GAC, 2018).

Dentro de los resultados, destaca la alta precipitación registrada por la estación Centro Salar, la cual supera ampliamente a lo registrado por la estación con La Ola, ya que, en el mismo periodo, la primera entrega una precipitación media anual de $2465,8 \pm 971,8$ mm/año, en comparación con los $20,4 \pm 12,3$ mm/año de la segunda. A modo de comparación, la estación meteorológica de la Dirección General de Aguas (DGA) ubicada en el Salar de Pedernales, (código estación 3023000, coordenadas UTM WGS84 7085124 N, 482064 E), ubicada a 13,2 km al suroeste de la estación Centro Salar, entrega datos de $101,8 \pm 39,0$ mm/año para el mismo periodo de tiempo evaluado. Santibáñez (2017), en su atlas agroclimático, indica para el distrito “Salar de Pedernales”, el cual incluye las localidades de La Ola y Salar de Pedernales, una precipitación media anual de 61 mm/año. En vista de lo evaluado, la altísima precipitación registrada en la estación Centro Salar no parece responder a la variabilidad antes descrita para la zona, sino que a un posible error en la recolección o entrega de datos.

5.1.2 Niveles freáticos

Los registros presentados constituyen el monitoreo de niveles freáticos en los tres SVAHT evaluados, abarcando el periodo diciembre 2020 a diciembre 2025. Como tal, su principal valor radica en establecer el rango de variación natural de los niveles bajo las condiciones de gestión actuales, frente al cual podrán evaluarse en el futuro los efectos de los cambios en la gestión del

recurso hídrico. En términos generales, los niveles registrados muestran una dinámica propia de cada sitio, con tendencias y magnitudes de variación que difieren entre punteras incluso dentro de un mismo SVAHT. Esta heterogeneidad refuerza la necesidad de mantener una red de monitoreo con cobertura espacial suficiente, dado que una puntera individual no necesariamente representa el comportamiento del sistema en su conjunto. En este sentido, los registros de PU-4 y PU-1, que alcanzaron condición de pozo seco hacia fines de 2025, y el quiebre estructural observado en PU-45 a partir de 2023, son señales que deberán ser interpretadas en conjunto con la información hidrológica y de gestión disponible para cada período.

A medida que se implementen los cambios en la gestión, se espera que los niveles freáticos respondan con una recuperación gradual, es decir, un ascenso hacia la superficie, reflejado en valores menores de profundidad b.n.t., cuya magnitud y velocidad dependerán de las características hidrogeológicas de cada sistema y de la escala de las intervenciones. El presente informe reporta el comportamiento del nivel freático y su respuesta frente a la implementación de las medidas de restitución de agua y de cambio en el esquema de bombeo y permitirá, mediante el monitoreo periódico asociado a la ejecución de este proyecto, contrastar la evolución de los niveles en el tiempo.

5.1.3 Limitaciones y proyecciones

Junto con la ejecución de las campañas semestrales comprometidas, la incorporación de las mediciones en las punteras y estaciones meteorológicas comprometidas en el Proyecto, será clave para realizar el seguimiento y la evolución de cada sitio. La cobertura de la red de monitoreo de niveles freáticos se restringe actualmente a 3 de los 13 sitios (Salar de Pedernales, La Ola y Leoncito), lo que constituye una limitación para la representatividad espacial del análisis hidrogeológico local. La instalación de las punteras comprometidas permitirá superar progresivamente esta restricción. A pesar de estas limitaciones, los resultados aportan una primera caracterización de la dinámica pluviométrica e hidrogeológica de los 13 sitios del Avenimiento, consistente con el marco conceptual regional disponible y útil como información del estado actual para el seguimiento de los compromisos ambientales del proyecto.

6. Conclusiones

El Área de Estudio se caracteriza por un régimen pluviométrico altoandino de alta variabilidad espacial y temporal, controlado por el gradiente altitudinal y por la influencia estacional del invierno altiplánico, y en el cual la totalidad de la precipitación media es teóricamente susceptible de evaporarse. Esta condición configura un déficit hídrico estructural que solo es compensado, a escala local, por la infiltración y posterior descarga sostenida de aguas subterráneas hacia las depresiones topográficas, garantizando la persistencia de las vegas, lagunas y ríos del área.

El monitoreo de niveles freáticos en los SVAHT de La Ola, Leoncito y Salar de Pedernales evidencia que cada sistema presenta una dinámica propia, con rangos de variación, tendencias y sensibilidades distintas entre sí y entre las punteras de un mismo sitio. Los registros acumulados entre 2020 y 2025 constituyen una base robusta que permitirá detectar y cuantificar cambios futuros en el comportamiento del agua subterránea asociados a modificaciones en la gestión hídrica. La continuidad del monitoreo y la extensión de la red a los diez sitios restantes aún sin instrumentar son condiciones necesarias para contar con una visión integral del sistema y para evaluar de manera fundamentada la efectividad de las medidas de gestión que se implementen.

Finalmente, es importante destacar que los resultados aquí presentados constituyen una primera aproximación al estado actual para los diferentes sitios, levantada bajo las condiciones de disponibilidad hídrica vigentes durante la campaña. Conforme al cronograma de restitución asociado a la medida RC-01, en todos los sitios con compromiso de restitución (Ciénaga, El Colorado, Tinajas, Tordillo, Río Negro, Vertiente 2 y Pastos Largos) se restituyó el agua en distintas fechas durante 2025 y 2026, solo en Pastos Largos se encuentra pendiente la segunda fase de intervención; los seis sitios restantes no consideran intervención bajo este compromiso. Esta liberación paulatina y escalonada de caudales modificará progresivamente el balance hídrico local en los sitios intervenidos, con efectos esperables sobre los flujos superficiales, la recarga subsuperficial, los patrones de evapotranspiración y, eventualmente, la composición y vigor de las comunidades vegetales asociadas a vegas y lagunas. En consecuencia, las magnitudes y patrones aquí descritos deben interpretarse como una condición de referencia previa o concurrente al inicio del proceso de restitución, sobre la cual deberán contrastarse las mediciones de campañas futuras. Este enfoque comparativo resulta indispensable para distinguir los efectos atribuibles a la entrega de agua de aquellos derivados de la variabilidad climática natural del sistema altoandino, y para sustentar una evaluación robusta del desempeño ambiental del Avenimiento en el mediano y largo plazo.

7. Referencias

- Aguirre A., I., & Venegas S., M. (2005). Hidrogeología de la cuenca Salar de Pedernales, Región de Atacama [Carta Geológica de Chile, Serie Hidrogeología N°3, escala 1:100.000]. Servicio Nacional de Geología y Minería [SERNAGEOMIN]. ISSN 0717-7267.
- Amphos 21. (2018a). Modelo Conceptual Hidrogeológico de la cuenca Salar de Pedernales [Anexo del Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Rajo Inca]. CODELCO Vicepresidencia de Proyectos.
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia [CR2]. (2020). Análisis: Altiplano chileno: cuando llueve, diluvia. Universidad de Chile. <https://www.cr2.cl/analisis-altiplano-chileno-cuando-llueve-diluvia-cr2/>
- GAC (2018). *Capítulo 3: Línea de Base (Sección A) Medio Físico*. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Rajo Inca. Elaborado para CODELCO, División Salvador. Octubre 2018.
- Garreaud, R. D. (2009). The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, 22, 3–11.
- Houston, J. (2006). Variability of precipitation in the Atacama Desert: its causes and hydrological impact. *International Journal of Climatology*, 26(15), 2181–2198. <https://doi.org/10.1002/joc.1359>
- Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental [DIHA]. (2009). Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la Zona Norte de Chile, regiones XV, I, II y III (Etapa 2). Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas.
- Risacher, F., Alonso, H., & Salazar, C. (2003). The origin of brines and salts in Chilean salars: A hydrochemical review. *Earth-Science Reviews*, 63(3–4), 249–293. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(03\)00037-0](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(03)00037-0)
- Santibáñez Quezada, F. (2017). *Atlas agroclimático de Chile: Estado actual y tendencias del clima. Tomo II: Regiones de Atacama y Coquimbo*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas; Fundación para la Innovación Agraria (FIA). <http://www.agrimed.cl/atlas/tomo2.html>
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66–73. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592>
- Squeo, F. A., Warner, B. G., Aravena, R., & Espinoza, D. (2006). Bofedales: High altitude peatlands of the central Andes. *Revista Chilena de Historia Natural*, 79(2), 245–255. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2006000200010>
- Vargas, G., Pérez, S., & Aldunce, P. (Eds.). (2018). *Aluviones y resiliencia en Atacama: construyendo saberes sobre riesgos y desastres*. Social-Ediciones, Universidad de Chile. <https://libros.uchile.cl/838>
- Wilcox, A. C., Escarriaza, C., Agredano, R., Mignot, E., Zuazo, V., Otárola, S., Castro, L., Gironás, J., Cienfuegos, R., & Mao, L. (2016). An integrated analysis of the March 2015 Atacama floods. *Geophysical Research Letters*, 43(15), 8035–8043. <https://doi.org/10.1002/2016GL069751>
- World Meteorological Organization (WMO) (2008). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, 7th ed. WMO-No. 8. Ginebra, Suiza.