

AMPHOS²¹

Diagnóstico hidrológico Cierre del Dren de Agua Helada

Proyecto Rajo Inca



17 de mayo de 2022

Revisión 0

1106_CODVP_DREN_HELADA_INF_v0

Amphos 21 Consulting Chile Ltda.

Av. Nueva Tajamar, 481. WTC-Torre Sur- Of. 1005. Santiago (Chile)

+56 2 27991630

www.amphos21.com

Preparado por	Revisado por	Validado por
Samuel Iglesias Alfredo Zapata Víctor Parra Amy Bustos	Pilar Enguita	Juan Castaño

Índice

1	Introducción.....	6
1.1	Objetivos.....	6
1.2	Metodología de trabajo.....	7
1.3	Área de estudio	7
2	Síntesis del Modelo Conceptual Hidrogeológico DAH	9
2.1.1	Ubicación y componentes del DAH	9
2.1.2	Caracterización geológica estructural.....	13
3	Campaña de terreno entorno río Salado y DAH	14
3.1	Actividades de terreno	14
3.2	Principales resultados de campaña de terreno	17
4	Disponibilidad de recurso hídrico natural	21
4.1	Cálculo de la recarga en el sector de estudio.....	21
4.1.1	Delimitación de subcuencas	21
4.1.2	Gradiente de precipitación respecto altitud	23
4.1.3	Cálculo de la recarga por precipitación DIHA-PUC (2009).....	26
4.2	Disponibilidad de recurso hídrico natural.....	31
5	Derechos de agua y disponibilidad de recurso hídrico.....	32
5.1	Situación hídrica de la cuenca.....	32
5.2	Demanda de agua en la cuenca.....	33
6	Diagnóstico y conclusiones principales.....	34
7	Recomendaciones.....	36
8	Referencias	37
	ANEXO – Registro fotográfico campaña aforos.....	39

Índice de Tablas

Tabla 2-1: Caudal de descarga en DAH periodo 2014-2020.....	11
Tabla 2-2: Caudal de descarga en DAH periodo 2021.	12
Tabla 3-1. Información geográfica puntos visitados día 2 (DATUM WGS 84).....	14
Tabla 3-2. Información geográfica puntos visitados día 3 (DATUM WGS 84).....	15
Tabla 3-3. Información geográfica puntos visitados día 4 (DATUM WGS 84).....	16
Tabla 3-4. Cálculo de caudal pasante en puntos de aforo (DATUM WGS 84).....	18
Tabla 4-1. Propiedades morfológicas subcuencas de estudio.....	21
Tabla 4-2: Valores del coeficiente de infiltración (CI) en función de la permeabilidad.	28
Tabla 4-3: Ordenes de magnitud de la conductividad hidráulica y su permeabilidad cualitativa.....	29
Tabla 4-4: Parámetros utilizados para estimar la recarga (directa y lateral) mínima y máxima de cada unidad hidrogeológica según el método DIHA-PUC.	30
Tabla 5-1: Resumen de derechos concedidos en la cuenca del río Salado. Fuente: DGA, 2022.....	33

Índice de Figuras

Figura 1-1: Plano general del área de estudio.	8
Figura 2-1: Configuración Dren Agua Helada. Fuente: CODELCO (2020).	10
Figura 2-2: Esquema funcionamiento Dren Agua Helada. Fuente: CODELCO (2020).	11
Figura 2-3: Evolución del caudal medido en el punto de aforo Dren Agua Helada.	12
Figura 2-4: Mapa estructural sector Dren Agua Helada. Fuente: Amphos 21 (mayo de 2019), modificado de Sernageomin (2003).	13
Figura 2-5: Perfil geológico esquemático sector Dren Agua Helada. Fuente: Modificado de SERNAGEOMIN, 2003.	13
Figura 3-1. Ubicación en planta de los puntos visitados.	17
Figura 3-2: Distribución espacial de puntos de aforo y caudales.	19
Figura 3-3: Distribución espacial de conductividades eléctricas medidas in situ (mS/cm).	20
Figura 4-1: Ubicación subcuencas de estudio.	22
Figura 4-2. Gradiente de precipitación entre límite II Región y cuenca del Copiapó. Fuente: DARH, 2009.	24
Figura 4-3: Precipitación media anual subcuencas de estudio.	25
Figura 4-4. Unidades hidrogeológicas definidas en el área de estudio. Fuente: DARH, 2009.	27

1 Introducción

Codelco adjudicó a Amphos 21, en febrero de 2022, el servicio denominado “Diagnóstico hidrológico cierre del Dren de Agua Helada (DAH)”, el cual se encuentra localizado en el noroeste del Salar de Pedernales y cuyo cierre fue comprometido en el Avenimiento con el Consejo de Defensa del Estado (CDE), lo que supuso un cambio para el Proyecto Rajo Inca (PRI), aprobado mediante la Resolución Exenta N°19 del 28 de febrero de 2020.

Concretamente, el objetivo de la medida (Medida H-02 del Avenimiento) es eliminar dicha salida artificial del sistema de la cuenca Salar de Pedernales creada en la década de 1920 y que involucra caudales de entre 45 l/s y 65 l/s. La obra del cierre del DAH, según se indica en el Avenimiento, tendrá una eficiencia de al menos 90% respecto de las mediciones de la línea de base que se están realizando en la actualidad.

A partir de la información disponible, el agua que descarga el dren es altamente salina y su cierre supondría restablecer una condición natural del acuífero del Salar de Pedernales, eliminando una salida de agua en el sector noroeste del Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC) Norte.

1.1 Objetivos

El objetivo general del servicio consiste en el levantamiento de información en el entorno del Dren de Agua Helada y aguas abajo en el río Salado, que pueda determinar si el cierre de dicho drenaje conllevaría algún tipo de afección a la cantidad y a la calidad de las aguas de escurrimiento del río Salado y, de ser así, valorar la magnitud de tal efecto.

Para lo anterior, se establecen objetivos específicos, los cuales corresponden a un análisis preliminar de los derechos de caudales subterráneos y superficiales constituidos en el sector y a la realización de un diagnóstico mediante aforos y medidas *in situ* en el entorno del río Salado.

1.2 Metodología de trabajo

A continuación, se presentan los principales aspectos de trabajo para lograr los objetivos anteriormente descritos.

- En primer lugar, se ha realizado una revisión de antecedentes en gabinete, recopilando información acerca de los caudales aforados en el DAH, la red hídrica del sector, la revisión de los últimos modelos conceptuales y numéricos y su relación con el DAH, así como el estado de los derechos de aguas subterráneas y superficiales del entorno.
- Posteriormente, se llevó a cabo una visita técnica al lugar del proyecto, en la que se realizaron mediciones de aforos (en diferentes puntos) y se tomaron parámetros fisicoquímicos en el DAH y otras localizaciones. La campaña mencionada también estuvo enfocada en el reconocimiento de otras vertientes que se puedan generar en el entorno, así como de localización de derechos de agua en el sector que pudiesen verse afectados por el cierre del DAH.
- A continuación, una vez realizada la recopilación de antecedentes y llevada a cabo la campaña de terreno, se ha realizado un cálculo de recarga por precipitación en las cuencas de análisis. Esto con el fin de determinar cómo afectará el cierre del DAH respecto a la disponibilidad de agua en la cuenca.
- Por último, se entrega un informe final con los principales resultados, diagnóstico y recomendaciones para continuar con la evaluación del cierre del DAH.

1.3 Área de estudio

El área de estudio se ubica en el entorno del río Salado, desde Diego de Almagro hasta el Dren de Agua Helada (DAH), localizado en el sector noroeste del Salar de Pedernales, ubicado a su vez a 40 km al este de El Salvador y a 165 km al NE de la capital regional, Copiapó (Figura 1-1).

El Salar de Pedernales, localizado en la subcuenca homónima, representa la salida más importante del sistema hídrico de la cuenca con una extensión de unos 326 km², junto con el DAH, por el cual se vierte salmuera desde el salar a la cuenca del Río Salado, que escurre hacia el Pacífico y actúa como su nivel de base.

Actualmente, esta subcuenca es la fuente de abastecimiento de agua para la División Salvador (DSAL) de Codelco. Para el Proyecto Rajo Inca se tiene previsto continuar con la extracción de agua para abastecimiento del proyecto desde dicho lugar, mediante la extracción de agua subterránea desde un campo de pozos ubicado al sur del Salar de Pedernales y la extracción de agua superficial desde el Tranque La Ola, ubicado en el límite sur de la mencionada subcuenca.

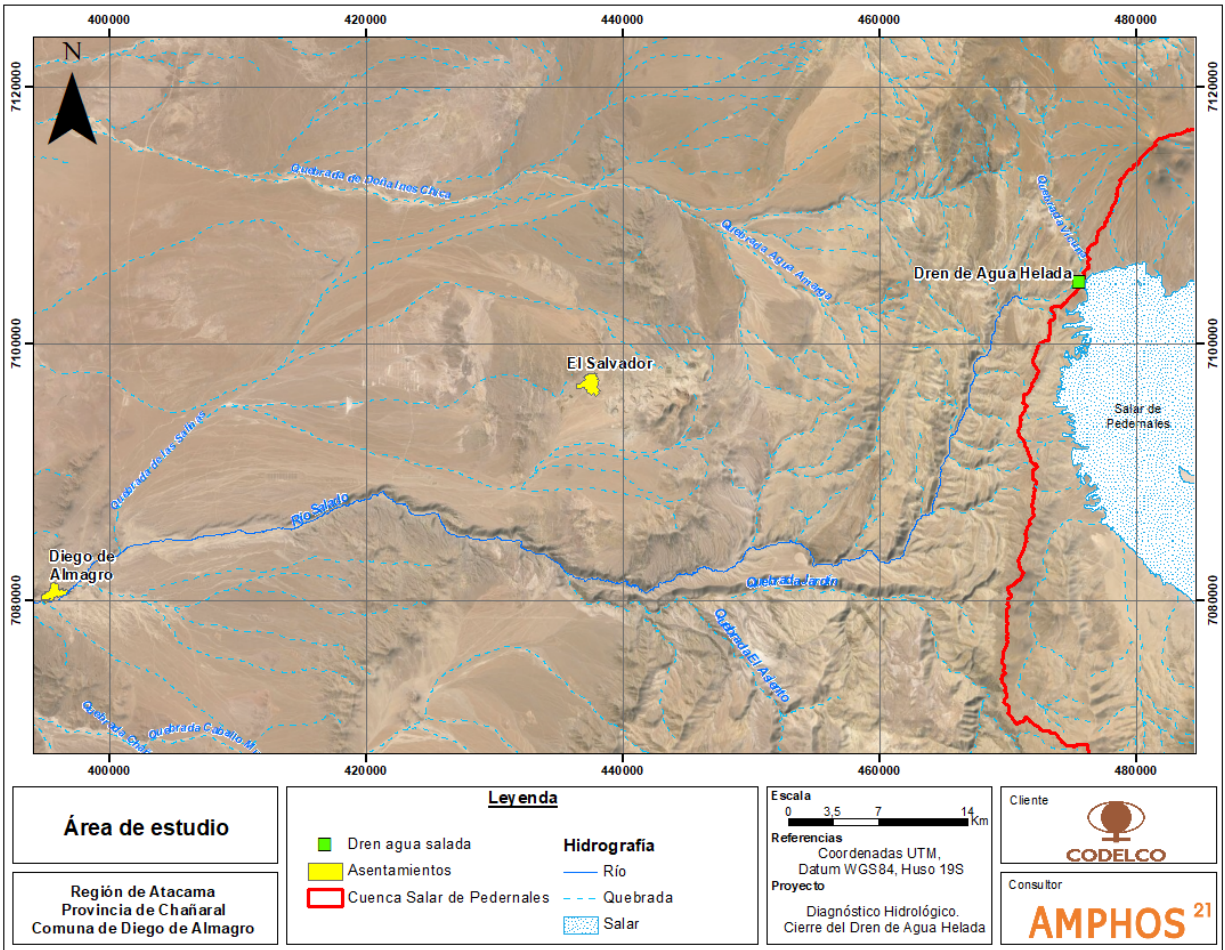


Figura 1-1: Plano general del área de estudio.

2 Síntesis del Modelo Conceptual Hidrogeológico DAH

A partir de la Nota Técnica “Reconocimiento Condición Dren Agua Helada Salar de Pedernales – Proyecto Rajo Inca” realizada por el Área Geociencias de Codelco, en agosto de 2020, y de los registros de caudales en el DAH que se han realizado hasta la actualidad por las empresas ETFA encargadas, se describe el modelo conceptual local del sector DAH, en el cual se definen las partes que componen dicho dren y su funcionamiento, así como las unidades geológicas/hidrogeológicas presentes en el sector a mayor detalle.

2.1.1 Ubicación y componentes del DAH

En el sector noroeste del salar de Pedernales, existe una descarga a través del Dren Agua Helada, construido en 1924, el cual que toma las aguas subterráneas del salar para verterlas en la parte alta del río Salado, al oeste de la cuenca. El río Salado, a su vez, desemboca en el océano Pacífico próximo a la ciudad de Chañaral, a unos 70 km al oeste de Diego de Almagro.

A partir de las inspecciones realizadas por Codelco (2020) en el sector, se reconocieron los siguientes elementos que conforman esta obra hidráulica, los cuales se ilustran en la Figura 2-1 y Figura 2-2.

- **Una canalización superficial (canaleta)** de una extensión de 970 m, la cual se origina al interior del salar y finaliza en un pique que conecta con el túnel de drenaje. Esta canaleta posee un ancho variable entre 2,5 y 3,5 m y una profundidad que varía entre 0 y 5 m. El sector de mayor profundidad (5 m), se ubica en el tramo que conecta con el pique. A lo largo de la canaleta, se reconoce una serie de perforaciones horizontales y tuberías, lo que podría dar cuenta de la construcción de drenes subhorizontales que favorecieran la infiltración de aguas hacia la canaleta.
- En el extremo norponiente de la canaleta se reconoce un **pique** de unos 30 m de profundidad, que conecta con la boca del túnel de drenaje que descarga las aguas del salar hacia la quebrada del Río Salado. Este pique posee dos compartimientos, uno para el descenso de personas (con escaleras y fortificación robusta de madera y uniones de acero) y otro para el desagüe del flujo de agua que provenía desde la canaleta hacia la boca del túnel en un inicio.
- A lo largo de la traza del túnel de drenaje en superficie, se reconocen **2 pozos** de diámetro entorno a las 8”, probablemente **de control**, los cuales conectan con el túnel.

- En la parte más alta del muro, sobre la traza del túnel de drenaje, se reconoce un **pique (pique auxiliar)**, el cual conecta con el dren y que posee características similares al primero. Desde superficie es posible visualizar el paso del agua en profundidad, estimándose la distancia al dren en unos 40 m.

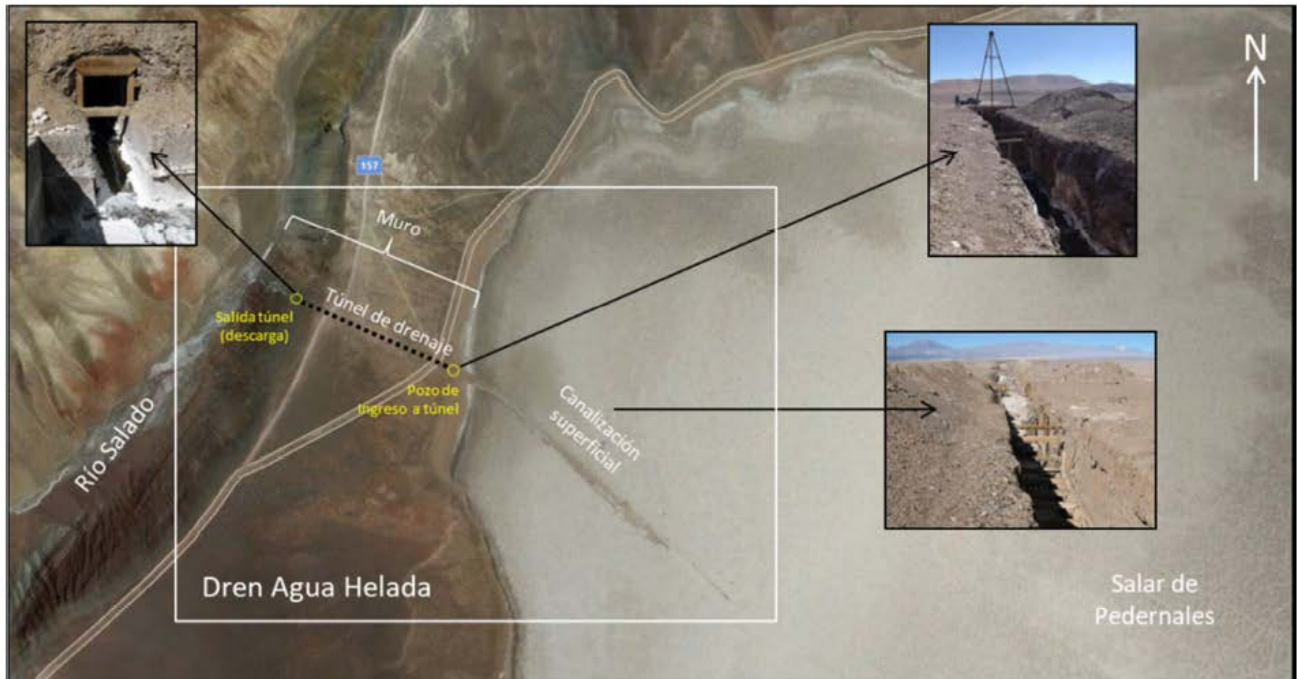


Figura 2-1: Configuración Dren Agua Helada. Fuente: CODELCO (2020).

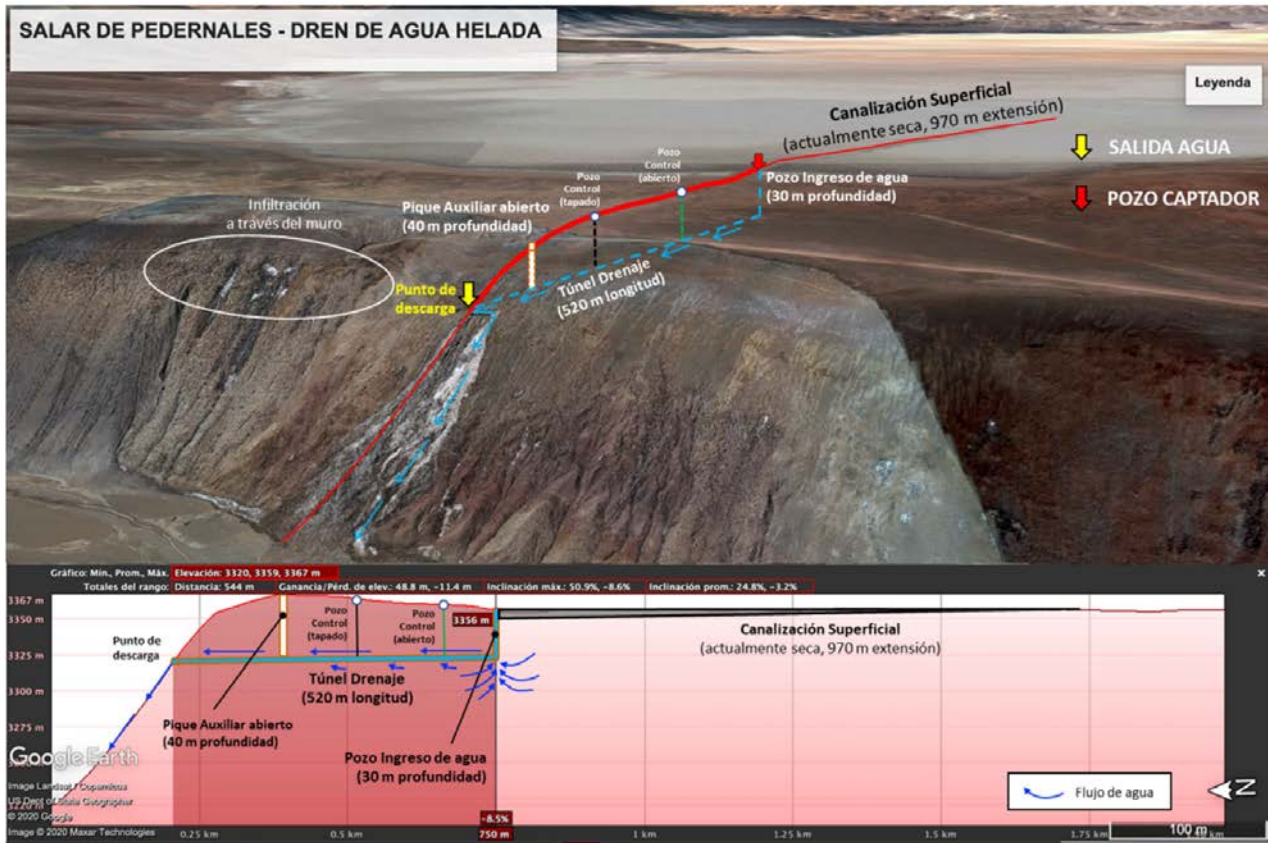


Figura 2-2: Esquema funcionamiento Dren Agua Helada. Fuente: CODELCO (2020).

Por otro lado, en el sector de descarga del DAH, se han realizado diversos aforos entre los años 2014 y 2021, tal como se indica en la Tabla 2-1 y Tabla 2-2, a partir de las cuales se ha determinado que el caudal de descarga desde la cuenca Salar de Pedernales a la cuenca Río Salado fluctúa entre 26 y 54 l/s, específicamente en el periodo de medición quincenal del 2021.

Tabla 2-1: Caudal de descarga en DAH periodo 2014-2020.

Caudal DAH (l/s)											
2014	2016		2017		2018		2019		2020		
Ene	Agos	Nov	Abr	Jul	Ene	Abr	Jun	Sept	Oct	Nov	Dic
39	71	53	43,8	90,7	119	58	53	40	22	42	33

Tabla 2-2: Caudal de descarga en DAH periodo 2021.

Caudal DAH (l/s)																			
2021																			
Ene		Feb		Abr		May		Jul		Ago		Sep		Oct		Nov		Dic	
54	43	34	39	46	36	44	27	43	45	45	38	41	46	33	46	46	45	43	35

A continuación, en la Figura 2-3 se muestra la evolución temporal del caudal aforado en el Dren de Agua Helada desde noviembre de 2020 hasta diciembre de 2021. En el gráfico se puede observar que los caudales se encuentran en torno a los 40 l/s para el último año medido. Cabe mencionar un leve descenso de los caudales desde finales de octubre de 2021 hasta finales de diciembre de 2021

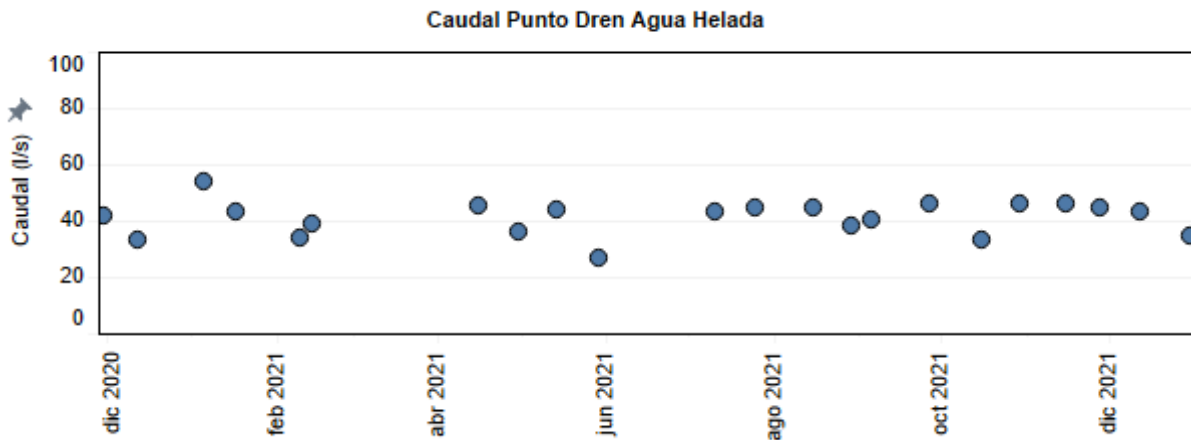


Figura 2-3: Evolución del caudal medido en el punto de aforo Dren Agua Helada.

2.1.2 Caracterización geológica estructural

En el sector noroeste del Salar de Pedernales existe un sistema de fallas de orientación SW-NE, tal como se ilustra en la Figura 2-4. Este sistema genera un plegamiento y alzamiento de la roca desde el sector de emplazamiento del DAH (al este del río Salado) hasta la zona de falla, tal como se ilustra en el perfil esquemático de la Figura 2-5.

En las cercanías del DAH no se posee información sobre los parámetros hidráulicos de los materiales, sin embargo, es probable que la roca fracturada posea valores de conductividad hidráulica que le otorguen un grado de alta a moderada importancia hidrogeológica, debido al plegamiento a la que fue expuesta.

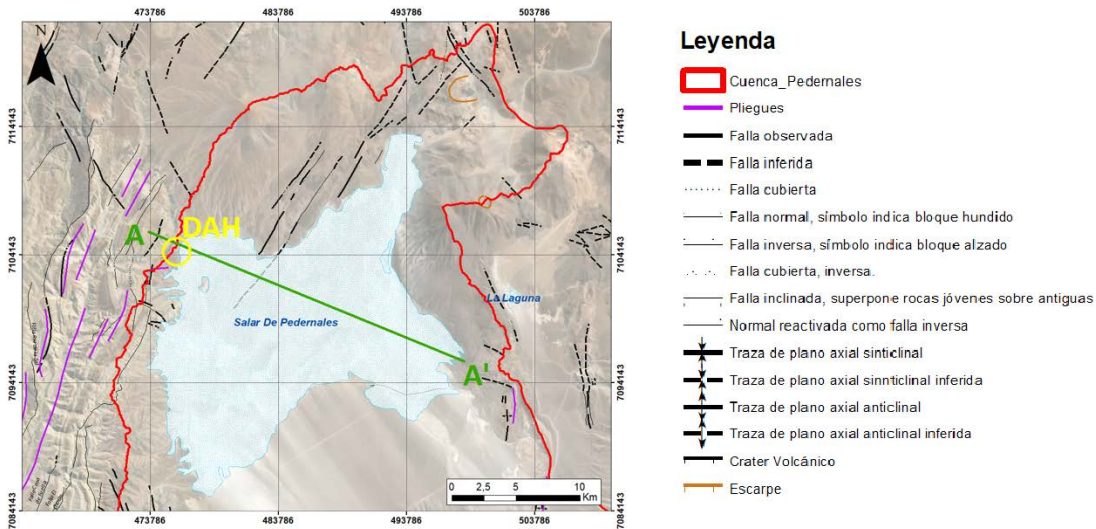


Figura 2-4: Mapa estructural sector Dren Agua Helada. Fuente: Amphos 21 (mayo de 2019), modificado de Sernageomin (2003).

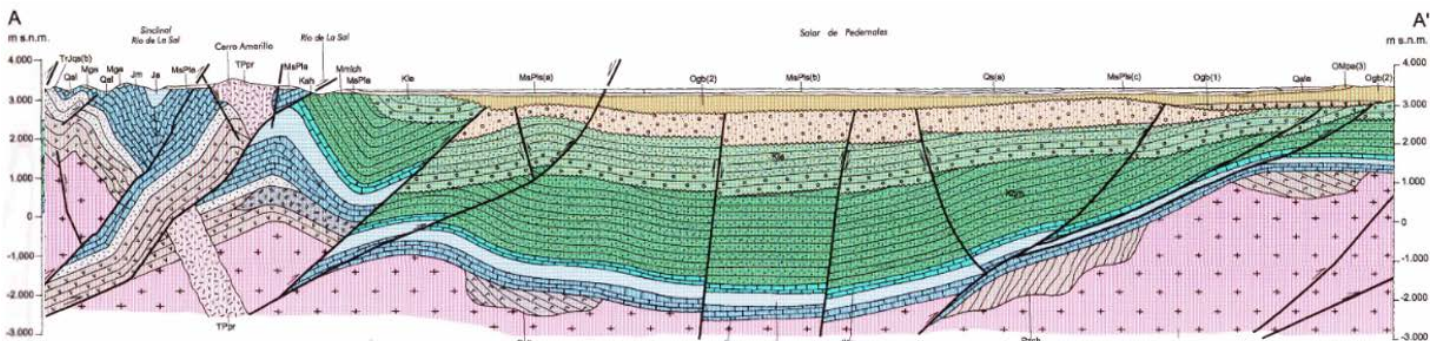


Figura 2-5: Perfil geológico esquemático sector Dren Agua Helada. Fuente: Modificado de SERNAGEOMIN, 2003.

3 Campaña de terreno entorno río Salado y DAH

Como parte de los compromisos adquiridos en el presente servicio, y considerando la red hídrica del sector, se estableció una visita a terreno en el río Salado y en el entorno del Dren de Agua Helada, con el objetivo principal de medición de sus caudales y parámetros fisicoquímicos, así como la identificación de otros posibles escurrimientos que pudiesen estar aportando al río Salado, más allá del propio dren. Asimismo, también se incluyó la inspección a lo largo de la quebrada Jardín, como parte importante afluente al río Salado.

3.1 Actividades de terreno

La campaña se realizó entre los días 14 y 18 de febrero de 2022, siendo el 14 y día 18 correspondientes a los traslados Santiago-Copiapó-Diego de Almagro y viceversa. Además, el día 14 incluyó el traslado del equipo a Diego de Almagro, la revisión del correcto funcionamiento de los instrumentos (sondas y molinete) y una inspección preliminar de la zona en el entorno de Diego de Almagro, identificando los primeros puntos de aforo para realizar al día siguiente.

El día 15 de febrero se llevó a cabo un reconocimiento a lo largo del río Salado desde Diego de Almagro hasta su confluencia con la quebrada Jardín. En este recorrido se realizaron seis registros de aforos, los cuales, dada la baja altura de lámina de agua, se realizaron mediante flotador¹ en primera instancia y posteriormente se verificaron las velocidades calculadas con el molinete digital. Además del cálculo de flujo pasante, se tomaron las medidas de parámetros fisicoquímicos de conductividad eléctrica (CE) y de pH en los puntos de aforo y en otros puntos adicionales (Tabla 3-1).

Tabla 3-1. Información geográfica puntos visitados día 2 (DATUM WGS 84).

Punto	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m s.n.m.)	CE (mS/cm)	pH	Aforo	Observaciones
AF-1	400.290	7.083.265	864	229,5	7,5	Sí	Cercano Pozo SP-5
AF-2	401.861	7.084.334	904	187,9	7,5	Sí	Puente Nueva Ruta Salvador

¹ El caudal estimado mediante flotador consiste en calcular el tiempo que tarda un objeto flotante en recorrer una distancia determinada ($v=e/t$), una vez estimada la velocidad, esta se multiplica por una sección tipo para obtener un caudal ($Q=v*A$).

Punto	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m s.n.m.)	CE (mS/cm)	pH	Aforo	Observaciones
AF-3	421.857	7.087.688	1.292	219,8	7,3	Sí	Cercano Punto PF-3
PF-PE	422.071	7.087.600	1.279	Seco	Seco	No	Piscina Evaporación Seca
RS-APF	422.788	7.087.374	1.293	229,9	7,2	No	Cercano Punto RS-APF
AF-4	433.676	7.083.581	1.589	250,0	6,9	Sí	Cercano Pozo SP-7
AF-5	435.995	7.081.954	1.685	248,3	7,0	Sí	Pre-Confluencia QEJ
AF-6	436.068	7.081.895	1.684	220,8	6,9	Sí	Pre-Estanque Río Salado
QEJ-1	438.266	7.079.983	1.763	20,1	8,2	No	QEJ en paso carretera. Estimado 3-4 l/s
QEJ-2	435.837	7.081.672	1.669	24,6	8,7	No	QEJ laguna estancada antes de la confluencia Salado

El día 16 de febrero se realizó la visita al Dren de Agua Helada, en el que se llevó a cabo la toma de parámetros fisicoquímicos, además de una inspección visual del entorno con el objetivo de identificar otros afloramientos. Cabe mencionar que no se observaron infiltraciones secundarias en el momento de la visita, pero sí restos de sales que dan cuenta de que se hubiesen producido anteriormente.

Posteriormente, durante la bajada por la quebrada Jardín se observó la ausencia de caudal en el sector de aguas arriba, un aumento de caudal (insuficiente y ramificado para realización de aforos) y zonas con mayor caudal (en donde se llevó a cabo la medición de flujo). Dicha quebrada antes de la confluencia con el río Salado reduce su caudal considerablemente (Tabla 3-2).

Tabla 3-2. Información geográfica puntos visitados día 3 (DATUM WGS 84).

Punto	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m s.n.m.)	CE (mS/cm)	pH	Aforo	Notas
DAH	475.494	7.104.827	3.343	249,1	7,2	No	Dren Agua Helada
QEJ-3	456.910	7.080.708	2.333	4,7	7,5	No	Primera vertiente QEJ identificada en la bajada
QEJ-4	450.194	7.080.719	2.152	13,8	7,6	No	Bajada QEJ, bajo caudal para hacer aforo
AF-7	447.733	7.080.285	2.090	17,2	8,1	Sí	Aforo medido en QEJ

Durante la cuarta jornada, el día 17 de febrero, se realizó un recorrido por el río Salado antes de su confluencia con la quebrada Jardín, en el entorno de la ruta C-13. En dicho lugar se llevaron a cabo dos aforos y posteriormente se comprobó la ausencia de agua en la quebrada de dirección N-S que sigue la ruta mencionada y que sería aportante al río Salado.

Por último, se realiza de nuevo un recorrido por la quebrada Jardín realizando el último de los aforos de la campaña (Tabla 3-3).

Tabla 3-3. Información geográfica puntos visitados día 4 (DATUM WGS 84).

Punto	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m s.n.m.)	CE (mS/cm)	pH	Aforo	Notas
AF-8	449.934	7.084.103	2.347	241,5	7,1	Sí	Río Salado Ruta C-13
AF-9	451.353	7.084.217	2.372	243,5	7,0	Sí	Río Salado Ruta C-13 Interior
P-C13	450.555	7.087.712	2.486	Seco	Seco	No	Comprobación aguas arriba ruta C-13 seco
AF-10	445.408	7.079.988	2.039	18,1	7,9	Sí	QEJ antes confluencia Qda Agua Dulce

Cabe decir que durante la visita se hizo un reconocimiento de los derechos que se disponían como antecedentes. Se intentaron visualizar dichos puntos según la descripción disponible (sin coordenadas), sin embargo, no se logró visualizar ninguna captación en el recorrido del entorno aguas arriba del río Salado o de la quebrada Jardín, posiblemente debido a las malas condiciones del terreno después del aluvión del 2015.

Además, el último día, el 18 de febrero, se visitó la zona de la Planta El Salado (ENAMI) y no se logró observar los puntos de captación superficial que se mencionan en la DIA de dicho proyecto. De igual forma, los derechos mencionados en la DIA (tanto subterráneos como superficiales) se tienen en cuenta para el diagnóstico final que resuelve la cantidad de derechos otorgados en el sector y cómo puede afectar el cierre del DAH a estos derechos constituidos.

En la Figura 3-1 se puede observar la ubicación en planta de los puntos indicados en las tablas anteriores. Cabe destacar que existe un vacío de información aguas abajo del DAH de más de 25 km, en dirección NE-SO, el cual resulta de muy difícil acceso para el diagnóstico objetivo.

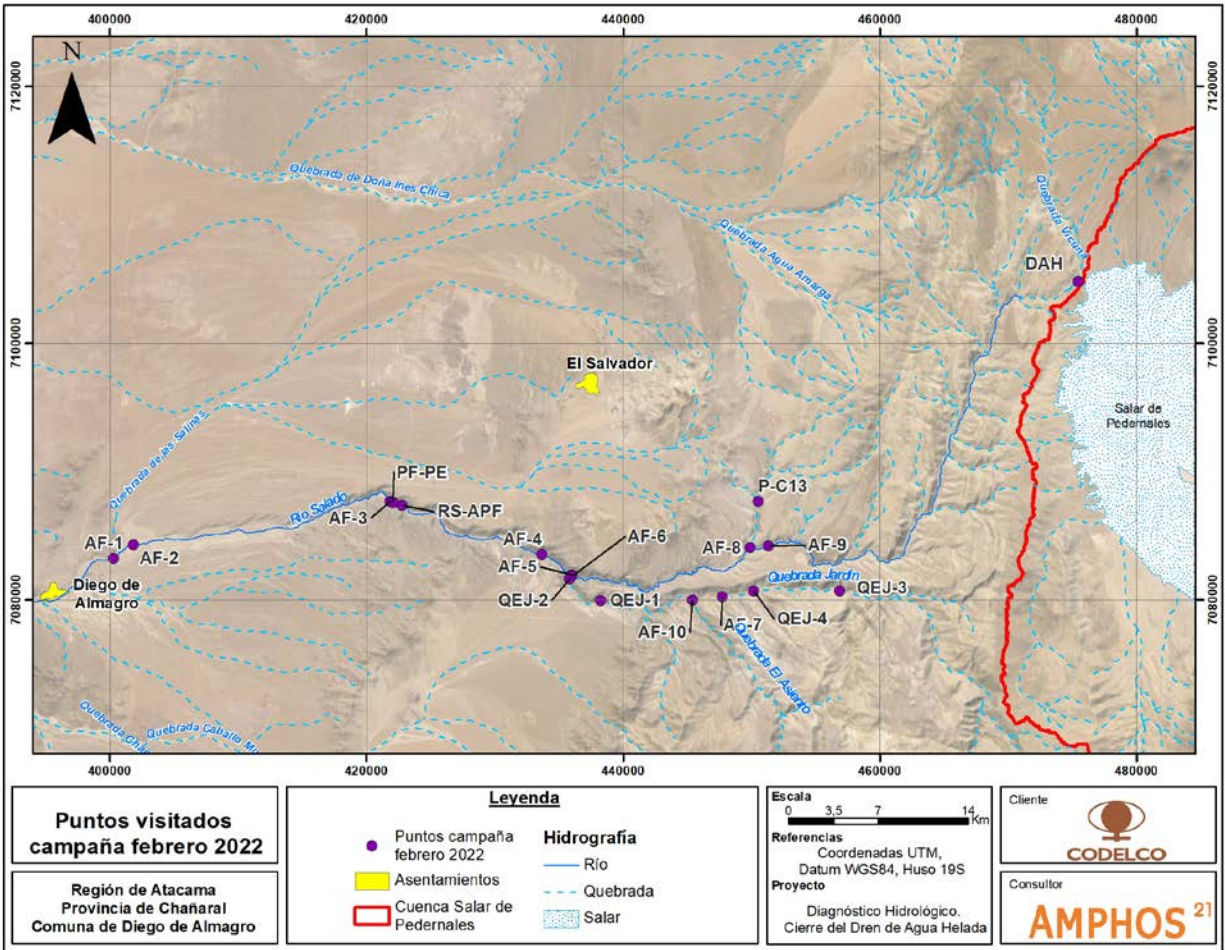


Figura 3-1. Ubicación en planta de los puntos visitados.

3.2 Principales resultados de campaña de terreno

Una vez recopilados los datos en terreno en los puntos anteriormente mencionados, estos fueron transformados a las planillas digitales en gabinete para el cálculo de caudal pasante por una sección determinada. Estos datos corresponden a la profundidad de la lámina de agua y al ancho de sección representativo del punto de medición.

Una vez definidos los datos geométricos de la sección transversal, se procede a la medición de la velocidad en diferentes verticales con el molinete digital tipo *Global Water Flow Probe* (en este caso a una misma profundidad dado que la lámina de agua en la gran mayoría de las secciones no superaba los 10 cm de altura).

A partir de las mediciones anteriores, geometría y velocidad de flujo en diferentes verticales de la sección, se calculan los caudales en cada punto de aforo, los cuales se presentan en la Tabla 3-4 y su distribución espacial en la Figura 3-2.

Tabla 3-4. Cálculo de caudal pasante en puntos de aforo (DATUM WGS 84).

Punto	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m s.n.m.)	CE (mS/cm)	pH	Caudal (l/s)
AF-1 (*)	400.290	7.083.265	864	229,5	7,5	19,6
AF-2	401.861	7.084.334	904	187,9	7,5	42,3
AF-3	421.857	7.087.688	1.292	219,8	7,3	47,6
AF-4	433.676	7.083.581	1.589	250,0	6,9	59,8
AF-5	435.995	7.081.954	1.685	248,3	7,0	37,9
AF-6	436.068	7.081.895	1.684	220,8	6,9	43,2
AF-7	447.733	7.080.285	2.090	17,2	8,1	12,2
AF-8	449.934	7.084.103	2.347	241,5	7,1	37,7
AF-9	451.353	7.084.217	2.372	243,5	7,0	31,9
AF-10	445.408	7.079.988	2.039	18,1	7,9	27,6

(*) El caudal en este punto ha sido descartado del análisis global dado su ubicación con ramificaciones y la hora de aforo, debido a lo cual se podría estar subestimando el resultado.

El aforo realizado el día 16 de febrero de 2022 en el DAH fue de 35 l/s según los datos proporcionados por la empresa ETFA AGQ. Como se puede observar en los resultados anteriores, los caudales medidos en el río Salado antes de la confluencia con la quebrada Jardín son en torno a 32 y 43 l/s, muy similares a lo medido en el Dren.

Posterior a la confluencia con la quebrada Jardín (en la cual se han medido caudales muy variables alrededor de 12 y 27 l/s dadas las numerosas ramificaciones en el sector), el río Salado aumenta su caudal hasta alcanzar los 48-60 l/s, para luego reducirse en el último punto antes de la llegada hasta Diego de Almagro (en torno a 42 l/s).

Cabe mencionar que el caudal en la quebrada Jardín es muy variable, con numerosas ramificaciones que pueden generar un caudal mayor en algunos puntos. Antes de su confluencia con el río Salado el caudal superficial se infiltra casi por completo y antes de su llegada al río Salado es casi despreciable (< 5 l/s según observación), lo cual evidencia que existiría un aporte subsuperficial que aflora aguas abajo o un aporte por otras fuentes no identificadas.

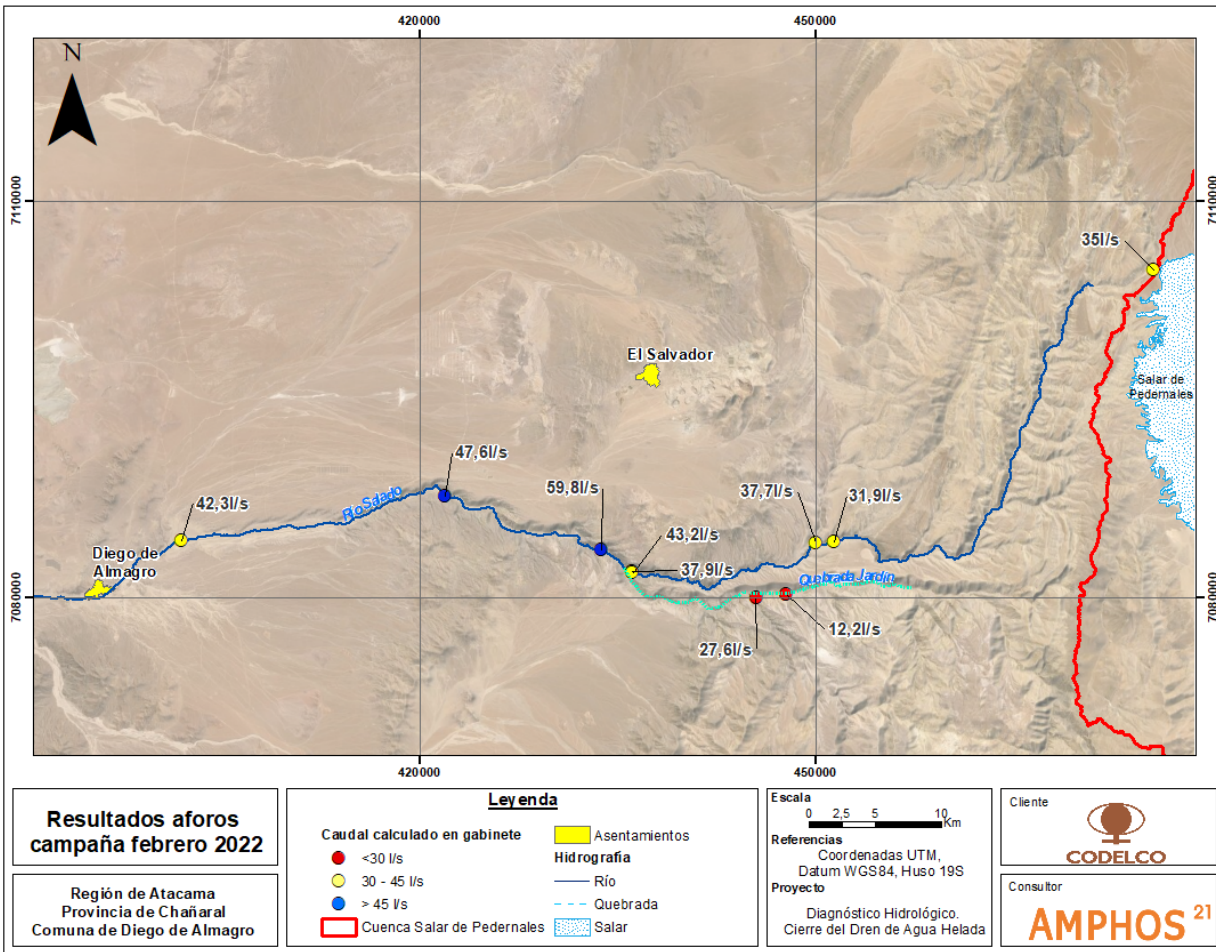


Figura 3-2: Distribución espacial de puntos de aforo y caudales.

Por otra parte, en la Figura 3-3 se presenta una distribución espacial de la conductividad eléctrica (CE) medida en diferentes localizaciones. Esta evolución espacial muestra que las aguas en la quebrada Jardín son de una composición fisicoquímica diferente a las del río Salado, mucho menos salinas y con valores entre 4 y 24 mS/cm, aumentando a lo largo de su cauce a medida que se van enriqueciendo en su recorrido.

Asimismo, los valores de CE en el río Salado se encuentran en torno a los 200 mS/cm, alcanzando en el algún punto, como el DAH, los 250 mS/cm. En general los parámetros fisicoquímicos medidos en el río Salado muestran que no existe una dilución de las aguas por este aporte secundario o, en su caso, por un aporte de recarga natural que serían aguas mucho menos concentradas y que provocarían una importante dilución de las aguas superficiales.

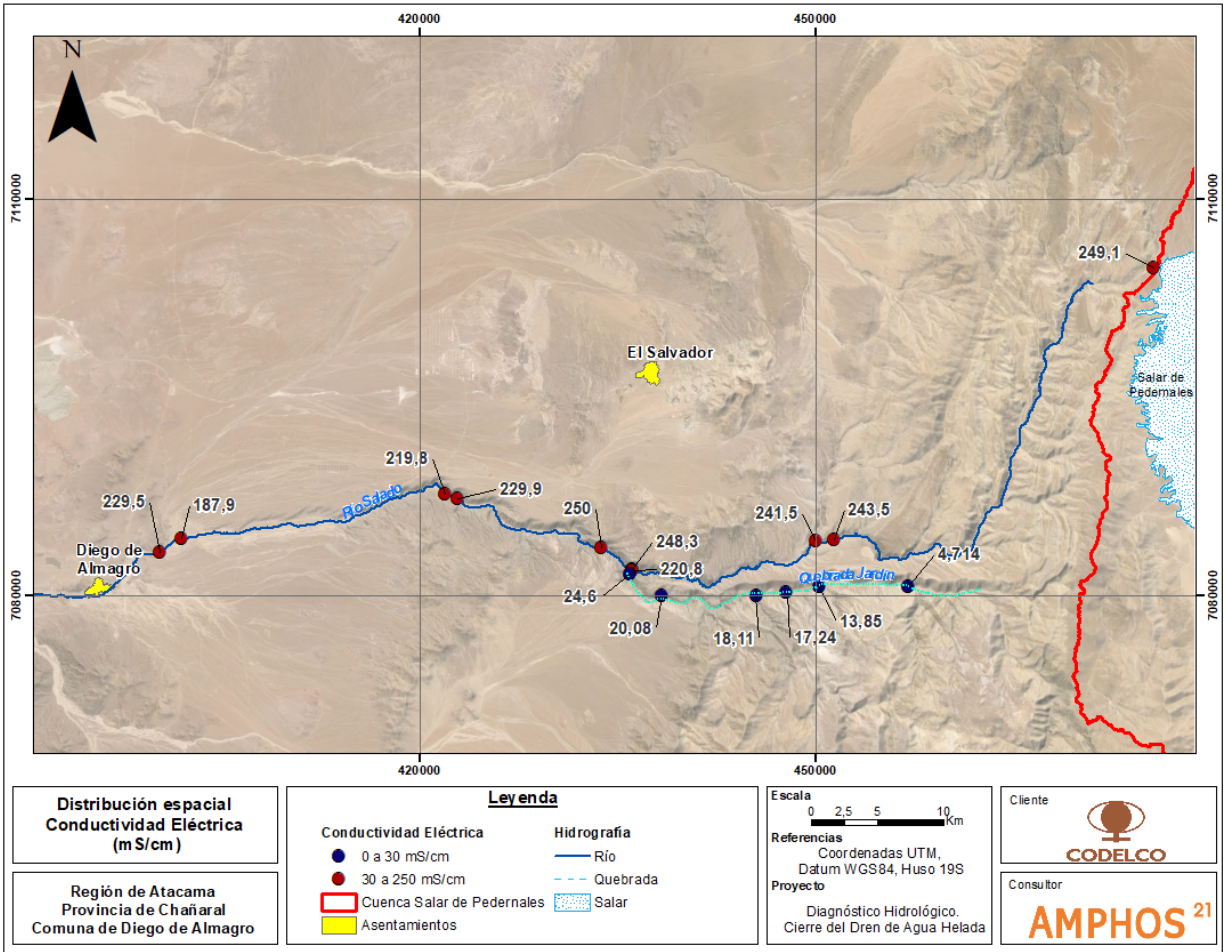


Figura 3-3: Distribución espacial de conductividades eléctricas medidas in situ (mS/cm).

4 Disponibilidad de recurso hídrico natural

4.1 Cálculo de la recarga en el sector de estudio

Como parte del servicio, a continuación, se presenta una caracterización hidrológica del área de estudio basada en los análisis de parámetros morfológicos y registros de precipitaciones, para posteriormente calcular la recarga por precipitación considerando la litología superficial de las cuencas y los montos de precipitación media anual.

Este cálculo de la recarga natural tiene por objetivo complementar la información sobre la disponibilidad del recurso hídrico natural sin tener en cuenta el flujo artificial procedente del Salar de Pedernales que pasa por el DAH.

4.1.1 Delimitación de subcuencas

El área de estudio se localiza en el sector del río Salado, específicamente entre Diego de Almagro y el Dren de Agua Helada (DAH). Con el fin de calcular la recarga en diferentes sectores, se generaron tres subcuencas según la siguiente distribución: i) la subcuenca del río Salado desde el DAH hasta la confluencia con la quebrada Jardín (subcuenca 1), ii) la subcuenca de la quebrada Jardín hasta la confluencia con el río Salado (subcuenca 2) y iii) la subcuenca del río Salado desde el DAH hacia aguas arriba (subcuenca 3).

La Tabla 4-1 presenta las propiedades morfológicas por subcuenca y en la Figura 4-1 su ubicación en planta. Los parámetros morfológicos de las subcuencas en estudio, junto con su delimitación, se obtuvieron a partir del modelo de elevación Alos Palsar con resolución de 12,5 x 12,5 m por píxel, el cual es de acceso público y que cubre la totalidad del área de estudio. Las subcuencas se ubican entre los 1.661 y los 5.135 m s.n.m. y presentan una pendiente media entre 20 y 39 %.

Tabla 4-1. Propiedades morfológicas subcuencas de estudio.

Subcuenca	Sector	Área (km ²)	Cota media (m s.n.m.)	Cota mín. (m s.n.m.)	Cota máx. (m s.n.m.)	Pendiente media (%)
Subcuenca 1	Río Salado hasta confluencia QEJ	510,97	3.080,6	1.663	3.966	33,6
Subcuenca 2	QEJ hasta confluencia río Salado	788,08	3.425,6	1.661	5.135	38,6
Subcuenca 3	Río Salado desde DAH a aguas arriba	117,05	3.714,8	3.206	5.075	20,8

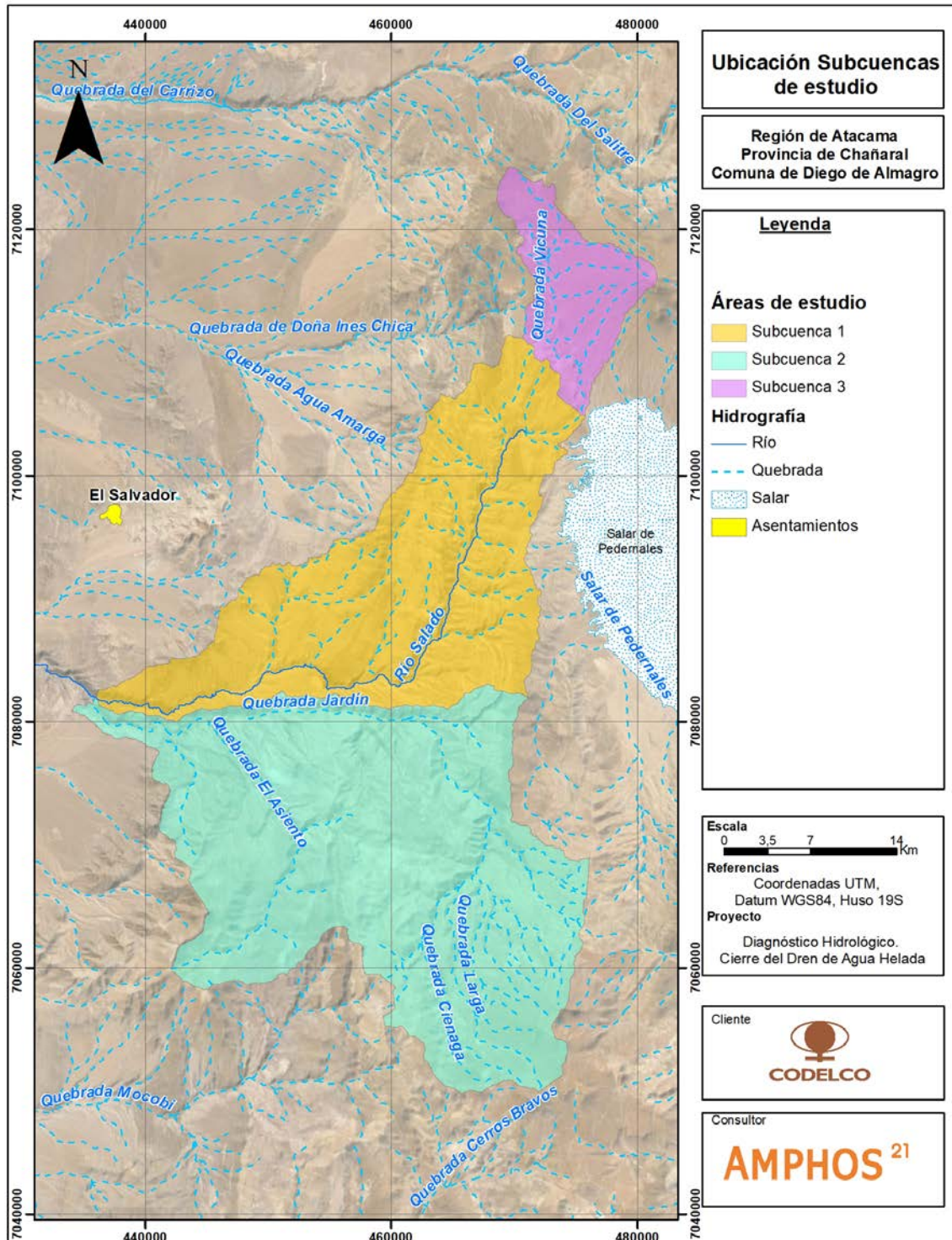


Figura 4-1: Ubicación subcuencas de estudio.

4.1.2 Gradiente de precipitación respecto altitud

En primer lugar, cabe decir que el área de análisis se emplaza en una zona con escasas precipitaciones (que ocurren en eventos esporádicos y generalmente aislados), temperaturas medias anuales que no superan los 15 °C, una baja humedad en el aire y una alta radiación solar. Lo anterior se ve reflejado en una alta tasa de evaporación (PUC, 2008), la cual puede superar los 2.500 mm/año.

Por ello, para estimar la recarga por precipitación en el área de estudio, el análisis no puede ser considerado únicamente utilizando las medias anuales de precipitación y evaporación, si no que se ha utilizado la metodología propuesta en el estudio “Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile” (DGA-DIHA PUC, 2009) tal como se verá en los acápite siguientes.

Para el cálculo de la precipitación promedio anual en las cuencas de análisis, se empleó el estudio “Evaluación de los recursos hídricos subterráneos en cuencas de la región de Atacama ubicadas entre el río Copiapó y la región de Antofagasta” elaborado por el Departamento de Administración y Recursos Hídricos en el año 2009 (DGA, 2009), en el que se realizó un análisis del comportamiento espacial de la precipitación según los valores medios anuales de las estaciones en el sector.

Como se observa en la Figura 4-2, se concluyó que el comportamiento de la precipitación queda agrupado principalmente en dos tendencias. El primer grupo se observa que entre 0 y 200 m s.n.m. la precipitación aumenta 74 mm cada 100 m, dado la influencia que ejerce la costa. El segundo grupo se ubica entre los 200 y 2.000 m s.n.m. y aumentan 21 mm cada 100m. Las estaciones ubicadas más al interior no coinciden con la tendencia de las estaciones ubicadas al centro, sin embargo, entre ellas se observa un gradiente de 24 mm cada 100 m.

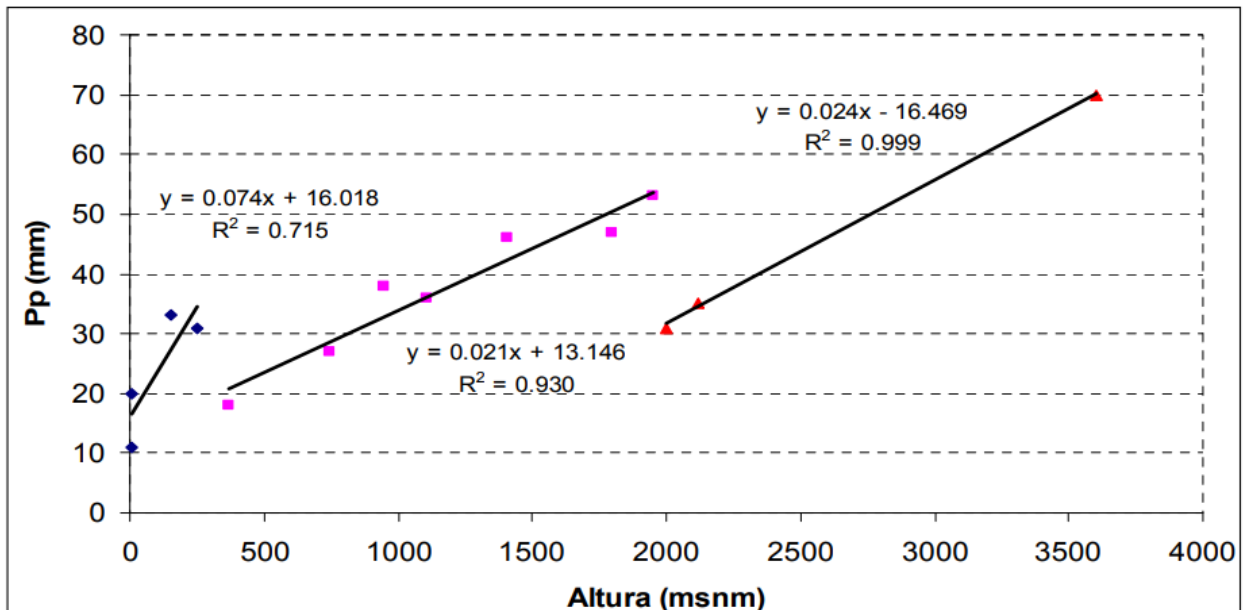


Figura 4-2. Gradiente de precipitación entre límite II Región y cuenca del Copiapó. Fuente: DARH, 2009.

En base al gradiente de precipitación anual definido en el tercer grupo (Figura 4-2), dado que las cuencas del presente estudio presentan una altitud promedio de entre 3.000 y 3.700 m s.n.m., se generó un ráster de precipitación sobre las subcuencas del área de estudio. Esta metodología entrega un valor de precipitación media anual distribuida espacialmente en el área de estudio, lo que permite estimar directamente la precipitación media anual en cada subcuenca. En la Figura 4-3 se muestra la precipitación media anual antes mencionada.

De acuerdo con los resultados, se obtiene una precipitación media anual en la subcuenca 1 de 57 mm, en la subcuenca 2 de 66 mm y en la subcuenca 3 de 73 mm. Estos valores concuerdan con la distribución de las isoyetas presentadas en el modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca Salar de Pedernales, elaborado para el EIA del Proyecto Rajo Inca.

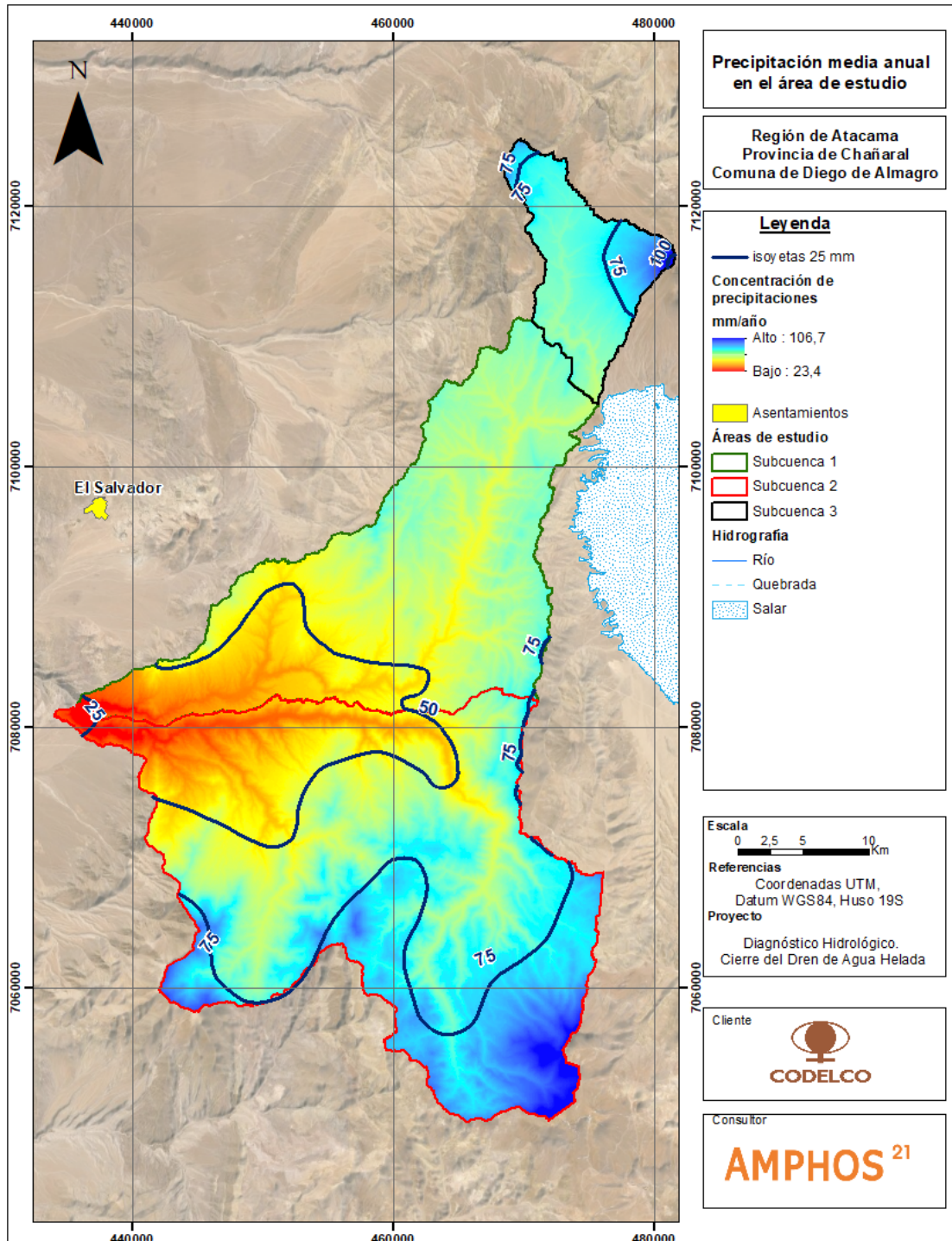


Figura 4-3: Precipitación media anual subcuencas de estudio.

4.1.3 Cálculo de la recarga por precipitación DIHA-PUC (2009)

La metodología DGA-DIHA PUC (2009) considera que la recarga por precipitación media anual (R) se compone de una recarga por precipitación directa (R_D) que se produce por la precipitación que cae en la zona formada por depósitos sedimentarios o formaciones más permeables y una recarga lateral (R_L) que se produce por la precipitación que cae sobre la roca impermeable o semipermeable de la cuenca aportante. Las expresiones para estimar el valor de la recarga directa y lateral son las siguientes:

- **Recarga directa (R_D)**

$$R_D = C_{ID} \cdot Pp \cdot A_D$$

- **Percolación lateral (R_L)**

$$R_L = C_{IL} \cdot C_E \cdot Pp \cdot A_L$$

Donde C_I corresponde a al coeficiente de infiltración directa (C_{ID}) y lateral (C_{IL}), C_E al coeficiente de escorrentía, Pp a la precipitación promedio en mm/año y A al área de recarga directa (A_D) y lateral (A_L) en km^2 .

Para identificar las zonas de recarga directa y de percolación lateral en la cuenca, se ha digitalizado el mapa hidrogeológico del Informe Técnico N°276 (DGA, 2009) que se presenta en la Figura 4-4. En dicho estudio se definieron cuatro unidades hidrogeológicas (UH) en base a la delimitación de secuencias geológicas del mapa geológico de Chile y a la permeabilidad, capacidad de almacenamiento y calidad de las aguas asociada a cada una de estas. Las UH se dividieron según se ubicasen en zonas de rellenos sedimentarios no consolidados o en rocas. En el caso del sector de estudio se identifican las siguientes tres UH:

- UH con alta importancia hidrogeológica: principalmente en los depósitos aluviales del Neógeno, que corresponden a gravas, arenas y limos moderadamente consolidados, mal seleccionados y variada composición, con mal redondeamiento y esfericidad, asociados a sistemas de drenaje y abanicos antiguos; y a depósitos aluviales del Cuaternario, que corresponden a gravas y arenas soportadas por una matriz de arena fina a limo.
- UH con importancia hidrogeológica media a baja: en la que se agrupan principalmente rocas sedimentarias del Mesozoico además de unidades volcánicas y sedimentarias del Mioceno. Corresponde a porciones de roca, meteorizadas y/o fracturadas que almacenan agua en distintas proporciones.

- UH con importancia hidrogeológica nula a baja: corresponden a rocas con alto grado de consolidación y poca presencia de fracturas, por lo que poseen poca capacidad de almacenar y transmitir agua.

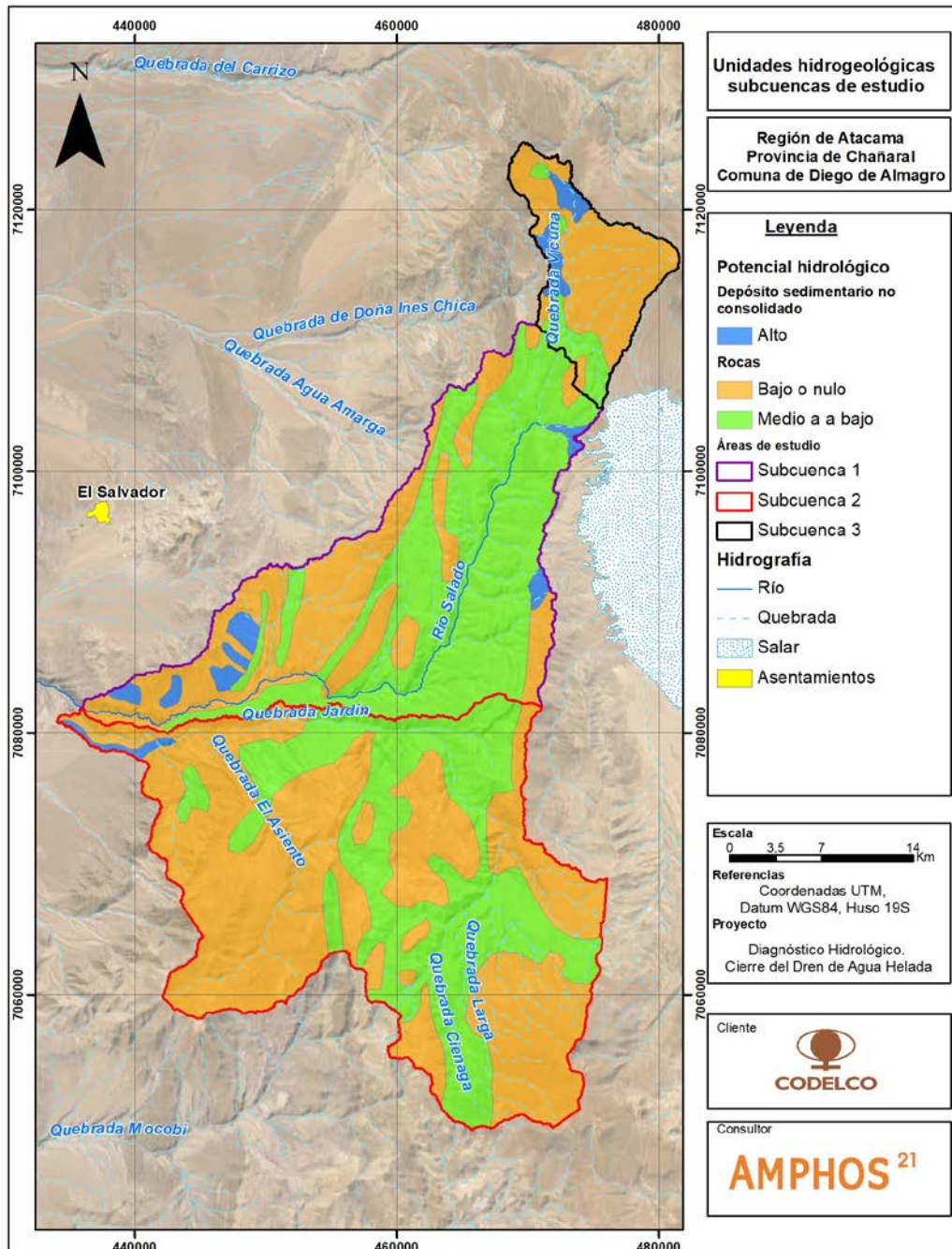


Figura 4-4. Unidades hidrogeológicas definidas en el área de estudio. Fuente: DARH, 2009.

Dado que en las subcuencas de análisis se han delimitado únicamente las UH correspondientes a depósitos sedimentarios no consolidados con alta importancia hidrogeológica (azul oscuro), y a rocas (color verde y café), para efectos del cálculo de la recarga, se ha considerado que en las zonas más altas de la cuenca se produce la percolación lateral (rocas), mientras que en el resto de las unidades se genera el proceso de recarga directa (unidades sedimentarias).

La metodología desarrollada por la DGA-DIHA PUC (2009) estimó un rango para el coeficiente de infiltración (C_{ID} y C_{IL}) entre 0,05 y 0,30 en cuencas del norte de Chile. Dicho coeficiente depende del grado de permeabilidad y consolidación de la unidad litológica donde se produce la infiltración (Tabla 4-2). Por otro lado, el coeficiente de escorrentía (C_E) puede ser estimado a partir de información de precipitación y caudales. Finalmente, la precipitación media anual en cada área definida se ha estimado en base a la distribución ya presentada en la Figura 4-4.

Tabla 4-2: Valores del coeficiente de infiltración (C_I) en función de la permeabilidad.

Permeabilidad cualitativa	C_I
Alta	0,30
Media a Alta	0,25
Media	0,20
Media Baja	0,15
Baja	0,10
Muy Baja	0,05

Fuente: DGA-DIHA PUC (2009) a partir de Xu et al. (2005) y Wang et al. (2008).

Para determinar la valoración de la permeabilidad cualitativa de cada unidad hidrogeológica se han utilizado las estimaciones de los rangos de conductividad hidráulica del modelo conceptual de la cuenca Salar de Pedernales (Amphos 21, 2018) junto con la referencia de la calificación de la permeabilidad cualitativa presentada en la Tabla 4-3, propuesta por Custodio y Llamas (1983).

Tabla 4-3: Ordenes de magnitud de la conductividad hidráulica y su permeabilidad cualitativa.

Conductividad hidráulica (m/d)	Permeabilidad cualitativa	Calificación de acuífero
10 ⁴	Muy Alta	Buenos acuíferos
10 ³		
10 ²		
10 ¹	Alta	Acuíferos pobres
1	Media	
10 ⁻¹	Baja	
10 ⁻²	Muy baja	Impermeables
10 ⁻³		
10 ⁻⁴		
10 ⁻⁵		
10 ⁻⁶		

Fuente: Adaptado de Custodio y Llamas (1983).

La metodología empleada para el cálculo de la recarga no considera los efectos de la morfología local del terreno ni condiciones de almacenamiento en el suelo, agregando más incertidumbre al valor de recarga estimado. Por esta razón, se consideró un coeficiente de infiltración mínimo y máximo en función de la permeabilidad de las unidades hidrogeológicas.

La UH correspondiente a potencial hidrogeológico alto (color azul oscuro en el mapa hidrogeológico) presenta un rango de conductividad hidráulica alta-media (conductividad hidráulica del orden de 10¹ m/d en el modelo hidrogeológico conceptual de Amphos 21 (2019)), por lo que se adoptó un coeficiente de infiltración C_{ID} de recarga directa (R_D) mínimo y máximo de 0,2 y 0,25, respectivamente.

Por otro lado, la UH correspondiente al potencial hidrogeológico medio a bajo (color verde en mapa hidrogeológico) presenta un rango de conductividad hidráulica de baja a media (rango de conductividad hidráulica va desde 10⁻¹ a 10¹ m/d en el modelo hidrogeológico conceptual de Amphos 21 (2019)), por lo que se adoptó un coeficiente C_{IL} de percolación lateral mínimo y máximo de 0,1 y 0,15, respectivamente, para el cálculo de la recarga lateral (R_L).

Por último, la UH con potencial hidrogeológico bajo a nulo presenta una permeabilidad de muy baja a baja (rango de conductividad hidráulica va desde $<10^{-1}$ en el modelo hidrogeológico conceptual de Amphos 21 (2019)), por lo que se asignó un coeficiente C_{IL} de percolación lateral mínimo y máximo de 0,05 a 0,1 para el cálculo de la recarga lateral (R_L).

Considerando que el área de estudio no cuenta con información fluviométrica, el coeficiente de escorrentía se obtuvo a partir de una revisión de literatura. A partir de la revisión, se determinó un coeficiente C_E de 0,13 para el área de estudio, el cual fue estimado para cuencas altiplánicas en los “Estudio Hidrogeológico Conceptual y Numérico del Funcionamiento de la Cuenca del Salar de Coposa” (DICTUC, 2005) y “Evaluación de los recursos hídricos subterráneos en cuencas de la región de atacama ubicadas entre el río Copiapó y la región de Antofagasta” (S.D.T. N° 276 DGA, 2009).

En la Tabla 4-4 se presentan los parámetros utilizados para estimar la recarga de acuerdo con la metodología empleada, con lo cual se obtiene un rango de recarga por precipitación en el área de estudio entre **39 y 61 l/s**.

Estos valores de recarga coinciden dentro del valor estimado en el informe S.D.T. N° 276 DGA de 110 l/s, teniendo en cuenta que, si bien la zona de recarga en el presente estudio es menor, la mayoría de la recarga se produce en la zona más alta de la cuenca del río Salado (área de estudio) y en la que se han registrado eventos de precipitación nival que podrían estar subestimando la recarga en el área.

Tabla 4-4: Parámetros utilizados para estimar la recarga (directa y lateral) mínima y máxima de cada unidad hidrogeológica según el método DIHA-PUC.

Subcuenca	Subcuenca 1	Subcuenca 2	Subcuenca 3
Área (km ²)	511	778	117
Precipitación promedio (mm/año)	57	66	73
Coeficiente de infiltración mín. (Ci)	0,05	0,05	0,05
Coeficiente de infiltración máx. (Ci)	0,25	0,25	0,25
Coeficiente de escorrentía (Ce)	0,13	0,13	0,13
Recarga mínima (l/s)	16,8	15,5	7,1
Recarga máxima (l/s)	24,4	26,4	10,0

Nota: Los coeficientes de infiltración varían en función del sector de potencial hidrogeológico.

4.2 Disponibilidad de recurso hídrico natural

A partir de los análisis anteriores, se obtiene un rango de recarga natural de entre 24 y 34 l/s en el sector norte de estudio (subcuenca 1 y subcuenca 3) y que parte de la cual podría estar pasando al sector del Yacimiento Indio Muerto por una posible conexión a partir de fracturas regionales de orientación NO-SE a ONO-ESE, produciéndose una recarga puntual hacia el sector oeste del río Salado. Esta conexión fue identificada en el modelo conceptual hidrogeológico de la DIA Continuidad Operacional División Salvador (Codelco, 2017) y fue cuantificada en torno a los 30 l/s.

Por lo tanto, no se observa que exista una recarga natural por precipitación aportante al cauce del río Salado, o esta posiblemente sería de una magnitud mínima, ya que en el valor calculado de recarga en el sector norte de estudio es bastante similar con el valor estimado en la mencionada DIA del caudal pasante al oeste.

Lo anterior se ratificaría con los caudales aforados y los parámetros fisicoquímicos medidos en la campaña actual, ya que estarían indicando que no existe una dilución de las aguas a partir de aguas propias de recarga natural (con menor CE), dado que a lo largo del recorrido evaluado no se observan variaciones significativas de la conductividad eléctrica o de los volúmenes de flujo estimados, especialmente en el sector aguas arriba del río Salado.

Por otra parte, la recarga natural obtenida en el sector sur (subcuenca 2) entre los 15 y 26 l/s, concuerda con los aforos realizados en la quebrada Jardín, entre 12 y 27 l/s (AF-7 y AF-10 respectivamente).

5 Derechos de agua y disponibilidad de recurso hídrico

5.1 Situación hídrica de la cuenca

La cuenca y acuífero del Río Salado se encuentra en una situación favorable respecto al recurso hídrico, en relación con la situación de otras cuencas en la región de Atacama. Esto a partir de las herramientas que dispone la DGA para la mejor administración y protección de los recursos hídricos del país, ya que dicha cuenca no está definida como área de restricción de aguas subterráneas, zona de prohibición de aguas subterráneas, declaración de agotamiento de aguas superficiales, decretos de reserva o decretos de escasez hídrica.

A partir de lo mencionado anteriormente, la cuenca y acuífero del río Salado en la actualidad, de acuerdo con las herramientas que tiene disponibles la DGA, no estarían dañados o con riesgo de ser dañados.

En relación con la recarga de la cuenca del río Salado, se identifica como fuente principal la recarga desde el Salar de Pedernales, la cual sería de forma superficial desde el Dren de Agua Helada, en base al estudio SIT 329 (DGA, 2013), con un caudal variable en torno a 40 l/s como se explica en capítulos anteriores. Si bien existen estudios que definen una recarga subterránea procedente de la cuenca del Salar de Pedernales, los modelos hidrogeológicos más recientes (EIA Proyecto Rajo Inca, 2020), definen la cuenca Salar de Pedernales como una cuenca endorreica y las posibles conexiones subterráneas con la cuenca del río Salado serían mucho menores a las calculadas en antecedentes.²

Por otro lado, existe una recarga de precipitaciones que caen directamente sobre la cuenca, la cual fue estimada en el estudio SDT N°276 (DGA, 2009) en 110 l/s para toda la cuenca río Salado y que de forma particular en el presente estudio y las cuencas seleccionados se ha estimado entre 39 y 61 l/s.

² La recarga subterránea no se ha medido directamente, pero en el estudio SIT N°329 del 2013, se modeló la cuenca del Salar de Pedernales, calculando un volumen de salida de la cuenca subterránea entre 1.066 y 9.730 l/s y que parte de este flujo podría recargar al acuífero de El Salado.

5.2 Demanda de agua en la cuenca

En relación con la demanda de agua, esta se considera equivalente al flujo de agua repartido entre los titulares de los derechos de aprovechamiento de la cuenca.

En el catastro público de aguas se identificaron 43 expedientes de derechos de aprovechamiento del tipo consuntivo, totalizando un flujo de 1.066,7 l/s otorgados, de los cuales 232,9 l/s corresponde al flujo otorgado para fuentes subterráneas y 833,8 l/s para fuentes superficiales (de los cuales 700 l/s pertenecen a un derecho de aguas superficiales a nombre de CIA Minera Arenillas en el que se indica una captación en el río Salado a 1.000 metros aguas abajo de Diego de Almagro) (Tabla 5-1).

Tabla 5-1: Resumen de derechos concedidos en la cuenca del río Salado. Fuente: DGA, 2022.

Tipo	Superficiales		Subterráneos	
	Número de expedientes	Caudal total otorgado	Número de expedientes	Caudal total otorgado
Consuntivos	9	833,8	34	232,9
No consuntivos	8	4.523 (*)	0	0

(*) En el listado oficial de derechos de la DGA consta dos veces un mismo expediente con un caudal otorgado de 1.600 l/s.

En base a lo anterior no sería posible asegurar una oferta hídrica en la cuenca del río Salado, dado que los caudales de derechos otorgados superarían, o estarían en equilibrio, con la recarga estimada en dicha cuenca, además de que no se ha identificado ningún punto afecto al pago de patente por no utilización de las aguas (Res. Exe. N°3592 de la DGA del 29 de diciembre de 2021).

Por último, y como se había indicado anteriormente, durante la visita de terreno se hizo un reconocimiento para corroborar algunos de los derechos mencionados. Se intentaron visualizar dichos puntos según la descripción disponible (sin coordenadas), sin embargo, no se logró visualizar ninguna captación en el recorrido del entorno aguas arriba del río Salado o de la quebrada Jardín, posiblemente debido a las malas condiciones del terreno después del aluvión del 2015.

6 Diagnóstico y conclusiones principales

Una vez realizado el levantamiento en terreno de caudales y parámetros fisicoquímicos en ciertos puntos a lo largo del río Salado y quebrada Jardín, y después de estimada la recarga natural por precipitación en las cuencas de análisis, de manera preliminar se podría llegar a concluir que el caudal superficial que escurre en el río Salado es prácticamente en su totalidad procedente del caudal del Dren de Agua Helada (DAH), con valores en torno a los 45 l/s, esto es debido a:

- 1) Caudales similares al DAH a lo largo del río Salado.

En febrero de 2022 el caudal del DAH fue de 35 l/s y como se puede observar los caudales medidos en el río Salado son muy similares. Antes de la confluencia con la quebrada Jardín los caudales medidos se encuentran en torno a 32 y 43 l/s.

- 2) Aportes de agua superficial reducidos desde la quebrada Jardín.

En la quebrada Jardín se han medido caudales muy variables alrededor de 12 y 27 l/s y se han identificado numerosas ramificaciones en el sector. Posterior a la confluencia, ya en el río Salado, el caudal aumenta ligeramente hasta alcanzar los 48-60 l/s.

- 3) Otros aportes superficiales no identificados.

Durante la visita a terreno, se revisaron otras quebradas aportantes al río Salado y se comprobó que estas estaban secas. Además, no se observó ningún afloramiento o vertiente adicional en el entorno.

- 4) Estabilidad de los parámetros fisicoquímicos.

Los parámetros fisicoquímicos a lo largo del río Salado muestran que no existe una dilución de las aguas por aportes secundarios de otras quebradas o fuentes naturales.

- 5) Recarga por precipitación reducida y conexión a otras cuencas.

El cálculo de la recarga natural por precipitación también arroja un escenario poco favorable ante el cierre del DAH, ya que en el caso de que se produjese un escurrimiento superficial con el caudal calculado, no sería suficiente para cubrir la demanda actual.

Además, parte de la recarga calculada en el sector aguas arriba del río Salado no estaría aportando en el sistema debido a una conexión con el sector del Yacimiento Indio Muerto, según estudios anteriores.

Por otro lado, se ha identificado que la cuenca del río Salado no se encuentra bajo ninguna restricción administrativa por parte de la DGA, en cuanto a decretos de escasez hídrica o zonas de prohibición de nuevos derechos se refiere. Lo anterior no sería coherente con la cantidad de derechos otorgados en la cuenca, ya que existen un total de derechos superficiales concedidos de carácter consuntivo de 833,8 l/s (de los cuales más de 800 l/s se localizarían en el río Salado) y se ha comprobado que el caudal superficial disponible sería de alrededor de 40 l/s en el río Salado en base al presente estudio.

Finalmente, el cierre del DAH supondría, de manera preliminar, la reducción sustancial (sino casi por completo) del escurrimiento superficial del río Salado, lo que podría provocar repercusiones ante los usuarios de los derechos de aguas superficiales aguas abajo, ninguno de los cuales ubicados en la provincia de Chañaral se encuentra en el listado de derechos de aprovechamiento de aguas afectos al pago de patente por no utilización de las aguas (Res. Exe. N°3592 de la DGA del 29 de diciembre de 2021).

Sin embargo, es necesario recalcar que el presente estudio se llevó a cabo en febrero de 2022, periodo de aguas bajas o verano, lo que indica que el caudal estimado supone el caudal base del río Salado y que podría aumentar en otras épocas del año.

7 Recomendaciones

A continuación, se indican las recomendaciones que Amphos 21 propone para continuar con el levantamiento de información respecto al futuro cierre del DAH en futuras etapas:

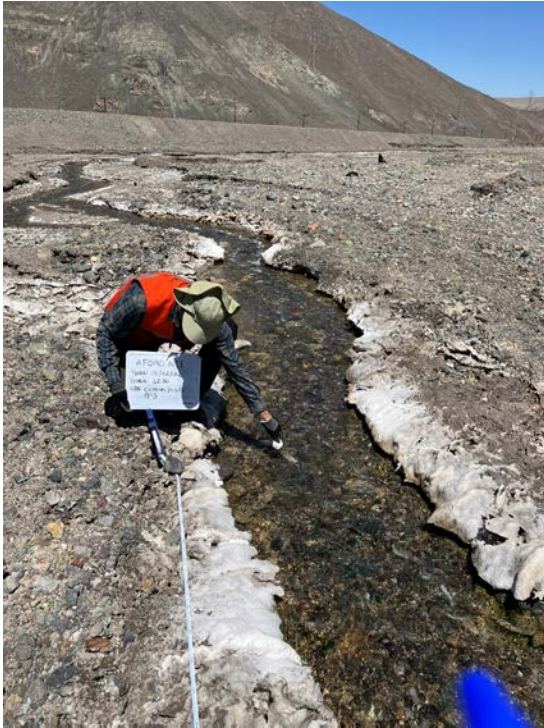
- Como parte de lo indicado en la propuesta técnica de Amphos 21, se recomienda la ejecución de una segunda etapa en la que se realice una visita técnica en periodo de aguas altas (invierno) que puedan generar mayores caudales y poder hacer una comparación con lo observado en la campaña del presente estudio.
- Se recomienda la realización de aforos simultáneos, es decir, la medición de caudal al mismo tiempo en puntos aguas arriba y aguas abajo, para evitar posibles errores de medición por los tiempos de demora y traslado entre un punto y otro.
- Durante la segunda etapa, también se propone la realización de una campaña más detallada y enfocada en la visita a los derechos de aguas superficiales constituidos en el río Salado, que contemple un análisis exhaustivo previo en gabinete de la localización de los puntos de captación a partir de la solicitud de expedientes a la DGA.
- Dada la incertidumbre que existe sobre posibles filtraciones y estado del río Salado entre el DAH y 20-25 km aguas abajo, se recomienda el levantamiento de imágenes a partir de un vuelo de dron en este tramo de difícil acceso.
- Otro aspecto en evaluación podría ser el uso de trazadores de colorantes orgánicos como la fluoresceína, para evaluar cuánto de diluida puede llegar el agua desde el DAH hasta el punto más accesible aguas abajo (próximo al AF-9 de esta campaña).

8 Referencias

- Amphos 21, octubre 2017. Actualización Modelo Hidrogeológico Conceptual. Sector Salvador. DIA Continuidad Operacional Salvador. Preparado para Codelco DSAL.
- Amphos 21, septiembre 2018. Modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca Salar de Pedernales. Estudio de Impacto Ambiental (EIA) Proyecto Rajo Inca. Preparado para Codelco DSAL.
- Codelco - Área Geociencias - Rajo Inca, agosto de 2020. “Nota Técnica Reconocimiento Condición dren Agua Helada Salar de Pedernales”. Vicepresidencia de proyectos – Codelco.
- Custodio y Llamas, 1983. Hidrología subterránea. Segunda edición. Tomo I.
- Departamento de Administración de Recursos Hídricos (DARH), agosto 2009. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos en cuencas de la región de Atacama ubicadas entre el río Copiapó y la región de Antofagasta. S.D.T. N°276.
- DGA-DIHA PUC, 2009. Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile.
- Dirección General de Aguas (DGA), diciembre 2013 Diagnóstico de disponibilidad hídrica en las cuencas altoandinas de la región de Atacama, S.I.T. N°329.
- ENAMI, 2020. DIA Continuidad Operacional Planta Salado.

Anexos

ANEXO – Registro fotográfico campaña aforos



AF-3 – Estimación de velocidad con flotador



AF-3 – Medición velocidades con molinete



AF-6 – Estimación de velocidad con molinete



QEJ-2 – Final QEJ antes confluencia RS



DAH – Vista norte



DAH – Restos de sal sin humedad



DAH – Canalización



QEJ-3 – Primer afloramiento QEJ



AF-8 – Río Salado Ruta C-13



AF-10 – Aforo QEJ



AF-10 – Aforo QEJ



Río Salado post confluencia QEJ