

Nota Técnica N°04: Medición de evaporación y monitoreo hidroquímico

Campaña N°3 de monitoreo trimestral (mayo 2024)

24-10-2024

Versión 0

A21_1115_NT04_v0

1 Introducción

Codelco División Salvador (DSAL) adjudicó a Amphos 21, en septiembre de 2022, el servicio denominado “Medida H-04: Investigación sobre Nuevas Fuentes de Agua en Cuencas de Salares La Isla, Aguilar, Gorbea y Las Parinas”, el cual se enmarca en los diferentes compromisos establecidos en el Avenimiento con el Consejo de Defensa del Estado (CDE) en el proceso Rol D-7-2020 del Primer Tribunal Ambiental de Antofagasta y que, como objetivo principal, debe generar información básica y pública de carácter hidrogeológico en las cuencas de los salares indicados.

Como parte de las actividades del servicio anteriormente mencionado, se considera una campaña de terreno trimestral para la medición de evapotranspiración y calidad de agua, así como también una campaña semestral para la medición de la meteorología y, por último, una campaña anual para la medición de isotopía, con el objetivo de medir de forma periódica parámetros de interés para el análisis de los sistemas acuíferos de las cuencas de los salares en estudio.

En la presente nota técnica se describen las actividades realizadas durante la tercera campaña de terreno, que se llevó a cabo durante el mes de mayo de 2024, la cual consiste en el levantamiento de información a través de un monitoreo hidroquímico y medición de evaporación con domos, distribuidos en las cuencas de los salares de La Isla, Aguilar, Gorbea y Las Parinas.

1.1 Objetivo

El objetivo general del proyecto (Medida H-04) consiste en la realización de un estudio que permita generar información básica para lograr un entendimiento hidrogeológico de los sistemas de las cuencas de los salares de La Isla, Aguilar, Gorbea y Las Parinas.

El objetivo específico de la presente nota técnica corresponde a la presentación de los resultados de la medición de evaporación con domos y del monitoreo hidroquímico correspondiente a la tercera de las campañas trimestrales comprometidas (Campaña N°3).

1.2 Ubicación área de estudio

El área de estudio se enmarca en las cuencas de los salares de La Isla, Aguilar, Gorbea y Las Parinas, ubicados en el extremo noreste de la Alta Cordillera de la Región de Atacama, en el límite con la Región de Antofagasta (oeste), y con la frontera de Argentina (este), a alturas geográficas variables cuyos depocentros se ubican entre los 3.325 y 3.985 m s.n.m., aproximadamente. En la Figura 1-1 se ilustra la ubicación de las cuencas en estudio.

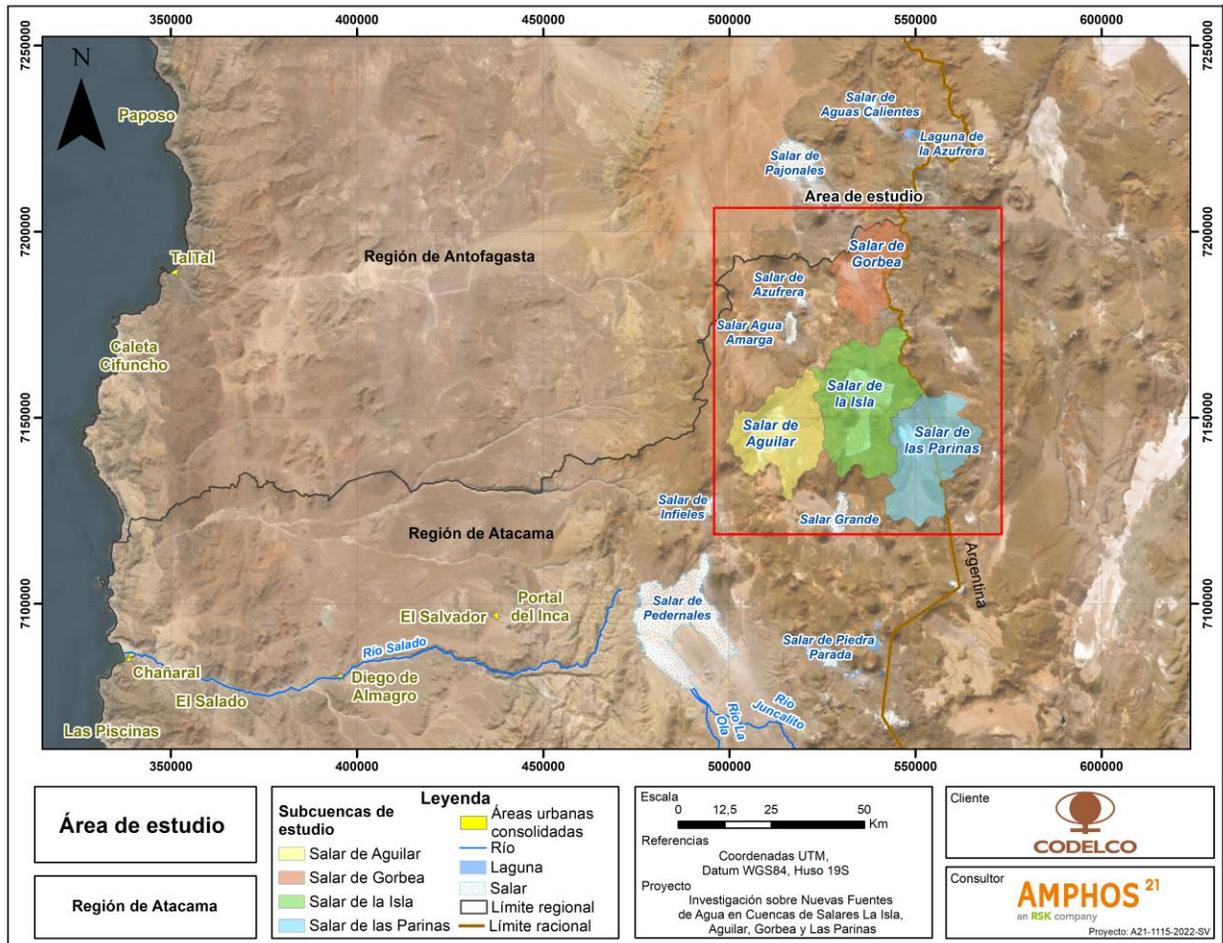


Figura 1-1: Ubicación geográfica salares La Isla, Aguilar, Gorbea y Las Parinas.

2 Metodología

2.1 Medición de evaporación con domos

La metodología utilizada por Amphos 21 para la medición de evaporación con domos consiste en registrar el incremento de vapor de agua en el interior del domo durante el tiempo necesario para lograr su estabilización. Para tener un registro del comportamiento diario de la evaporación en zonas áridas, las mediciones deben realizarse, idealmente, desde la salida del sol hasta poco después del ocaso. Los principales aspectos de la metodología son los siguientes:

- Medir humedad relativa y temperatura, en la manera de lo posible, desde la salida hasta la puesta del sol, de modo de registrar todo el intervalo diario durante el cual la napa evapora.
- Idealmente, realizar mediciones cada 30 minutos, evitando vacíos de registros mayores a 1 hora. La frecuencia de medición depende de las condiciones meteorológicas existentes en el lugar. Si estas no presentan cambios bruscos, el intervalo debe ser a lo sumo de una hora durante las horas de luz.
- Para evitar el ingreso de aire hacia el interior del domo, la superficie del terreno debe aplanarse y rellenarse con arena u otro material en el contorno donde se instalará la cúpula. Adicionalmente, puede instalarse una tela impermeable a lo largo del perímetro de la cúpula (faldón).
- Antes de la medición, ventilar el domo al menos por un minuto, levantándolo verticalmente a un metro del suelo. Prender ventiladores a una velocidad análoga a la del viento en el exterior (utilizando anemómetro ubicado a una altura de 1,5 veces el alto de la cúpula de acrílico y reguladores de voltaje), y chequear estabilidad de la temperatura y de la humedad relativa en el sensor. La velocidad de viento mínima en el interior de la cúpula debe ser cercana a 0,8 m/s y tiene como objetivo homogeneizar la mezcla de aire, evitando la generación de estratificaciones con diferente contenido de humedad.
- Una vez que está todo listo para medir, bajar rápidamente el domo y aprisionar sus bordes con la funda o faldón (ésta queda fija en su posición durante todo el día, enterrando algunos de sus bordes, lo cual se hace generalmente después de la primera medición). Es de suma importancia considerar durante las mediciones el aislamiento del volumen de control, evitando que entre aire desde el exterior.

- Comenzar la medición inmediatamente al bajar el domo, así como el encendido del cronómetro. Cada medición debe durar al menos 2 minutos, y el sensor debe ser programado para registrar la humedad relativa y temperatura cada 1 segundo.
- Se registra sistemáticamente cualquier observación pertinente (hora y evento), como cambios del viento, cambios de nubosidad, errores detectados, coordenadas del punto, etc.

2.2 Toma de muestras de agua para análisis hidroquímico

En cuanto a la metodología utilizada por Amphos 21 para tomar muestras de agua, esta se basa principalmente en los procedimientos normativos vigentes, que establecen los requerimientos mínimos que se deben cumplir para la obtención de muestras representativas de agua para realizar análisis en laboratorio y/o para análisis en campo (in situ), lo cual representa un marco de referencia general para este tipo de trabajos.

Para obtener una muestra representativa de agua superficial, se procede con la siguiente metodología de muestreo:

- Se utiliza un jarro de acrílico para sacar un volumen de agua de al menos 1 litro desde el cuerpo de agua que se requiere muestrear.
- Posteriormente, se utiliza un contenedor limpio y lo suficientemente grande, el cual es ambientado por medio de enjuagues, donde se vacía el agua obtenida anteriormente. Una vez lleno el contenedor, se registra en una cadena de custodia los parámetros fisicoquímicos in situ (Temperatura, pH y Conductividad Eléctrica) y se deja homogenizar la muestra unos 5 minutos para, posteriormente, distribuir en los envases del set de muestreo.

En el caso de una muestra representativa de agua subterránea, se procede con la siguiente metodología de muestreo:

- La muestra se recoge mediante un bailer, el cual previamente debe ser enjuagado con agua desmineralizada. Por medio de una cuerda o piola se desciende el bailer hasta alcanzar el nivel de agua que lo cubra completamente. El bailer debe sumergirse por lo menos 2 metros bajo el nivel de agua estático de pozo y posteriormente se extrae de manera manual. Luego, se procede a vaciar la muestra a un contenedor limpio (ambientado por medio de enjuagues), registrando la cadena de custodia de parámetros fisicoquímicos in situ, y se deja homogeneizar la muestra, para luego distribuir en envases de muestreo, como fue indicado anteriormente.

3 Campaña de terreno

Durante la planificación de la campaña de terreno se proponen 26 puntos de monitoreo hidroquímico, de los cuales 5 puntos se localizan en el salar de Gorbea, 6 puntos en el salar de La Isla, 7 puntos en el salar de Las Parinas y 7 puntos en el salar de Aguilar.

Dentro de los 26 puntos propuestos anteriormente, cada sector presenta un punto *back up* (GOR-BackUp, ISL-BackUp, PAR-BackUp y AGI-BackUp), los cuales corresponden a puntos de respaldo, en el caso de que alguno de los puntos restantes presentara dificultad de acceso.

En la Figura 3-1 se ilustra la distribución espacial de los puntos propuestos para realizar el monitoreo hidroquímico en terreno. Es importante considerar que las coordenadas planteadas son aproximadas, dado que las condiciones de los salares pueden variar dependiendo de la estacionalidad del año. Además, se priorizará tomar muestras de agua subterránea, para una mayor representatividad de estas en el sector.

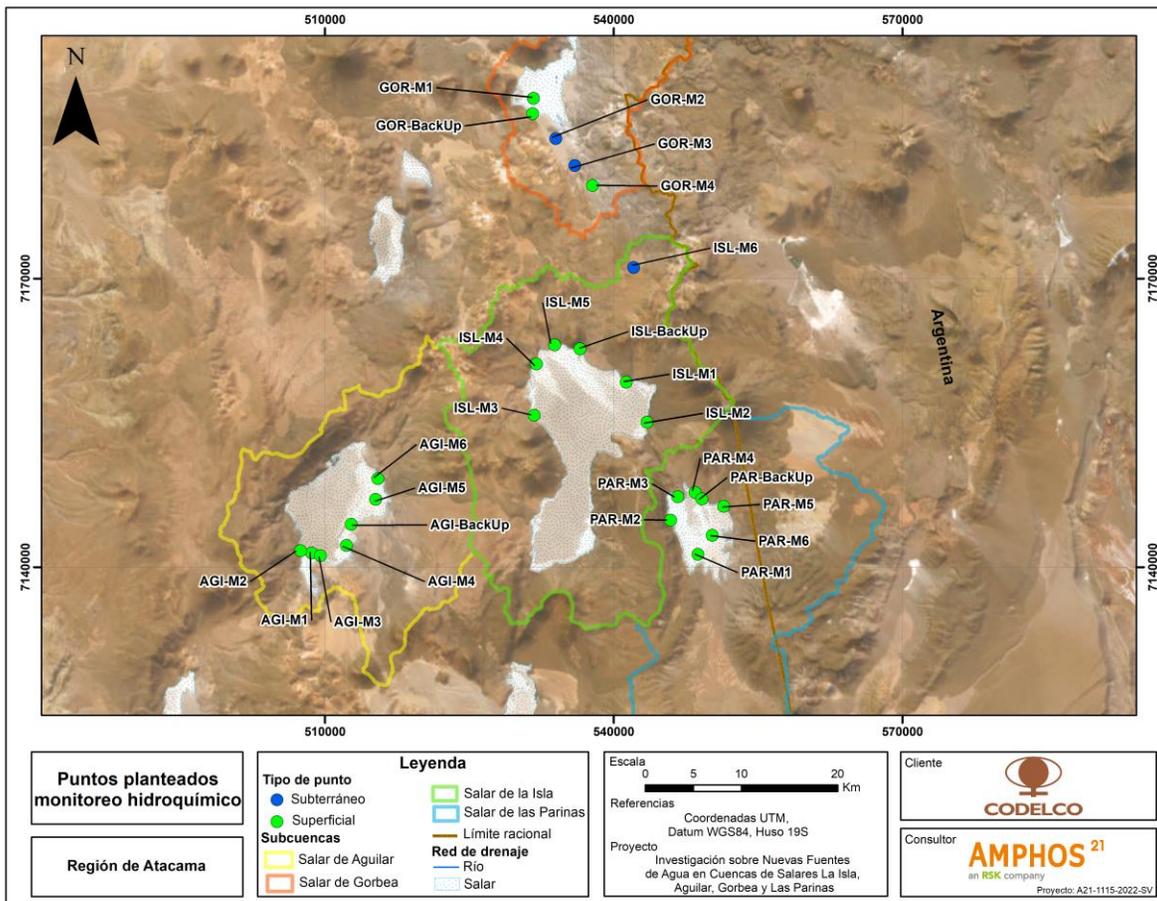


Figura 3-1: Ubicación de puntos planteados para el monitoreo hidroquímico.

La tercera campaña de terreno se llevó a cabo en dos turnos por personal de Amphos 21. El primer turno se realizó entre los días 7 y 14 de mayo, mientras que el segundo turno se realizó entre los días 20 y 30 de mayo. Cada turno se encuentra integrado por 3 personas, dos camionetas 4x4 (traslado y apoyo), una casa rodante para pernoctar, equipos de toma de muestras hidroquímicas, y cuatro domos para medir la evaporación.

En total se realizaron 20 ensayos de evaporación con domos (5 ensayos en cada cuenca) y, además, se llevó a cabo el monitoreo de parámetros fisicoquímicos in situ y análisis hidroquímico en 22 puntos.

Cabe mencionar que el total de muestras hidroquímicas analizadas corresponden a 26, teniendo en cuenta 3 duplicados y un blanco como control de calidad.

3.1 Actividades de terreno primer turno

El primer turno fue realizado entre los días 7 y 14 de mayo de 2024, periodo en el cual se desarrolló un monitoreo hidroquímico en el salar de Gorbea (4 muestras y un duplicado). Además, en el salar de Gorbea se efectuaron 5 mediciones de evaporación con domos. La Figura 3-2 ilustra la ubicación espacial de los puntos monitoreados durante el primer turno de esta campaña.

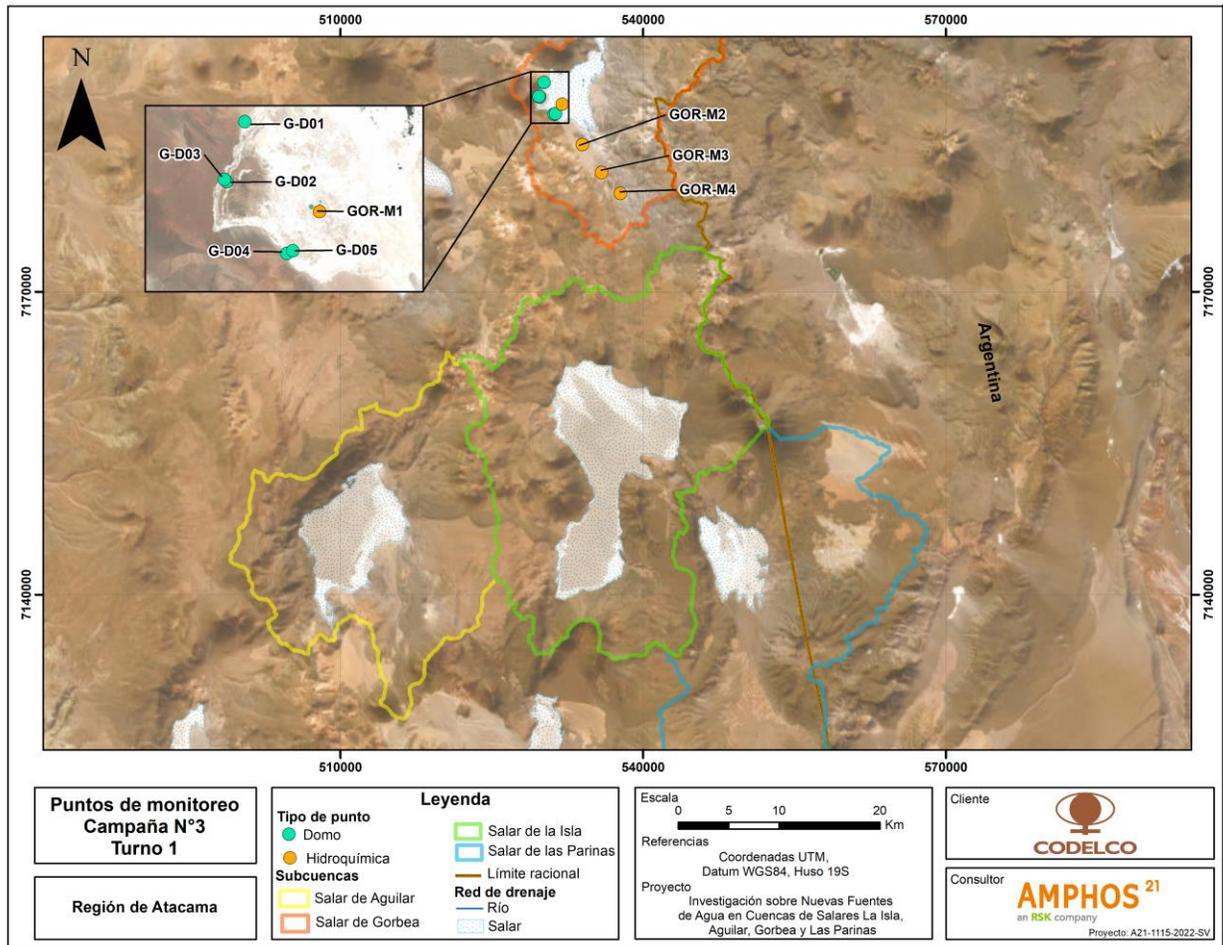


Figura 3-2: Distribución espacial de los puntos monitoreados durante el primer turno.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, a continuación, se presenta el detalle de las actividades realizadas diariamente:

- **7 de mayo:** se realiza el traslado de equipos de trabajo y personal de Amphos 21 desde Santiago hacia Copiapó, donde se efectúa el retiro de la casa rodante y de las camionetas de trabajo. Luego, durante la tarde, se realiza el traslado hacia el salar de Gorbea.
- **8 de mayo:** se inician las actividades en el salar de Gorbea, con ensayos de evaporación en los puntos G-D01, G-D02, G-D03, G-D04 y G-D05.

Los puntos G-D05 y G-D04, ubicados a 170 m de distancia entre ellos, se posicionan sobre evaporita delgada mezclada con yeso, sedimento, ceniza volcánica y arena. El nivel freático del punto G-D04 se encuentra a los 38 cm (medido desde una laguna artificial a 15 m del domo), mientras que el punto G-D05 presenta el nivel freático a los 22 cm

(medido desde una calicata ubicada a 7 m del domo). En cuanto a la temperatura, el punto G-D04 registra la máxima de 12,4°C y nubosidad parcial máxima de 30%, mientras que el punto G-D05 alcanza una temperatura máxima de 12,7°C, registrando una nubosidad parcial máxima de 25%. En ambos puntos el domo percibe radiación directa hasta las 16:00 hrs.

Se realiza el ensayo de evaporación en el punto G-D01, el cual se posiciona sobre evaporita con delgadas capas de yeso que sobreyacen a arcillas con arena. Se registra el nivel freático a los 30 cm. Durante el ensayo, el domo presenta algunas horas con radiación directa y viento constante, el cual alcanza una velocidad máxima de 44,5 km/h, y con una temperatura entre 15,6°C y 25,7°C.

Por su parte, los puntos G-D02 y G-D03 se posicionan sobre una costra salina mezclada con sedimento y arena. En ambos puntos el nivel freático es registrado a los 30 cm (medido desde una calicata). Se registra una temperatura máxima de 25,8°C y nubosidad que alcanza valores de hasta un 50% por la tarde, en consecuencia, en dicho periodo no percibe radiación directa. Además, los puntos G-D02 y G-D03 alcanzan una velocidad máxima de viento de 41,6 y 40,8 km/h respectivamente. La Figura 3-3 muestra el ensayo de evaporación realizado en el punto G-D03.

En paralelo, en el salar de Gorbea se realiza la medición de parámetros fisicoquímicos in situ y toma de muestras de agua para análisis hidroquímico en los puntos GOR-M1, GOR-M2, GOR-M3 y GOR-M4 registrando conductividades de 135.180 $\mu\text{S/cm}$, 3.170 $\mu\text{S/cm}$, 5.780 $\mu\text{S/cm}$ y 25.260 $\mu\text{S/cm}$ respectivamente y los siguientes valores de pH: 3,41 (GOR-M1), 6,05 (GOR-M2), 7,10 (GOR-M3) y 6,90 (GOR-M4). Cabe señalar que en el punto GOR-M2 se realiza un duplicado etiquetado como GOR-MD1. La Figura 3-4 muestra el monitoreo hidroquímico realizado en el punto GOR-M1.



Figura 3-3: Ensayo de evaporación en domo del punto G-D03 ubicado en el salar de Gorbea.

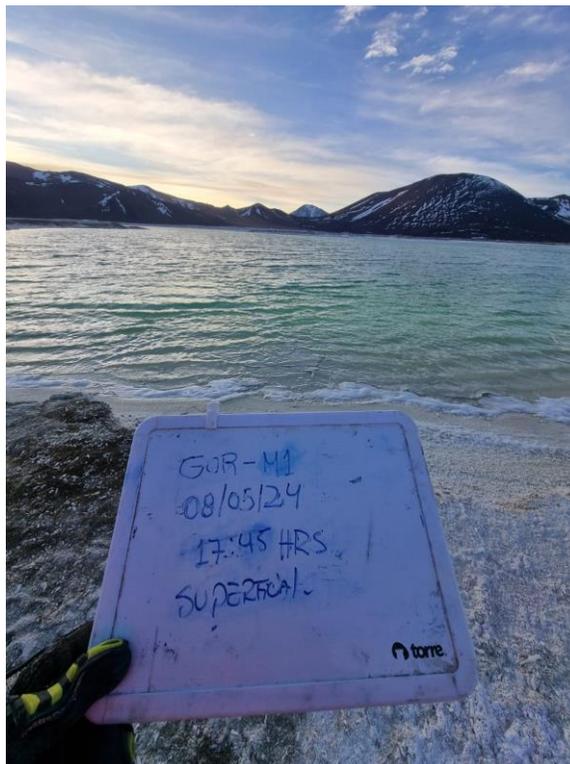


Figura 3-4: Monitoreo hidroquímico en punto de agua superficial GOR-M1 en el salar de Gorbea.

- **9 de mayo:** se realiza el traslado en el salar de Gorbea, instancia en la cual la camioneta DSAL-CAMI-T57 quedó atrapada debido a las condiciones húmedas del camino.
- **10 de mayo:** durante la jornada se reanudan las labores para liberar la camioneta. Adicionalmente, la casa rodante presenta una falla en el paquete de resortes (Figura 3-5).



Figura 3-5: Falla en el paquete de resortes de la casa rodante.

- **11 de mayo:** se efectúa coordinación con grúa en Copiapó, permitiendo trasladar la casa rodante hacia Copiapó (Figura 3-6).



Figura 3-6: Traslado de camioneta desde Salar hacia Copiapó.

- **12 y 13 de mayo:** movilización de los equipos y materiales de terreno hacia Copiapó, posteriormente, se entregan a Estafeta para su traslado hacia Santiago.
- **14 de mayo:** traslado del equipo Amphos 21 desde Copiapó hacia Santiago.

A modo de resumen, en la Tabla 3-1, se presentan las principales características y fechas de medición de los puntos monitoreados durante el primer turno de la Campaña N°3. Además, en el Anexo A se presentan las fichas técnicas de los puntos donde se realizó medición de evaporación, y en el Anexo B se presentan las fichas técnicas correspondientes a los puntos de monitoreo hidroquímico.

Tabla 3-1: Características de puntos monitoreados durante el primer turno.

| Punto | Sector | Medición | Tipo de punto | Este WGS84 (*) | Norte WGS84 (*) | Fecha medición |
|---------|-----------------|--------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|
| G-D02 | Salar de Gorbea | Domo | - | 529.730 | 7.189.292 | 08-05-2024 |
| G-D03 | Salar de Gorbea | Domo | - | 529.675 | 7.189.345 | 08-05-2024 |
| G-D04 | Salar de Gorbea | Domo | - | 531.173 | 7.187.576 | 08-05-2024 |
| G-D05 | Salar de Gorbea | Domo | - | 531.315 | 7.187.639 | 08-05-2024 |
| G-D01 | Salar de Gorbea | Domo | - | 530.166 | 7.190.732 | 08-05-2024 |
| GOR-M1 | Salar de Gorbea | Hidroquímica | Superficial | 531.954 | 7.188.574 | 08-05-2024 |
| GOR-M2 | Salar de Gorbea | Hidroquímica | Subterráneo | 533.967 | 7.184.571 | 08-05-2024 |
| GOR-M3 | Salar de Gorbea | Hidroquímica | Subterráneo | 535.877 | 7.181.803 | 08-05-2024 |
| GOR-M4 | Salar de Gorbea | Hidroquímica | Superficial | 537.748 | 7.179.727 | 08-05-2024 |
| GOR-MD1 | Salar de Gorbea | Hidroquímica | Subterráneo | 533.967 | 7.184.571 | 08-05-2024 |

(*) Coordenadas tomadas en terreno con GPS Garmin.

3.2 Actividades de terreno segundo turno

El segundo turno fue realizado entre los días 20 y 30 de mayo de 2024, periodo en el cual se desarrolló un monitoreo hidroquímico en el salar de Las Parinas (6 muestras y un duplicado), salar de La Isla (6 muestras y un duplicado) y salar de Aguilar (6 muestras y un duplicado). Además, se efectuaron ensayos de evaporación con domos en el salar de Aguilar (5 puntos), salar de La Isla (5 puntos), y salar de Las Parinas (5 puntos). La Figura 3-7 ilustra la ubicación espacial de los puntos monitoreados durante el segundo turno de esta campaña.

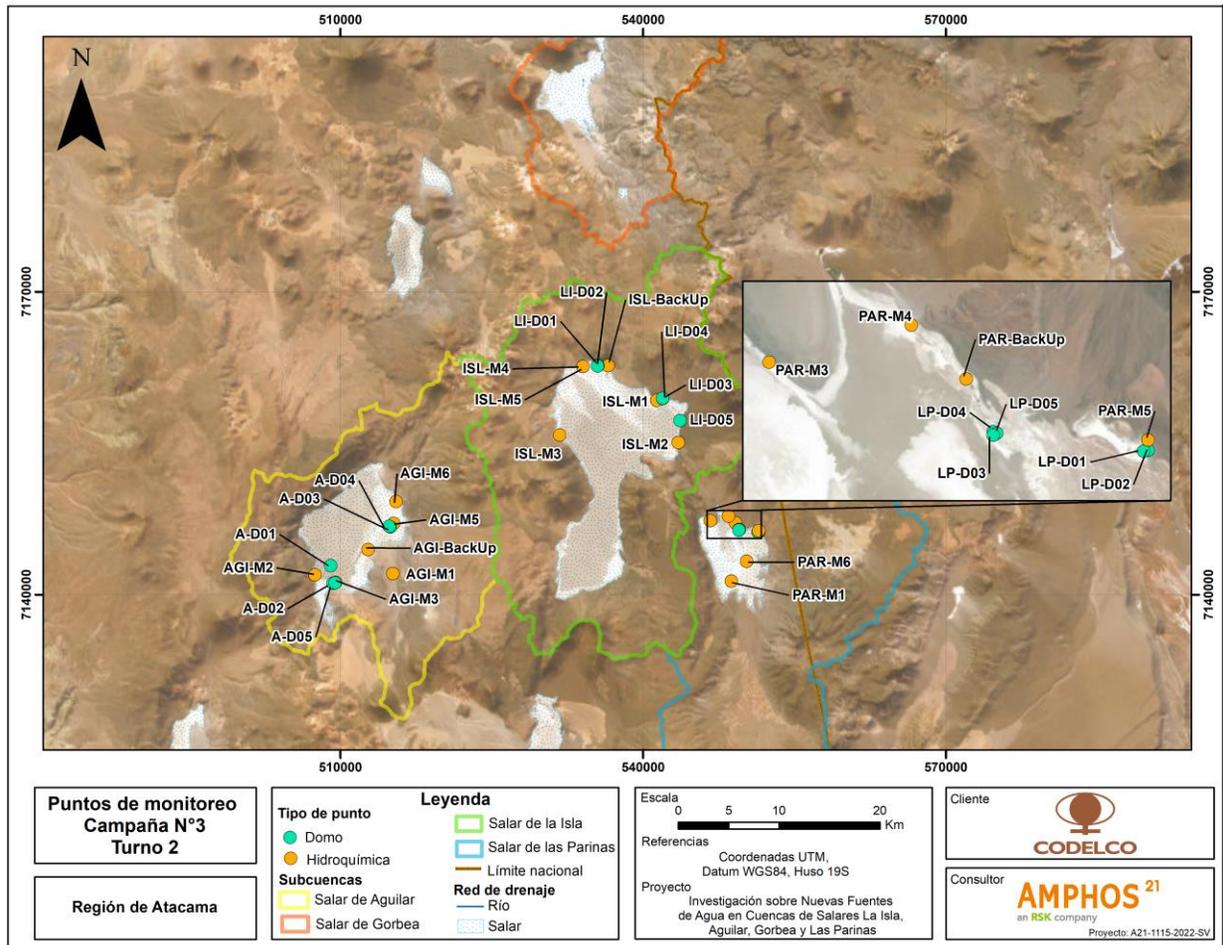


Figura 3-7: Distribución espacial de los puntos monitoreados durante el segundo turno.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, a continuación, se presenta el detalle de las actividades realizadas diariamente:

- **20 de mayo:** se realiza el traslado de equipos de trabajo y personal de Amphos 21 desde Santiago hacia Copiapó, donde se efectúa el retiro de la camioneta de trabajo. Luego, durante la tarde, se realiza el traslado hacia el salar de Las Parinas.
- **21 de mayo:** se inician las actividades en el salar de Las Parinas con ensayos de evaporación en los puntos LP-D02, LP-D01, LP-D03, LP-D04 y LP-D05.

En particular, los puntos LP-D01 y LP-D02 se distancian 55 m aproximadamente entre sí, y se ubican sobre un terreno cubierto por costra salina, material sedimentario y con humedad en la superficie. En ambos puntos se registra el nivel freático a los 2 cm (medido

desde una calicata). La velocidad del viento alcanza un valor máximo de 49,1 km/h por la tarde, y en ambos puntos registran una temperatura máxima de 12,5°C a las 12:30 hrs con una nubosidad máxima de 80% desde las 14:30 hrs, además, el domo no percibió radiación directa.

Adicionalmente, los puntos LP-D03 y LP-D04 se posicionan sobre costra salina mezclada con yeso y alita, mientras que el punto LP-D05 se posiciona sobre un terreno compuesto por sedimentos, arenas, gravas, cenizas y material no consolidado. En dichos puntos se realiza una calicata cercana al punto de ensayo, registrando el nivel freático a los 3 cm. En cuanto a los resultados obtenidos del ensayo, se registra una velocidad de viento máxima de 55 km/h, además, se observa una temperatura entre 8,2°C y 13,4°C, con una nubosidad del 80% durante la tarde, impidiendo la radiación directa al domo. La Figura 3-8 muestra el ensayo de evaporación realizado en el punto LP-D03.

En paralelo, durante el día, el equipo toma 6 muestras de agua del salar Las Parinas para análisis hidroquímico (PAR-M1, PAR-M3, PAR-M4, PAR-M5, PAR-M6 y PAR-BackUp) y una muestra duplicada (PAR-MD2) del punto PAR-M6. Cabe mencionar que se midieron los parámetros fisicoquímicos in situ en todos los puntos visitados, registrando valores de conductividad entre 139.400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 253.300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, exceptuando las muestras de los puntos PAR-M5 y PAR-M6, que presentan conductividades de 55.950 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 18.370 respectivamente. En cuanto al pH, las muestras del salar Las Parinas presentan valores entre 7,1 y 8,5 u pH.



Figura 3-8: Ensayo de evaporación en domo del punto LP-D03 ubicado en el salar de Las Parinas.

- **22 de mayo:** se realiza el traslado hacia el salar de La Isla, donde se toman 3 muestras de agua y se miden los parámetros fisicoquímico in situ en los puntos ISL-M3, ISL-M4 y ISL-M5, registrando valores de conductividad de 241.100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 69.930 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 57.850 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente, y los siguientes valores de pH: 7,8 u pH (ISL-M3), 8,16 u pH (ISL-M4) y 8,32 u pH (ISL-M5).
- **23 de mayo:** se realizan 2 ensayos de evaporación en el salar de La Isla en los puntos LI-D01 y LI-D02.

Los puntos LI-D01 y LI-D02 se posicionan a una distancia de 80 m y se caracterizan por presentar una costra blanda, mezclada principalmente por halita, yeso y arena. En ambos puntos se registra el nivel freático desde el canal del salar, encontrándose a una profundidad cercana a los 22 cm. Se registra una velocidad de viento máxima a las 16:00 hrs de 37 km/h en el punto LI-D01 y de 33 km/h en el punto LI-D02. En cuanto a la temperatura máxima alcanzada, el punto LI-D02 registra 13,9°C y el punto LI-D01 un valor de 13,2°C, además, en ambos puntos la nubosidad parcial aumenta por la tarde, sin embargo, el domo percibe radiación directa durante todo el ensayo.

- **24 de mayo:** se realizan 3 ensayos de evaporación en el salar de La Isla en los puntos LI-D03, LI-D04 y LI-D05.

Los puntos LI-D03 y LI-D04 se distancian 15 m entre sí. El punto LI-D03 se posiciona sobre un terreno de evaporita delgada con una continua capa de arena fina. Por su parte, el punto LI-D04 se posiciona sobre evaporita mezclada con sedimentos. En ambos puntos se registra el nivel freático a los 2 cm (medido desde una calicata). Respecto a los datos obtenidos durante el ensayo, en ambos domos, se identifica que la temperatura máxima es de 11,4°C y presentan velocidades que fluctúan entre 22 y 46 km/h. Además, desde las 15:00 hrs se identifica nubosidad, sin embargo, el domo percibe radiación directa durante todo el ensayo.

Finalmente, el domo del punto LI-D05 se instala sobre suelo cubierto principalmente por evaporita. Además, se realiza una calicata a los 24 m del punto de ensayo registrando el nivel freático a los 5 cm. En cuanto a las mediciones en el domo, se registran velocidades de viento entre 24,5 y 45,4 km/h, además de temperaturas entre 9,2 y 11,4°C y radiación directa durante todo el ensayo. La Figura 3-9 muestra el ensayo de evaporación realizado en el punto LI-D05.



Figura 3-9: Ensayo de evaporación en domo del punto LI-D05 ubicado en el salar de La Isla.

- **25 de mayo:** durante la jornada, en el salar de La Isla se visitan 3 puntos (ISL-BackUp, ISL-M1 y ISL-M2) en los que se toma una muestra de agua para análisis hidroquímico y se miden los parámetros fisicoquímico in situ. Además, se realiza un duplicado (ISL-MD3) del punto ISL-BackUp. En cuanto a los parámetros fisicoquímicos medidos en terreno, los puntos ISL-M1 y ISL-M2 registran valores de conductividad de 217.900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 234.600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente, y valores de pH en torno a 7 u pH. Por su parte, el punto ISL-BackUp, registra una conductividad de 11.040 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y pH de 7,86 u pH.
- **26 de mayo:** se realiza el traslado hacia el salar de Aguilar, donde se realizan ensayos de evaporación en los puntos A-D02 y A-D05, los cuales se posicionan sobre costra salina de alta dureza y rugosidad. En ambos puntos se mide el nivel freático desde una laguna cercana a los puntos de ensayo, cuyo valor se encuentra a una profundidad de 40 cm en el punto A-D02 y 30 cm en el punto A-D05. Respecto a la velocidad de viento, se deja constancia que a partir de las 16:30 hrs la velocidad aumenta alcanzando los 12,4 km/h en el punto A-D02 y 14,2 km/h en el punto A-D05. En cuanto a la temperatura, en ambos domos se registra una máxima de 24°C, sin nubosidad parcial y con radiación directa en los domos.
- **27 de mayo:** se efectúa un ensayo de evaporación en los puntos A-D04 y A-D03, en el salar de Aguilar. El punto A-D03 se ubica sobre costra salina frágil con presencia de yesos y halita, mientras que el punto A-D04 se posiciona sobre terreno cubierto en gran parte

por sedimentos y yeso. En ambos puntos se registra el nivel freático a los 10 cm, medido desde una laguna cercana. En general, en dichos puntos durante la mañana se registra una escasa velocidad de viento, sin embargo, desde las 15:30 hrs el viento comienza a aumentar, alcanzando una máxima de 17,6 km/h. Además, la temperatura fluctúa entre 7,9 y 24,7°C, sin nubosidad parcial, en consecuencia, los domos perciben radiación directa durante todo el ensayo.

- **28 de mayo:** en el salar de Aguilar se desarrolla la medición de parámetros fisicoquímicos in situ y toma de muestra de agua para análisis hidroquímico en el punto AGI-M3 (Figura 3-10), registrando una conductividad eléctrica de 196.800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y valor de pH de 5,2 u pH. Cabe señalar que se toma una muestra de blanco denominada (AGI-MB3).



Figura 3-10: Monitoreo hidroquímico en punto de agua superficial AGI-M3 en el salar de Aguilar.

- **29 de mayo:** se efectúa ensayo de evaporación en el punto A-D01, cuya área de ensayo presenta costra salina de alta dureza y rugosidad. Además, se mide el nivel freático en laguna ubicada a una distancia de 1,5 km desde el punto de ensayo, registrando un valor de 10 cm. La velocidad del viento aumenta gradualmente durante la jornada, con velocidades promedio de 13 km/h. La temperatura registrada varió de 9,5°C por la mañana a 20,4° C, máxima temperatura registrada a las 15:30 hrs. Además, el domo percibe radiación directa durante todo el ensayo.

- **30 de mayo:** se realiza el monitoreo hidroquímico en 5 muestras de agua ubicadas en el salar de Aguilar (AGI-BackUp, AGI-M1, AGI-M2, AGI-M5, AGI-M6). Al respecto, se registran conductividades entre 161.340 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 211.200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a excepción de los puntos AGI-M1 y AGI-M6, cuya conductividad es de 5.630 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 46.780 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente. En cuanto al pH, se registran valores entre 5,68 y 8,04. La Figura 3-11 muestra el monitoreo hidroquímico realizado en el punto AGI-M1.

Por la tarde, se efectúa el traslado de equipos y personal de Amphos 21 desde el salar de Aguilar hacia Copiapó. Posteriormente, se realiza el envío de equipos y muestras de monitoreo hidroquímico hacia Santiago. Luego, personal de Amphos 21 se traslada a su lugar de residencia, dando por finalizada la tercera campaña de monitoreo hidroquímico.



Figura 3-11: Monitoreo hidroquímico en punto de agua subterránea AGI-M1 en el salar de Aguilar.

A modo de resumen, en la Tabla 3-2, se presentan las principales características y fechas de medición de los puntos monitoreados durante la Campaña N°3. Además, en el Anexo A se presentan las fichas técnicas de los puntos donde se realizó medición de evaporación, y en el Anexo B se presentan las fichas técnicas correspondientes a los puntos de monitoreo hidroquímico.

Tabla 3-2: Características de puntos monitoreados durante el segundo turno.

| Punto | Sector | Medición | Tipo de punto | Este WGS84 (*) | Norte WGS84 (*) | Fecha medición |
|------------|----------------------|--------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|
| PAR-BackUp | Salar de las Parinas | Hidroquímica | Superficial | 549.142 | 7.147.094 | 21-05-2024 |
| PAR-M1 | Salar de las Parinas | Hidroquímica | Superficial | 548.746 | 7.141.327 | 21-05-2024 |
| PAR-M3 | Salar de las Parinas | Hidroquímica | Superficial | 546.658 | 7.147.305 | 21-05-2024 |
| PAR-M4 | Salar de las Parinas | Hidroquímica | Superficial | 548.449 | 7.147.771 | 21-05-2024 |
| PAR-M5 | Salar de las Parinas | Hidroquímica | Superficial | 551.431 | 7.146.323 | 21-05-2024 |
| PAR-M6 | Salar de las Parinas | Hidroquímica | Superficial | 550.248 | 7.143.300 | 21-05-2024 |
| PAR-MD2 | Salar de las Parinas | Hidroquímica | Superficial | 550.248 | 7.143.300 | 21-05-2024 |
| LP-D02 | Salar de las Parinas | Domo | - | 551.430 | 7.146.196 | 21-05-2024 |
| LP-D01 | Salar de las Parinas | Domo | - | 551.376 | 7.146.185 | 21-05-2024 |
| LP-D04 | Salar de las Parinas | Domo | - | 549.481 | 7.146.430 | 21-05-2024 |
| LP-D05 | Salar de las Parinas | Domo | - | 549.524 | 7.146.409 | 21-05-2024 |
| LP-D03 | Salar de las Parinas | Domo | - | 549.478 | 7.146.385 | 21-05-2024 |
| ISL-M3 | Salar de La Isla | Hidroquímica | Superficial | 531.718 | 7.155.794 | 22-05-2024 |
| ISL-M4 | Salar de La Isla | Hidroquímica | Superficial | 534.025 | 7.162.590 | 22-05-2024 |
| ISL-M5 | Salar de La Isla | Hidroquímica | Superficial | 534.031 | 7.162.595 | 22-05-2024 |
| ISL-BackUp | Salar de La Isla | Hidroquímica | Superficial | 536.500 | 7.162.673 | 24-05-2024 |
| ISL-M1 | Salar de La Isla | Hidroquímica | Superficial | 541.334 | 7.159.226 | 24-05-2024 |
| ISL-M2 | Salar de La Isla | Hidroquímica | Superficial | 543.490 | 7.155.054 | 24-05-2024 |
| ISL-MD3 | Salar de La Isla | Hidroquímica | Superficial | 536.500 | 7.162.673 | 24-05-2024 |
| LI-D03 | Salar de La Isla | Domo | - | 541.927 | 7.159.417 | 24-05-2024 |
| LI-D04 | Salar de La Isla | Domo | - | 541.922 | 7.159.432 | 24-05-2024 |
| LI-D01 | Salar de La Isla | Domo | - | 535.523 | 7.162.704 | 24-05-2024 |
| LI-D02 | Salar de La Isla | Domo | - | 535.477 | 7.162.629 | 24-05-2024 |
| LI-D05 | Salar de La Isla | Domo | - | 543.661 | 7.157.234 | 24-05-2024 |
| AGI-M3 | Salar de Aguilar | Hidroquímica | Superficial | 509.519 | 7.141.191 | 28-05-2024 |
| AGI-MB3 | Salar de Aguilar | Hidroquímica | - | - | - | 28-05-2024 |
| A-D02 | Salar de Aguilar | Domo | - | 509.249 | 7.141.110 | 28-05-2024 |
| A-D05 | Salar de Aguilar | Domo | - | 509.483 | 7.141.162 | 28-05-2024 |
| A-D04 | Salar de Aguilar | Domo | - | 514.929 | 7.146.680 | 28-05-2024 |
| A-D03 | Salar de Aguilar | Domo | - | 514.834 | 7.146.743 | 28-05-2024 |
| AGI-BackUp | Salar de Aguilar | Hidroquímica | Superficial | 512.725 | 7.144.452 | 30-05-2024 |
| AGI-M1 | Salar de Aguilar | Hidroquímica | Subterráneo | 515.182 | 7.142.080 | 30-05-2024 |

| Punto | Sector | Medición | Tipo de punto | Este WGS84 (*) | Norte WGS84 (*) | Fecha medición |
|--------|------------------|--------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|
| AGI-M2 | Salar de Aguilar | Hidroquímica | Superficial | 507.473 | 7.141.943 | 30-05-2024 |
| AGI-M5 | Salar de Aguilar | Hidroquímica | Superficial | 515.269 | 7.147.056 | 30-05-2024 |
| AGI-M6 | Salar de Aguilar | Hidroquímica | Superficial | 515.495 | 7.149.195 | 30-05-2024 |
| A-D01 | Salar de Aguilar | Domo | - | 509.016 | 7.142.868 | 30-05-2024 |

(*) Coordenadas tomadas en terreno con GPS Garmin.

4 Resultados de análisis hidroquímico

Durante la tercera campaña de terreno se tomaron un total de 22 muestras de agua. Posteriormente, las muestras de agua fueron enviadas al laboratorio certificado SGS S.A. para el análisis hidroquímico de los macroelementos disueltos necesarios para calcular el error del balance iónico (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , NO_3^-), y el total de sólidos disueltos. Además, se analizaron elementos como Litio (Li^+) y Boro (B), dado que son representativos de la zona de estudio, y que habitualmente se presentan en altas concentraciones en ambientes de salares, influyendo en los resultados del balance iónico.

Cabe señalar que para el análisis hidroquímico se consideraron, de forma adicional a las 22 muestras mencionadas, 3 duplicados, uno en el salar de Gorbea (GOR-MD1), uno en el salar de Las Parinas (PAR-MD2) y uno en el salar de La Isla (ISL-MD3), además de 1 blanco en el salar de Aguilar (AGI-MB3).

La Tabla 4-1 muestra los resultados de los cationes y aniones disueltos, además de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en laboratorio correspondientes a las muestras de agua subterráneas y superficiales tomadas durante la tercera campaña de terreno.

Tabla 4-1: Resultados del monitoreo hidroquímico correspondiente a la tercera campaña de terreno.

| Punto | Alcalinidad (mg/l) | B (mg/l) | Ca ²⁺ (mg/l) | Cl ⁻ (mg/l) | CO ₃ ²⁻ (mg/l) | CE (uS/cm) | HCO ₃ ⁻ (mg/l) | K ⁺ (mg/l) | Li ⁺ (mg/l) | Mg ²⁺ (mg/l) | Na ⁺ (mg/l) | NO ₃ ⁻ (mg/l) | pH (upH) | SDT (mg/l) | SO ₄ ²⁻ (mg/l) |
|------------|--------------------|----------|-------------------------|------------------------|--------------------------------------|------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------------------|----------|------------|--------------------------------------|
| AGI-BackUp | 654,1 | 445,00 | 20.584,45 | 96.196,19 | <0,2 | 167.363 | 797,4 | 1.487,84 | 150,12 | 2.348,70 | 27.977,86 | 152,44 | 7,20 | 149.740 | 793,80 |
| AGI-M1 | 125,2 | 7,49 | 288,04 | 307,14 | <0,2 | 2.864 | 152,7 | 11,62 | 1,04 | 70,13 | 225,35 | 10,45 | 7,9 | 2.168 | 812,81 |
| AGI-M2 | 564,0 | 679,29 | 52.533,80 | 245.541,23 | <0,2 | 260.303 | 687,5 | 2.523,18 | 330,19 | 6.272,96 | 55.186,91 | 518,36 | 5,80 | 348.660 | 186,95 |
| AGI-M3 | 760,1 | 710,43 | 55.470,17 | 257.990,27 | <0,2 | 245.959 | 926,6 | 2.990,50 | 346,85 | 6.704,99 | 56.647,49 | 619,11 | 5,90 | 353.000 | 198,28 |
| AGI-M5 | 78,4 | 43,88 | 2.298,12 | 10.087,83 | <0,2 | 26.346 | 95,6 | 149,09 | 18,19 | <0,01 | 2.721,03 | 26,32 | 7,70 | 20.520 | 1.110,96 |
| AGI-M6 | 73,5 | 60,82 | 3.647,57 | 17.226,38 | <0,2 | 39.919 | 89,6 | 258,26 | 26,67 | 159,69 | 4.258,29 | 39,07 | 7,70 | 29.480 | 1.364,35 |
| AGI-MB3 | 8,5 | 0,08 | 2,03 | 0,91 | <0,2 | 123 | 10,3 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | 3,71 | 0,22 | 7,00 | 80 | 6,49 |
| GOR-M1 | <0,2 | 1.566,72 | 1.141,26 | 126.158,05 | <0,2 | 151.715 | <0,2 | 5.470,76 | 263,24 | 24.742,30 | 41.861,32 | <0,01 | 1,80 | 236.980 | 62.162,82 |
| GOR-M2 | <0,2 | 2,71 | 409,96 | 154,64 | <0,2 | 3.472 | <0,2 | 24,54 | 0,94 | 40,19 | 166,49 | <0,01 | 4,30 | 3.744 | 1.294,08 |
| GOR-M3 | 2,9 | 3,88 | 452,00 | 136,63 | <0,2 | 3.268 | 3,6 | 40,76 | 0,56 | 82,47 | 215,97 | 2,13 | 5,20 | 2.932 | 1.701,33 |
| GOR-M4 | <0,2 | 5,11 | 483,99 | 157,88 | <0,2 | 4.655 | <0,2 | 102,97 | 0,48 | 152,84 | 403,06 | 4,72 | 4,10 | 2.212 | 2.970,73 |
| GOR-MD1 | <0,2 | 2,31 | 410,62 | 90,14 | <0,2 | 2.414 | <0,2 | 22,02 | 0,59 | 35,75 | 133,92 | <0,01 | 4,30 | 1.114 | 1.203,95 |
| ISL-BackUp | 29,9 | 6,62 | 29,70 | 3.142,08 | <0,2 | 10.765 | 36,5 | 176,15 | 17,28 | <0,01 | 1.905,19 | 6,47 | 7,50 | 8.160 | 581,21 |
| ISL-M1 | 121,3 | 225,02 | 688,26 | 173.350,53 | <0,2 | 223.682 | 147,9 | 5.465,57 | 576,93 | 3.421,24 | 73.850,64 | <0,01 | 7,10 | 201.900 | 9.147,89 |
| ISL-M2 | 109,9 | 132,51 | 254,17 | 98.798,42 | <0,2 | 172.219 | 134,0 | 3.290,89 | 342,61 | 1.920,09 | 46.139,81 | <0,01 | 7,30 | 129.740 | 5.239,45 |
| ISL-M3 | 146,4 | 217,20 | 377,77 | 214.531,72 | <0,2 | 239.498 | 178,4 | 5.358,57 | 569,88 | 3.349,68 | 94.234,05 | <0,01 | 7,00 | 240.700 | 8.951,41 |
| ISL-M4 | 105,1 | 37,34 | 276,74 | 28.013,22 | <0,2 | 59.933 | 128,1 | 883,85 | 94,58 | 240,31 | 11.836,68 | 10,28 | 7,70 | 34.140 | 2.208,76 |
| ISL-M5 | 127,2 | 38,81 | 724,58 | 19.082,37 | <0,2 | 44.723 | 155,0 | 702,59 | 64,97 | 72,01 | 8.680,79 | <0,01 | 7,60 | 26.460 | 3.306,37 |
| ISL-MD3 | 49,1 | 6,21 | 2,20 | 3.295,50 | <0,2 | 10.790 | 59,9 | 168,59 | 17,63 | <0,01 | 1.796,60 | 6,76 | 7,70 | 5.048 | 595,71 |
| PAR-BackUp | 656,4 | 303,88 | 356,19 | 206.651,75 | <0,2 | 274.928 | 800,1 | 3.141,57 | 185,84 | 1.611,34 | 104.192,7 | 11,50 | 7,50 | 245.400 | 8.823,61 |
| PAR-M1 | 617,6 | 159,25 | 95,54 | 68.167,28 | <0,2 | 140.961 | 752,8 | 1.372,59 | 84,71 | 459,16 | 38.184,65 | <0,01 | 8,20 | 111.600 | 3.098,43 |
| PAR-M3 | 357,1 | 256,26 | 576,94 | 140.742,64 | <0,2 | 211.360 | 435,4 | 2.932,09 | 195,59 | 1.683,33 | 66.860,75 | <0,01 | 7,50 | 202.620 | 7.292,76 |

| Punto | Alcalinidad (mg/l) | B (mg/l) | Ca ²⁺ (mg/l) | Cl ⁻ (mg/l) | CO ₃ ²⁻ (mg/l) | CE (uS/cm) | HCO ₃ ⁻ (mg/l) | K ⁺ (mg/l) | Li ⁺ (mg/l) | Mg ²⁺ (mg/l) | Na ⁺ (mg/l) | NO ₃ ⁻ (mg/l) | pH (upH) | SDT (mg/l) | SO ₄ ²⁻ (mg/l) |
|---------|--------------------|----------|-------------------------|------------------------|--------------------------------------|------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------------------|----------|------------|--------------------------------------|
| PAR-M4 | 571,2 | 595,08 | 225,42 | 228.981,51 | <0,2 | 254.058 | 696,3 | 7.836,05 | 555,89 | 4.963,39 | 106.708,5 | <0,01 | 7,10 | 334.680 | 16.113,68 |
| PAR-M5 | 544,5 | 46,68 | 178,86 | 23.271,61 | <0,2 | 53.567 | 663,7 | 473,50 | 33,23 | <0,01 | 11.039,08 | 5,97 | 7,80 | 37.580 | 1.418,17 |
| PAR-M6 | 207,2 | 16,48 | 108,85 | 5.471,22 | <0,2 | 16.782 | 252,6 | 200,47 | 12,27 | <0,01 | 3.286,03 | 11,27 | 8,10 | 9.480 | 414,23 |
| PAR-MD2 | 165,2 | 16,67 | 114,21 | 6.038,41 | <0,2 | 17.082 | 201,4 | 175,98 | 11,42 | <0,01 | 3.135,27 | 11,70 | 8,30 | 14.500 | 437,04 |

Nota: en rojo se indican aquellos parámetros que se detectaron como fuera de tendencia respecto a los resultados obtenidos en las campañas previas.

4.1 Control de calidad

Para verificar los resultados obtenidos de laboratorio de los elementos químicos disueltos se comprueba el principio de la electroneutralidad, es decir, que la suma de los aniones disueltos debe ser igual a los cationes disueltos.

Considerando lo anterior, se estima la diferencia porcentual entre la suma de cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Li^+ y B) y de aniones (HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-}) (Tabla 4-2). Al respecto, ninguno de los puntos analizados en el laboratorio supera una diferencia porcentual del 20%, por lo que los análisis químicos realizados por el laboratorio se consideran fidedignos. Cabe mencionar que en el caso de los salares estudiados, se podría admitir un error de balance de hasta 15-20%, debido a que podrían existir parámetros fuera de la batería de análisis que incidan en dicho error.

Tabla 4-2: Error porcentual calculado por Amphos 21.

| Nombre punto | Diferencia (%) |
|--------------|----------------|
| AGI-BackUp | 2,09 |
| AGI-M1 | 11,28 |
| AGI-M2 | 8,61 |
| AGI-M3 | 8,84 |
| AGI-M5 | 10,09 |
| AGI-M6 | 11,63 |
| AGI-MB3 | 0,10 |
| GOR-M1 | 3,49 |
| GOR-M2 | 0,50 |
| GOR-M3 | 0,56 |
| GOR-M4 | 6,50 |
| GOR-MD1 | 3,82 |
| ISL-BackUp | 3,95 |
| ISL-M1 | 14,25 |
| ISL-M2 | 10,45 |
| ISL-M3 | 14,35 |
| ISL-M4 | 16,86 |
| ISL-M5 | 14,03 |
| ISL-MD3 | 9,70 |

| Nombre punto | Diferencia (%) |
|--------------|----------------|
| PAR-BackUp | 10,47 |
| PAR-M1 | 5,09 |
| PAR-M3 | 11,83 |
| PAR-M4 | 10,47 |
| PAR-M5 | 13,87 |
| PAR-M6 | 1,03 |
| PAR-MD2 | 8,06 |

5 Resultados ensayos de evaporación

En este capítulo se presentan las series diarias de evaporación obtenidas mediante el método del domo aplicado en el salar.

En la Figura 5-1, se muestran los resultados de evaporación correspondientes a los ensayos realizados en el salar de Aguilar. Los valores observados son similares a los registrados durante la segunda campaña, con máximos instantáneos cercanos a 0,080 mm/hora. Sin embargo, cabe mencionar el ensayo A-D01, donde se muestra un *peak* de evaporación alrededor de las 10:00 horas y una menor evaporación el resto del día en comparación con los otros puntos, este comportamiento podría deberse, además de las menores temperaturas registradas ese día, al deshielo en las primeras horas de la mañana.

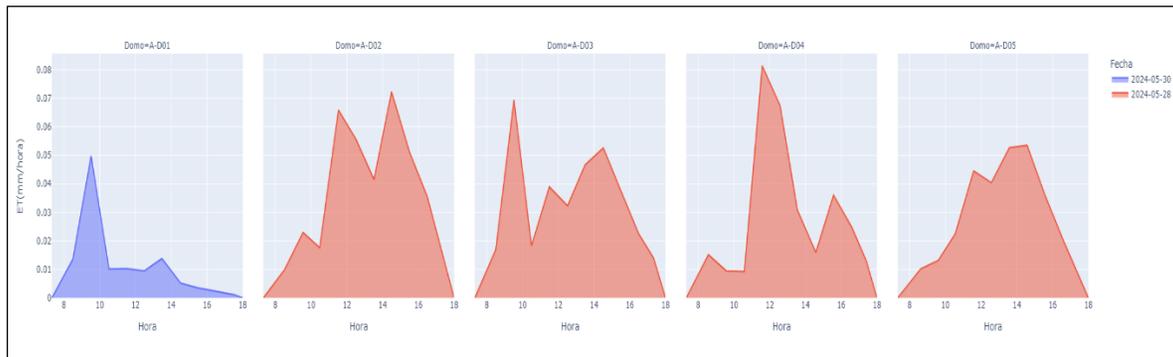


Figura 5-1: Series diarias de ensayos de evaporación de domos en el salar de Aguilar.

Por otro lado, en la Figura 5-2 se muestran los resultados de los ensayos realizados en el salar de Gorbea, todos efectuados el 08 de mayo de 2024. Cabe destacar que todos los ensayos presentaron *peaks* de evapotranspiración instantánea cercanos a las 10:00 horas, con valores máximos alrededor del mediodía. Además, la distribución horaria y total diario es similar en todos los ensayos.

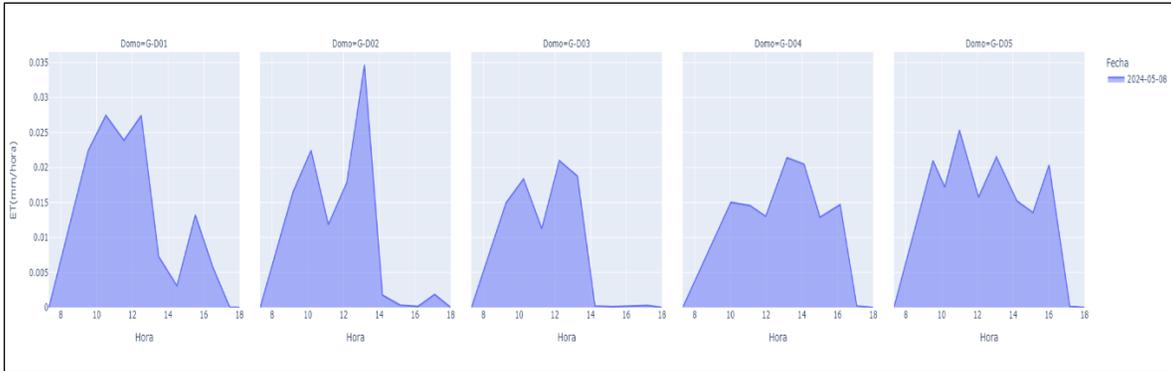


Figura 5-2: Series diarias de ensayos de evaporación de domos en el salar de Gorbea.

En la Figura 5-3 se presentan los resultados de evaporación obtenidos mediante domos en el salar La Isla. Dado que los ensayos se realizaron el mismo día, se observa una concentración de la evaporación principalmente entre las 10:00 y las 15:00 horas. La mayoría de los ensayos alcanzaron valores instantáneos de aproximadamente 0,03 mm/hora, con la excepción del ensayo LI-D05, que mostró valores significativamente menores. Al comparar estos resultados con los de las campañas anteriores, se puede notar que son inferiores tanto a los de la primera campaña (enero) como a los de la segunda (febrero-marzo), lo que sugiere un comportamiento estacional influenciado por las variaciones de temperatura.

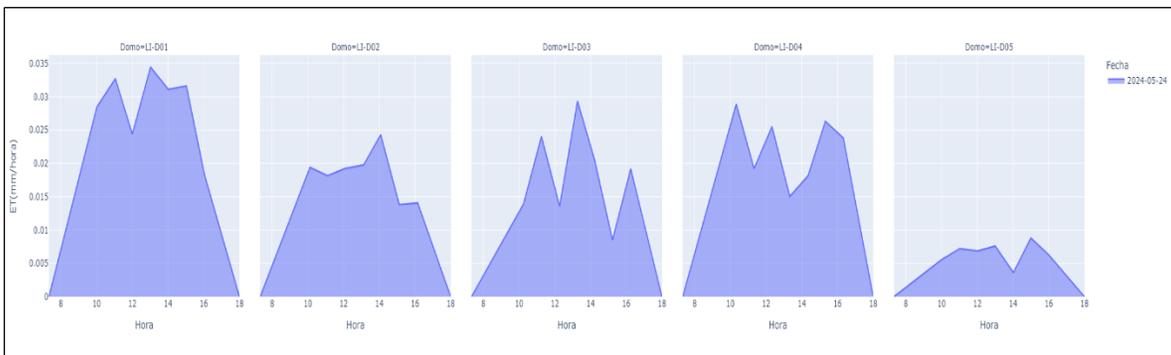


Figura 5-3: Series diarias de ensayos de evaporación de domos en el salar La Isla.

En la Figura 5-4 se muestran los resultados de los ensayos de domos en el salar de Las Parinas. Se puede observar que, aunque en general los valores son inferiores a los de las campañas anteriores, probablemente debido a la influencia de la variación estacional, existen patrones similares. Por ejemplo, el ensayo LP-D02 presenta los valores más elevados, junto con el ensayo LPS-D01. En cambio, los ensayos LP-D03 y LP-D04 muestran valores menores y similares entre sí. Al igual que en la primera campaña, el ensayo LP-D05 vuelve a registrar el valor más bajo tanto en la evaporación instantánea como en la diaria.

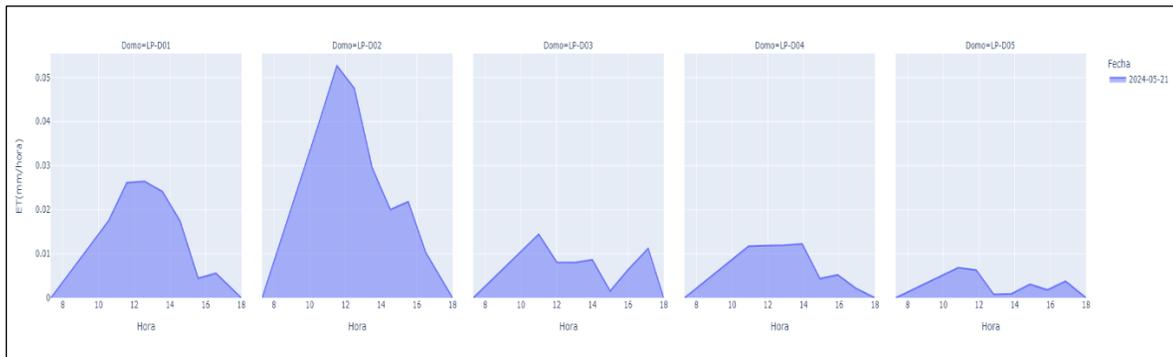


Figura 5-4: Series diarias de ensayos de evaporación de domos en el salar Las Parinas.

Cabe mencionar que una vez se disponga de los ensayos de la cuarta campaña, se realizarán las comparaciones oportunas para observar el comportamiento a lo largo del año y evidenciar cambios estacionales.

Anexo A. Fichas técnicas de medición de evaporación en domos (Campaña N°3)

Anexo B. Fichas técnicas de monitoreo hidroquímico (Campaña N°3)

Anexo C. Informes de resultados de análisis de laboratorio