

Nota Técnica N°06: Medición de evaporación y monitoreo hidroquímico

Campaña N°5 de monitoreo trimestral (diciembre 2024)

02-05-2025

Versión 0

A21_1115_NT06_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 quinta campaña de terreno, que se llevó a cabo durante el mes de diciembre 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 quinta de las campañas trimestrales comprometidas (Campaña N°5).

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.

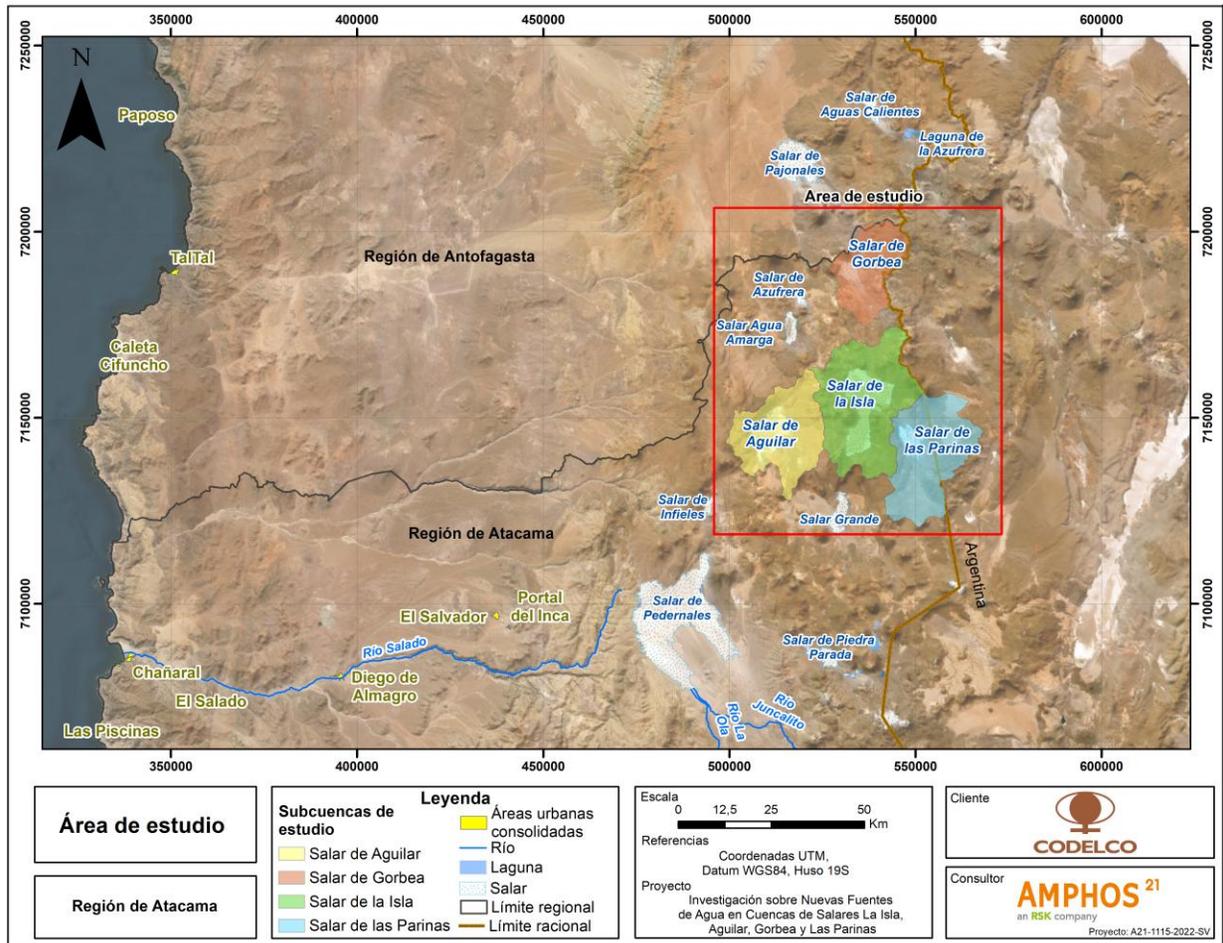


Figura 1–1: Ubicación geográfica salares La Isla, Aguilar, Gorbea y Las Parinas.

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 medida 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, 7 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.

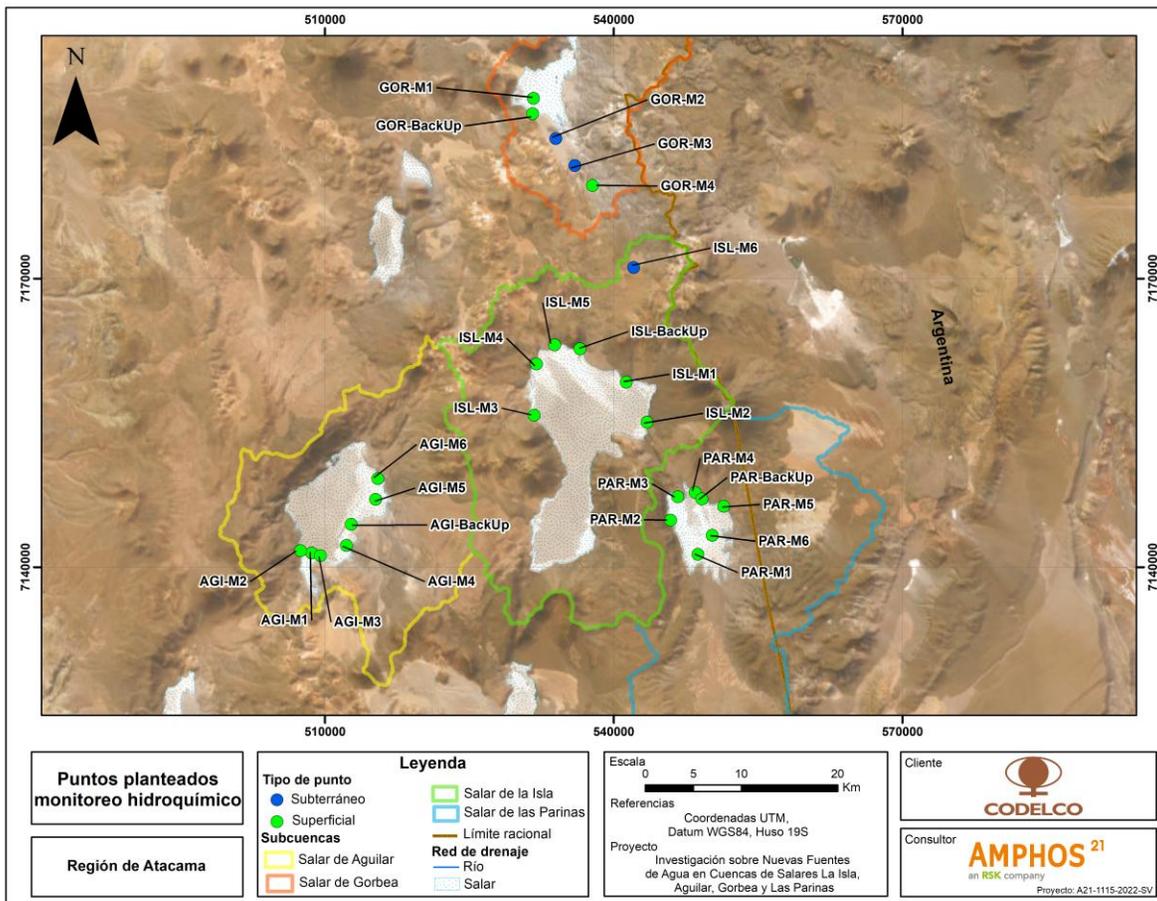


Figura 3–1: Ubicación de puntos planteados para el monitoreo hidroquímico.

La quinta campaña de terreno se desarrolló entre los días 2 y 11 de diciembre de 2024 por personal de Amphos 21, contemplando un turno de 10x10, el cual se encuentra integrado por 4 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 19 puntos.

Cabe mencionar que el total de muestras hidroquímicas analizadas corresponden a 23, teniendo en cuenta 3 duplicados y un blanco como control de calidad.

3.1 Actividades de terreno

De forma específica y detallada, durante la quinta campaña de terreno se visitaron 9 puntos en el salar de Gorbea, donde se realizaron 5 ensayos de evaporación con domo, se tomaron 4 muestras para análisis hidroquímico y una muestra duplicada de parámetros hidroquímicos.

En el salar de Aguilar se visitaron 11 puntos, donde se realizaron 5 ensayos de evaporación con domo y se tomaron 6 muestras para análisis hidroquímico.

Por su parte, en el salar de La Isla se visitaron 11 puntos, donde se realizaron 5 ensayos de evaporación con domo, se tomaron 6 muestras para análisis hidroquímico, una muestra duplicada de parámetros hidroquímicos y una muestra de blanco.

Finalmente, en el salar de Las Parinas se visitaron 11 puntos, de los cuales 5 se destinaron a ensayos de evaporación con domo y 3 a la toma de muestras de agua para análisis hidroquímico. No fue posible recolectar todas las muestras previstas debido a la ausencia de agua en uno de los puntos designados y a la presencia de una gran cantidad de flamencos en periodo de anidación.

La Figura 3–2 ilustra la ubicación espacial de los puntos monitoreados durante la Campaña N°5.

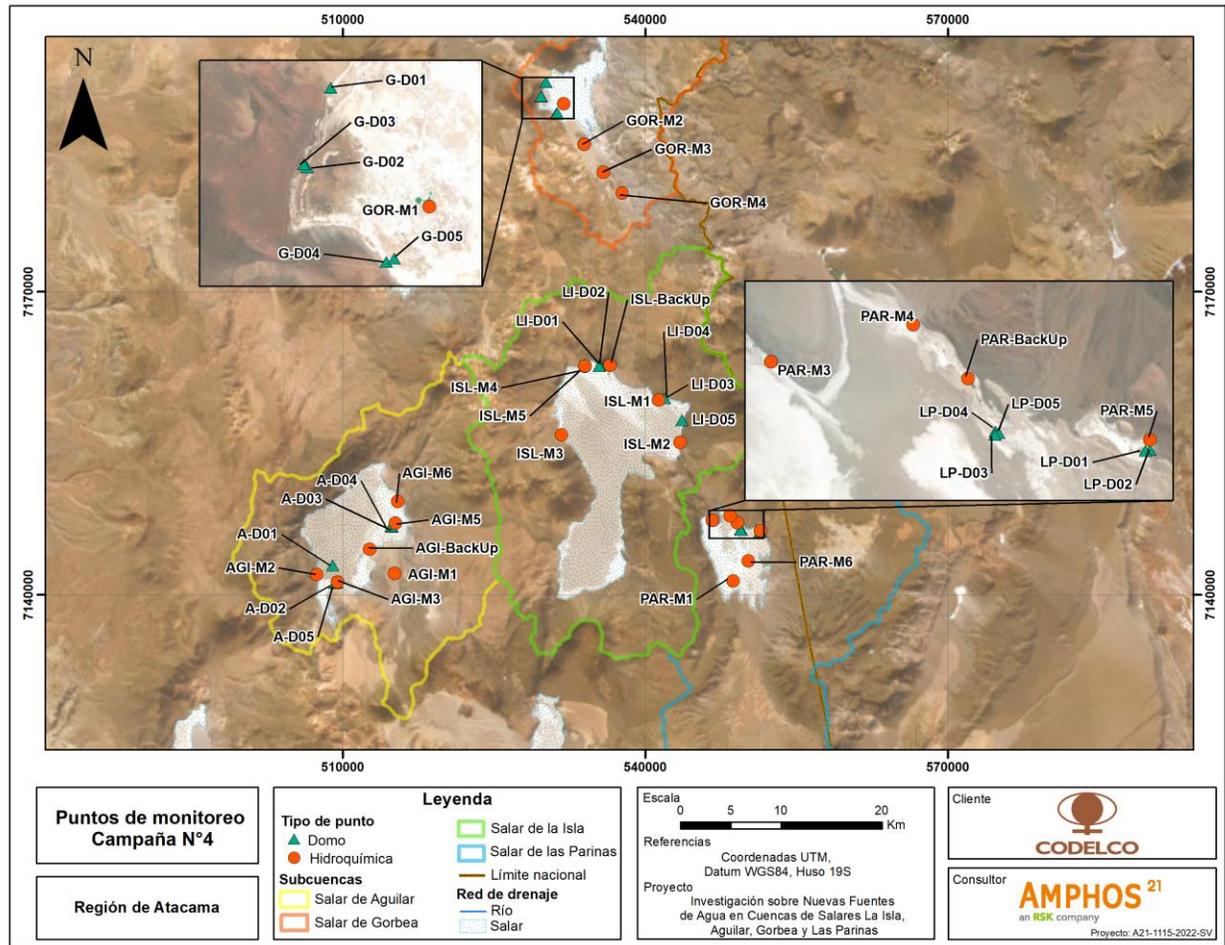


Figura 3–2: Distribución espacial de los puntos monitoreados durante la quinta campaña de terreno.

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

- **2 de diciembre:** 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 campamento ENAMI Salares Altoandinos.
- **3 de diciembre:** se realiza el traslado hacia el salar de Aguilar, donde se realizan los ensayos de evaporación con domos en los puntos A-D01, A-D02, A-D03, A-D04 y A-D05.

En particular, los puntos A-D01, A-D02 y A-D05 se encuentran sobre una costra salina de alta dureza y rugosidad. Se mide el nivel freático desde una laguna cercana a los puntos de ensayo, cuyo valor es de 27 cm en A-D05, de 10 cm en A-D01 y 40 cm A-D02. La

velocidad del viento alcanza un valor máximo de 33,2 km/h en los tres domos. En cuanto a la temperatura, en los puntos A-D01 y A-D02 se registra una máxima de alrededor de 26 °C y en el punto A-D05 se presenta una máxima de 21,3 °C, sin nubosidad parcial y con radiación directa constante durante el ensayo en los tres domos.

Adicionalmente, los puntos A-D03 y A-D04, separados por aproximadamente 115 metros, presentan las siguientes características: 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 un terreno compuesto en gran parte de costra salina blanda con sedimentos y yeso. En ambos puntos se registra el nivel freático a los 10 cm, medido desde una laguna cercana. Alrededor de las 14:15 hrs, la velocidad del viento comienza a aumentar alcanzando una máxima de 33,2 km/h en ambos puntos. En cuanto a la temperatura, esta alcanza un valor máximo de 26 °C en A-D03 y A-D04. La Figura 3–3 muestra el ensayo de evaporación realizado en el punto A-D03.



Figura 3–3: Ensayo de evaporación en domo del punto A-D03 ubicado en el salar de Aguilar.

- **4 de diciembre:** se inicia el traslado hacia el salar de La Isla, donde se realizan 5 ensayos de evaporación con domos en los puntos LI-D01, LI-D02, LI-D03, LI-D04 y LI-D05.

Los puntos LI-D01 y LI-D02 se encuentran separados por una distancia de 80 m y el suelo se caracteriza por presentar una costra blanda, compuesta por una mezcla de halita, yeso y arena. En ambos puntos se registra el nivel freático desde el canal del salar, encontrándose a una profundidad de 25 cm en LI-D01 y de 20 cm en LI-D02. Alrededor

de las 17:20 hrs. se registra una velocidad de viento máxima de 33,8 km/h en ambos puntos. En cuanto a la temperatura máxima alcanzada, en ambos puntos se registra un valor de 22,3 °C en torno a las 10:30 hrs. Además, los domos perciben radiación directa durante todo el ensayo, dado que la nubosidad se mantiene inferior al 5%. La Figura 3–4 muestra el ensayo de evaporación realizado en el punto LI-D02.

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 5 cm desde una calicata. Respecto a los datos obtenidos durante el ensayo en ambos domos, se identifica que la temperatura máxima se alcanza alrededor de las 10:30 hrs. con un valor de 23,6 °C, mientras que la velocidad del viento alcanza máximos de 33,8 km/h en LI-D03 y LI-D04. Además, el domo recibe 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 una distancia de 24 m del punto de ensayo registrando el nivel freático a los 10 cm. En cuanto a las mediciones en el domo, se registran velocidades de viento con un valor máximo de 33,8 km/h a las 17:30 hrs, además de temperaturas máximas de 23,6 °C y radiación directa durante todo el ensayo.



Figura 3–4: Ensayo de evaporación en domo del punto LI-D02 ubicado en el salar de La Isla.

- **5 de diciembre:** se realizan 5 ensayos de evaporación con domos en el salar de Las Parinas (LP-D01, LP-D02, 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 delgada seguida de material sedimentario y con humedad en la superficie. En ambos puntos se registra el nivel freático a los 2 cm. La velocidad del viento alcanza un valor máximo de 44,6 km/h por la tarde, y en ambos puntos registran una temperatura máxima de 18,8 °C alrededor de las 12:30 hrs. Durante el ensaño se presenta una nubosidad del 60 - 90 %, haciendo que los domos no reciban radiación directa.

Adicionalmente, los puntos LP-D03 y LP-D04, separados por 10 m entre sí, se posicionan sobre costra salina compuesta por una mezcla de yeso y halita, mientras que el punto LP-D05 se posiciona sobre un terreno compuesto por sedimentos, arenas, gravas, cenizas y material no consolidado. En dichos puntos registra el nivel freático a los 3 cm. En cuanto a los resultados obtenidos del ensayo, se registra una velocidad de viento máxima de 44,6 km/h, además, se observa una temperatura entre 14,5 °C y 18,8 °C, con nula nubosidad durante todo el ensayo. La Figura 3–5 muestra el ensayo de evaporación realizado en el punto LP-D03.



Figura 3–5: Ensayo de evaporación en domo del punto LP-D03 ubicado en el salar de Las Parinas.

- **6 de diciembre:** 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 37 cm, mientras que el punto G-D05 presenta el nivel freático a los 19 cm. En cuanto a la temperatura, ambos puntos registran un valor máximo de 25,3 °C a las 14:35 hrs. y una velocidad del viento máxima de 42,1 km/h a las 17:20 hrs. Los domos reciben radiación directa durante todo el ensayo, con una nubosidad inferior al 10%.

Por su parte, el punto G-D01, se posiciona sobre una delgada capa de evaporita con yeso, que sobreyace a arcillas con arena y registra un nivel freático a los 30 cm. Durante el ensayo, el domo recibe radiación directa constante, además, el viento alcanza una velocidad máxima de 42,1 km/h, y se registra una temperatura entre 16,7 °C y 25,3 °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. Se registra una temperatura máxima de 25,3 °C y una nubosidad de 0 - 5 %. Además, en los puntos G-D02 y G-D03 se alcanza una velocidad máxima de viento de 42,1 km/h. La Figura 3-6 muestra el ensayo de evaporación realizado en el punto G-D02.



Figura 3-6: Ensayo de evaporación en domo del punto G-D02 ubicado en el salar de Gorbea.

- **9 de diciembre:** se efectúa el traslado hacia el salar de La Isla, donde se realiza la medición de parámetros in situ y la toma de muestras de agua para análisis hidroquímico en 6 puntos de monitoreo (ISL-M1, ISL-M2, ISL-M3, ISL-M4, ISL-M5 y ISL-BackUp), adicionalmente, se recolecta una muestra duplicada (ISL-MD3) para análisis hidroquímico en el punto ISL-BackUp.

Los valores de conductividad superan los 200.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en los puntos ISL-M1 y ISL-M3, por otro lado, la medición en ISL-M2 es de 154.700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que en los puntos ISL-M4 y ISL-M5 la conductividad se encuentra en torno a 44.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y finalmente en el punto ISL-BackUp la medición es de 10.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En cuanto al pH, los valores se encuentran en un rango entre 6,6 a 7,4 en todos los puntos de monitoreo. La Figura 3–7 muestra el monitoreo hidroquímico realizado en el punto ISL-M5.

Se realiza el traslado desde el salar de La Isla hacia el salar de Aguilar, donde se visitan 6 puntos en los que se toma una muestra de agua y se miden los parámetros fisicoquímicos in situ (AGI-BackUp, AGI-M1, AGI-M2, AGI-M3, AGI-M5 y AGI-M6).

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos medidos en terreno, se registran valores de conductividad entre 168.800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 216.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con excepción de los puntos AGI-M6 y AGI-M1, con mediciones de 42.430 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 4.103 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Por otra parte, se registran valores de pH en un rango de 5,3 a 8,0.



Figura 3–7: Monitoreo hidroquímico en punto de agua superficial ISL-M5 en el salar de La Isla.

- **10 de diciembre:** se inicia el traslado hacia el salar Las Parinas, donde se toman 3 muestras de agua para análisis hidroquímico (PAR-M3, PAR-M4 y PAR-BackUp). Por otro lado, no es posible recolectar la muestra PAR-M5, debido a que no había agua en el punto designado y, de la misma forma, no se puede recolectar las muestras PAR-M1 y PAR-M6, debido a la presencia de una gran cantidad de flamencos en periodo de anidación (Figura 3–8).



Figura 3–8: Flamencos en periodo de anidación en puntos PAR-M1 y PAR-M6 en el salar Las Parinas.

Con respecto a los parámetros fisicoquímicos in situ, los puntos PAR-M3 y PAR-BackUp registran valores de conductividad de 228.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 220.790 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente, mientras que el punto PAR-M4 presenta una conductividad de 22.800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En cuanto al pH, las muestras del salar Las Parinas presentan valores de 5,8 a 8,1.

Se realiza el traslado hacia el salar de Gorbea desde el salar Las Parinas, donde se visitan 4 puntos de muestreo de agua en el salar para medir parámetros fisicoquímicos in situ y realizar posteriormente su análisis hidroquímico. En cada punto se recolectó una muestra de agua (GOR-M1, GOR-M2, GOR-M3 y GOR-M4) y, adicionalmente, en los puntos GOR-M1 y GOR-M3 se toman dos muestras duplicadas en cada punto (GOR-MD1 y GOR-MD3) destinada al análisis hidroquímico.

Se registra una conductividad de 149.100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el punto GOR-M1 y una conductividad de 10.510 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el punto GOR-M4, mientras que en los puntos GOR-M2 y GOR-M3 se registran conductividades en torno a 3.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Por otra parte, los valores de pH se encuentran en un rango de 3,9 a 4,7, con excepción del punto GOR-M1, con un valor de 1,7. La Figura 3–9 muestra el monitoreo hidroquímico realizado en el punto GOR-M1.



Figura 3–9: Monitoreo hidroquímico en punto de agua superficial GOR-M1 en el salar de Gorbea.

- **11 de diciembre:** se realiza 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 quinta campaña de monitoreo hidroquímico y medición de evaporación.

A modo de resumen, en la Tabla 3-1 se presentan las principales características y fechas de medición de los puntos monitoreados durante la Campaña N°5. 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 cuarto turno.

Punto	Sector	Medición	Tipo de punto	Este WGS84	Norte WGS84	Fecha medición
A-D02	Salar de Aguilar	Domo	-	509.249	7.141.110	03-12-2024
A-D05	Salar de Aguilar	Domo	-	509.483	7.141.162	03-12-2024
A-D04	Salar de Aguilar	Domo	-	514.929	7.146.680	03-12-2024
A-D03	Salar de Aguilar	Domo	-	514.834	7.146.743	03-12-2024
A-D01	Salar de Aguilar	Domo	-	509.016	7.142.868	03-12-2024

Punto	Sector	Medición	Tipo de punto	Este WGS84	Norte WGS84	Fecha medición
LI-D03	Salar de la Isla	Domo	-	541.927	7.159.417	04-12-2024
LI-D04	Salar de la Isla	Domo	-	541.922	7.159.432	04-12-2024
LI-D01	Salar de la Isla	Domo	-	535.523	7.162.704	04-12-2024
LI-D02	Salar de la Isla	Domo	-	535.477	7.162.629	04-12-2024
LI-D05	Salar de la Isla	Domo	-	543.661	7.157.234	04-12-2024
LP-D02	Salar de las Parinas	Domo	-	551.430	7.146.196	05-12-2024
LP-D01	Salar de las Parinas	Domo	-	551.376	7.146.185	05-12-2024
LP-D04	Salar de las Parinas	Domo	-	549.481	7.146.430	05-12-2024
LP-D05	Salar de las Parinas	Domo	-	549.524	7.146.409	05-12-2024
LP-D03	Salar de las Parinas	Domo	-	549.478	7.146.385	05-12-2024
G-D02	Salar de Gorbea	Domo	-	529.730	7.189.292	06-12-2024
G-D03	Salar de Gorbea	Domo	-	529.675	7.189.345	06-12-2024
G-D04	Salar de Gorbea	Domo	-	531.173	7.187.576	06-12-2024
G-D05	Salar de Gorbea	Domo	-	531.315	7.187.639	06-12-2024
G-D01	Salar de Gorbea	Domo	-	530.166	7.190.732	06-12-2024
ISL-M3	Salar de la Isla	Hidroquímica	Superficial	531.718	7.155.794	09-12-2024
ISL-M4	Salar de la Isla	Hidroquímica	Superficial	534.025	7.162.590	09-12-2024
ISL-M5	Salar de la Isla	Hidroquímica	Superficial	534.031	7.162.595	09-12-2024
ISL-BackUp	Salar de la Isla	Hidroquímica	Superficial	536.500	7.162.673	09-12-2024
ISL-M1	Salar de la Isla	Hidroquímica	Superficial	541.334	7.159.226	09-12-2024
ISL-M2	Salar de la Isla	Hidroquímica	Superficial	543.490	7.155.054	09-12-2024
ISL-MD3	Salar de la Isla	Hidroquímica	Superficial	536.500	7.162.673	09-12-2024
ISL-MB4	Salar de la Isla	Hidroquímica	-	-	-	09-12-2024
AGI-M3	Salar de Aguilar	Hidroquímica	Superficial	509.519	7.141.191	09-12-2024
AGI-BackUp	Salar de Aguilar	Hidroquímica	Superficial	512.725	7.144.452	09-12-2024
AGI-M1	Salar de Aguilar	Hidroquímica	Subterráneo	515.182	7.142.080	09-12-2024
AGI-M2	Salar de Aguilar	Hidroquímica	Superficial	507.473	7.141.943	09-12-2024
AGI-M5	Salar de Aguilar	Hidroquímica	Superficial	515.269	7.147.056	09-12-2024

Punto	Sector	Medición	Tipo de punto	Este WGS84	Norte WGS84	Fecha medición
AGI-M6	Salar de Aguilar	Hidroquímica	Superficial	515.495	7.149.195	09-12-2024
PAR-BackUp	Salar de las Parinas	Hidroquímica	Superficial	549.142	7.147.094	10-12-2024
PAR-M1**	Salar de las Parinas	Hidroquímica	Superficial	548.746	7.141.327	10-12-2024
PAR-M3	Salar de las Parinas	Hidroquímica	Superficial	546.658	7.147.305	10-12-2024
PAR-M4	Salar de las Parinas	Hidroquímica	Superficial	548.449	7.147.771	10-12-2024
PAR-M5*	Salar de las Parinas	Hidroquímica	Superficial	551.431	7.146.323	10-12-2024
PAR-M6**	Salar de las Parinas	Hidroquímica	Superficial	550.248	7.143.300	10-12-2024
GOR-M1	Salar de Gorbea	Hidroquímica	Superficial	531.954	7.188.574	10-12-2024
GOR-M2	Salar de Gorbea	Hidroquímica	Subterráneo	533.967	7.184.571	10-12-2024
GOR-M3	Salar de Gorbea	Hidroquímica	Subterráneo	535.877	7.181.803	10-12-2024
GOR-M4	Salar de Gorbea	Hidroquímica	Superficial	537.748	7.179.727	10-12-2024
GOR-MD1	Salar de Gorbea	Hidroquímica	Superficial	531.954	7.188.574	10-12-2024
GOR-MD3	Salar de Gorbea	Hidroquímica	Subterráneo	535.877	7.181.803	10-12-2024

(*) Muestra no tomada debido a que el punto se encontraba seco.

(**) Muestra no tomada debido a presencia de flamencos en periodo de anidación.

4 Resultados de análisis hidroquímico

Durante la quinta campaña de terreno se visitaron 22 puntos de monitoreo, logrando recolectar un total de 23 muestras de agua en 19 de ellos, ya que en 3 puntos no fue posible realizar el muestreo. 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 dentro de las 23 muestras mencionadas, 3 duplicados, dos en el salar de Gorbea (GOR-MD1 y GOR-MD3) y uno en el salar de La Isla (ISL-MD3), junto con una muestra blanco de este último salar (ISL-MB4).

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 quinta campaña de terreno.

Tabla 4-1: Resultados del monitoreo hidroquímico correspondiente a la quinta 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	713,3	406,83	20466,84	91318,46	<0,2	206830	869,5	1519,13	195,06	2658,1	26732,56	342,39	7,1	172340	838,99
AGI-M1	126,2	137,78	256,38	431,01	<0,2	4384	153,8	19,25	118,38	78,75	238,78	11,81	7,9	2216	855,3
AGI-M2	629,7	639,29	49609,37	209499,29	<0,2	217820	767,6	2165,73	360,33	6147,62	44574,81	796,77	5,7	337160	428,58
AGI-M3	758,5	586,07	49192,41	209530,08	<0,2	218685	924,6	2510,98	363,7	6107,87	48056,06	819,22	5,9	228400	273,67
AGI-M5	388	338,73	22460,05	105842,98	<0,2	177317	473	1184,15	197,31	2875,99	23663,17	475,29	6,9	157000	774,85
AGI-M6	82	84,72	3972,49	17905,39	<0,2	41909	99,9	221,03	65,92	505,99	4006,32	41,4	7,6	33720	1532,27
GOR-M1	<0,2	1334,37	239,89	130628,48	<0,2	151471	<0,2	4470,88	288,54	25077,28	41659,84	21,04	1,9	97113	74234,77
GOR-M2	1	1,75	386,87	86,29	<0,2	2856	1,2	15,77	0,29	35,67	92,73	<0,01	4,6	2152	1348,63
GOR-M3	<0,2	3,03	416,86	161,87	<0,2	3076	<0,2	33,42	0,42	77,71	187,45	0,84	4,3	2312	1745,36
GOR-M4	<0,2	12,63	415,56	634,74	<0,2	10275	<0,2	300,91	1,63	469,94	1129,44	1,9	3,6	8820	6422,1
GOR-MD1	<0,2	1315	243,29	128471,73	<0,2	150626	<0,2	4482,44	289,6	24402,18	40319,54	48,26	1,8	95933	72444,45
GOR-MD3	1	2,88	425,88	124,82	<0,2	3107	1,2	32,18	0,31	76,22	171,85	<0,01	4,6	2584	1761,28
ISL-BACKUP	28	33,32	103,44	3067,74	<0,2	10639	34,1	259,97	58,37	73,69	1643,06	8,57	7,6	6410	551,75
ISL-M1	149,3	208,87	502,63	115767,23	<0,2	216132	182	4606,79	542,59	3156,06	57700,26	73,04	7,2	195920	6025,97
ISL-M2	94	123,61	184,72	52235,37	<0,2	131493	114,6	2453,56	304,21	1781,63	28617,61	50,71	7,5	107540	3157,99
ISL-M3	153,5	283,25	368,38	136413,63	<0,2	221209	187,1	6404,68	804,63	4504,2	62455,55	126,84	7	217000	8783,48
ISL-M4	96,3	29,85	549,68	17184,63	<0,2	43278	117,4	712,28	55,2	405,1	8555,64	4,62	8	30660	2685,77
ISL-M5	87,5	57,44	600,13	16923,89	<0,2	40007	106,7	638,34	99,93	405,62	8023,64	3,01	8	27980	2614,49
ISL-MB4	4,9	0,17	0,41	0,51	<0,2	10	5,9	0,28	0,11	0,27	3,06	0,05	6,6	8	0,15
ISL-MD3	27,6	30,31	111,89	3137,59	<0,2	10649	33,7	117,59	57,51	76,23	1660	8,73	7,4	6310	551,46
PAR-BACKUP	661,9	473,34	472,05	143212,35	<0,2	204298	806,9	5639,9	392,84	3699,74	83299,55	14,36	7,6	187520	11460,94
PAR-M1**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

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-M3	985,1	719,66	458,18	193460,17	<0,2	232333	1200,9	9030,87	598,85	6221,76	108965,17	42,13	7,1	269740	17423,13
PAR-M4	102,8	58,81	147,07	23764,84	<0,2	57403	125,3	646,78	78,24	309,14	14333,2	0,48	8,1	20420	1603,77
PAR-M5*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PAR-M6**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(*) Muestra no tomada debido a que el punto se encontraba seco.

(**) Muestra no tomada debido a presencia de flamencos en periodo de anidación.

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, todos los puntos analizados poseen una diferencia porcentual inferior al 15%, a excepción del punto AGI-M1, el cual se asocia a un error de medición por parte del laboratorio. Sin embargo, el resto de 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	0,32
AGI-M1	47,81
AGI-M2	6,53
AGI-M3	5,36
AGI-M5	8,48
AGI-M6	8,57
GOR-M1	8,48
GOR-M2	6,73
GOR-M3	6,14
GOR-M4	11,79
GOR-MD1	8,90
GOR-MD3	5,78
ISL-BACKUP	4,30
ISL-M1	5,34
ISL-M2	0,04
ISL-M3	7,59
ISL-M4	7,28
ISL-M5	7,36

Nombre punto	Diferencia (%)
ISL-MB4	0,16
ISL-MD3	1,78
PAR-BACKUP	0,05
PAR-M1	-
PAR-M3	0,25
PAR-M4	0,24
PAR-M5	-
PAR-M6	-

5 Resultados ensayos de evaporación

En este capítulo se presentan las series diarias de evaporación obtenidas mediante el método del domo en su quinta campaña (diciembre 2024).

Salar Aguilar

Las tasas de evaporación registradas en el Salar Aguilar son similares a las observadas durante la cuarta campaña. Dos de los cinco ensayos reportaron valores máximos instantáneos en un rango aproximado de 0,020 a 0,025 mm/hora. Sin embargo, el ensayo A-D03 alcanzó un máximo instantáneo por sobre de los 0,04 mm/hora (Figura 5-1). Aunque este valor es significativamente más alto, se encuentra dentro del rango observado en la cuarta campaña, realizada con una diferencia temporal menor a un mes.

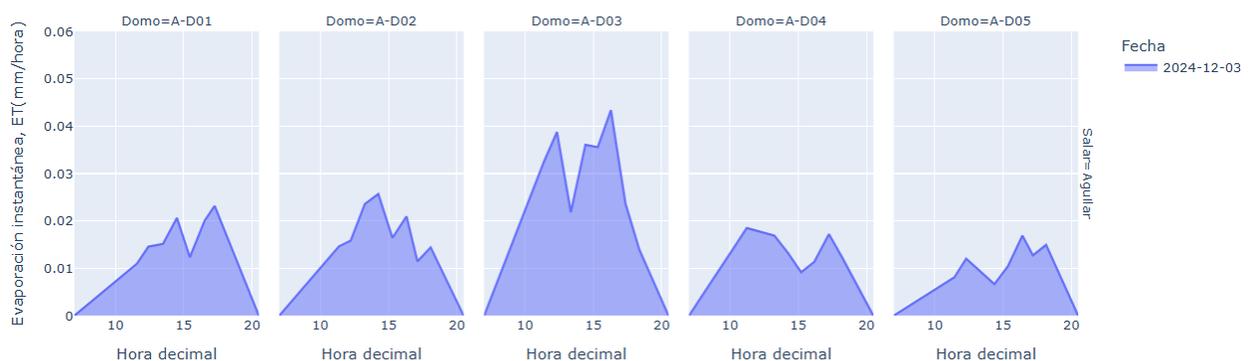


Figura 5-1: Series diarias de ensayos de evaporación de domos en el salar de Aguilar.

Los resultados obtenidos en esta campaña también son comparables a los registrados en la primera, realizada en diciembre de 2023. Tanto la distribución diaria de la evaporación como los valores máximos instantáneos y los totales acumulados presentan una notable similitud, lo que sugiere una estabilidad de las condiciones de evaporación bajo parámetros climáticos similares.

En la Tabla 5-1 se presentan los resultados diarios correspondientes a los ensayos previamente descritos. El rango de evaporación diaria se mantuvo entre 0,11 y 0,24 mm, mostrando similitud con los valores observados en la cuarta campaña.

Tabla 5-1: Resultados evaporación diaria salar de Aguilar. Quinta campaña.

Salar Aguilar	
Ensayo	Evapotranspiración (mm/día)
A-D01	0,118
A-D02	0,139
A-D03	0,244
A-D04	0,154
A-D05	0,111
Promedio	0,153

Salar Gorbea

En la Figura 5-2 se presentan los resultados obtenidos en el salar de Gorbea, donde al igual que en la cuarta campaña, se registraron tasas máximas de evaporación instantáneas en un rango de 0,020 a 0,030 mm/hora. Sin embargo, estos valores máximos se distribuyeron en un intervalo horario más amplio, lo que resultó en un incremento de la evaporación total diaria. Este cambio se correlaciona con la distribución horaria de la temperatura.

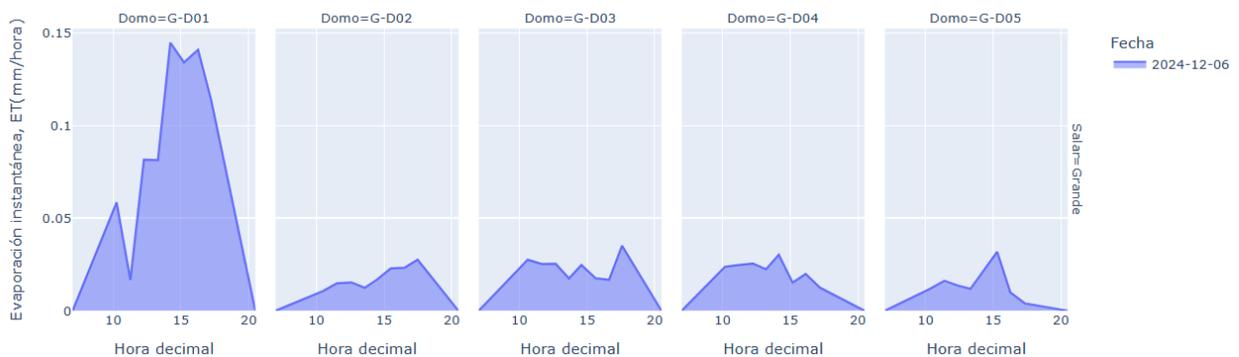


Figura 5-2: Series diarias de ensayos de evaporación de domos en el salar de Gorbea.

El ensayo G-D01 presentó valores de evaporación instantánea superior al promedio, alcanzando un máximo de casi 0,15 mm/hora. Esta diferencia puede explicarse por las características del suelo en el sitio del ensayo, el cual presentaba una capa delgada de evaporita con yeso de aproximadamente 2 mm de espesor, sobre a una capa de arcillas mezcladas con arenas. Este tipo de suelo, caracterizado por su estructura porosa, favorece el ascenso capilar del agua desde capas más profundas hacia la superficie. Este proceso aumenta la disponibilidad de humedad superficial, lo que a su vez incrementa las tasas de evaporación.

En la Tabla 5-2 se presentan los resultados diarios correspondientes a los ensayos en el salar de Gorbea. El rango de evaporación diaria se mantuvo entre 0,12 y 0,64 mm/día, con un promedio de 0,25 mm/día, lo que representa un valor superior al registrado en el salar de Aguilar.

Tabla 5-2: Resultados evaporación diaria salar de Gorbea. Quinta campaña.

Salar Gorbea	
Ensayo	Evapotranspiración (mm/día)
G-D01	0,637
G-D02	0,144
G-D03	0,189
G-D04	0,174
G-D05	0,121
Promedio	0,253

Salar La Isla

En la Figura 5-3 se presentan los resultados de los ensayos realizados en el salar de La Isla, los cuales muestran una notable similitud con los obtenidos durante la primera y cuarta campaña. Los ensayos LI-D01, LI-D02 y LI-D05 registraron valores horarios y totales diarios similares entre sí, mientras que los ensayos LI-D03 y LI-D04 muestran máximos instantáneos de evaporación en un rango aproximado de 0,04 a 0,08 mm/hora. Esta diferencia se atribuye a las condiciones particulares de los sectores donde se realizaron los ensayos, donde el nivel freático se encontraba somero, lo que favorece un mayor flujo de humedad hacia la superficie del suelo.

A diferencia de las campañas previas, se observó una distribución más amplia de la evaporación, con rangos máximos entre las 10:00 AM y 19:30 PM.

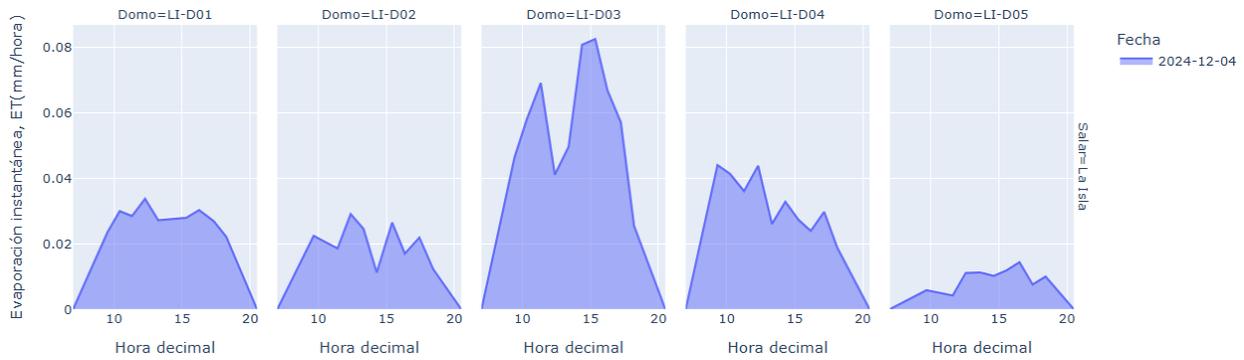


Figura 5-3: Series diarias de ensayos de evaporación de domos en el salar de La Isla.

En la Tabla 5-3 se presentan los resultados diarios correspondientes a los ensayos previamente descritos. El rango de evaporación diaria se mantuvo entre 0,09 y 0,58 mm.

Tabla 5-3: Resultados evaporación diaria salar de La Isla. Quinta campaña.

Salar La Isla	
Ensayo	Evaporación (mm/día)
LI-D01	0,250
LI-D02	0,183
LI-D03	0,577
LI-D04	0,324
LI-D05	0,086
Promedio	0,284

Las Parinas

Los resultados de los ensayos en salar de Las Parinas muestran similitud con los ensayos de la primera campaña, con rangos de evaporación máximos principalmente entre los 0,01 y 0,02 mm/hora, como se muestra en la Figura 5-4, mientras que la Tabla 5-4 presenta los resultados de evaporación diarios.

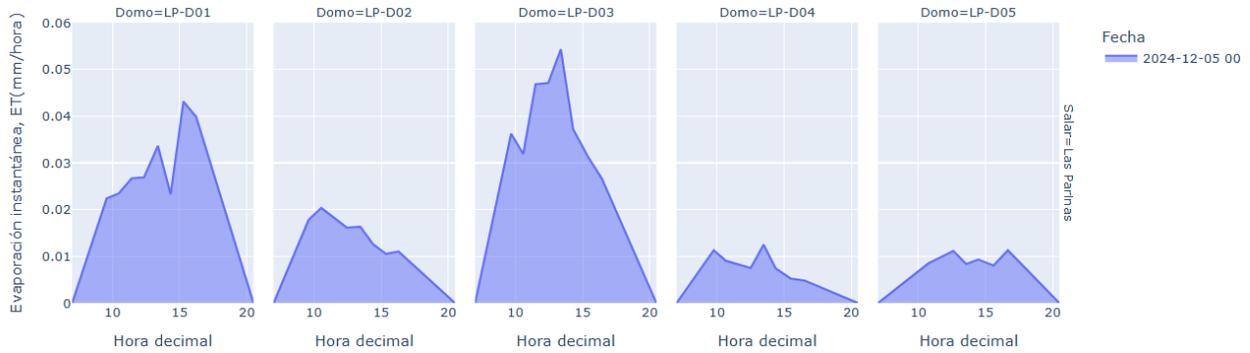


Figura 5-4: Series diarias de ensayos de evaporación de domos en el salar Las Parinas.

Tabla 5-4: Resultados evaporación diaria salar de Las Parinas. Quinta campaña.

Salar Las Parinas	
Ensayo	Evaporación (mm/día)
LP-D01	0,239
LP-D02	0,123
LP-D03	0,311
LP-D04	0,058
LP-D05	0,063
Prom	0,159

En conclusión, los resultados obtenidos durante esta campaña se encuentran dentro del rango esperado y muestran una congruencia con los datos registrados en campañas previas. La estrecha similitud con los valores de la primera y cuarta campaña, realizadas en el mismo periodo del año, respalda la validez de las mediciones y la consistencia en la metodología utilizada.

Anexo A. Fichas técnicas de medición de evaporación en domos (Campaña N°5)

Anexo B. Fichas técnicas de monitoreo hidroquímico (Campaña N°5)

Anexo C. Informes de resultados de análisis de laboratorio