

S19A401  
**CODELCO** PRI - PROYECTO RAJO INCA - INVERSIONAL

**ESTADO DE REVISIÓN DE DOCUMENTO**

N° de Estado de Revisión

1  Sin observaciones

2  Con observaciones

3  El documento requiere mayor desarrollo

4  No revisado por codecco

Las observaciones indicadas son un aporte a la globalidad, en ningún caso se libera con éstas, la responsabilidad de la calidad de diseño encomendado

Por Ochoa Larraín Ramon (Codecco-VP)      Por      Fecha 20 de diciembre de 2023

**CORPORACIÓN NACIONAL DEL COBRE DE CHILE**

**VICEPRESIDENCIA DE PROYECTOS**

---

**CS-064 SERVICIO DE MONITOREO HÍDRICO Y METEOROLÓGICO, PERIODO 2021-2023  
 PROYECTO RAJO INCA**

**4600019896-06310-INFSU-00070**

**ANÁLISIS HIDROQUÍMICO  
 HIDROQUÍMICA (SEMESTRAL)  
 SALAR DE PEDERNALES  
 JUNIO 2023**

0	11-12-23	REVISION CODELCO				ROL
B	20-11-23	REVISION CODELCO	PE	SV	CBG	ROL
REV N°	FECHA	EMITIDO PARA	POR	REVISADO POR	APROBADO POR	APROBADO POR
			AGQ CHILES.A.			CODELCO
						Pág. 1 de 79
		<b>4600019896-06310-INFSU-00070</b>				Rev.0

# Monitoreo hídrico y meteorológico 2021-2023

Hidroquímica  
Salar de Pedernales

Primer Semestre 2023



Diciembre 2023

1001\_AGQ\_HQ\_PrimerSemestre2023\_SPED\_v0

## Índice

<b>Resumen Ejecutivo .....</b>	<b>9</b>
<b>1 Introducción.....</b>	<b>10</b>
<b>2 Objetivos .....</b>	<b>10</b>
2.1 Antecedentes.....	11
2.2 Compromisos ambientales.....	11
<b>3 Materiales y métodos .....</b>	<b>19</b>
3.1 Descripción del área de estudio .....	19
3.2 Puntos y programa de monitoreo .....	20
3.3 Metodologías .....	22
3.3.1 Mediciones parámetros fisicoquímicos in situ.....	22
3.3.2 Toma de muestra .....	22
3.3.3 Análisis hidroquímico .....	23
3.3.4 Control de calidad .....	23
<b>4 Resultados .....</b>	<b>24</b>
4.1 Toma de muestras .....	24
4.2 Parámetros fisicoquímicos in situ.....	25
4.3 Parámetros fisicoquímicos laboratorio .....	33
4.4 Cationes – aniones disueltos .....	40
<b>5 Discusión de resultados .....</b>	<b>66</b>
5.1 Control de calidad .....	66
5.2 Evolución temporal parámetros hidroquímicos.....	71
5.2.1 Parámetros fisicoquímicos in situ .....	71

5.2.2	Parámetros fisicoquímicos laboratorio.....	71
5.2.3	Cationes y aniones disueltos.....	71
5.3	Diagrama Piper.....	72
5.4	Diagrama Stiff modificado.....	74
<b>6</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>76</b>
<b>7</b>	<b>Referencias.....</b>	<b>77</b>
<b>Anexo A.</b>	<b>Compromisos Ambientales.....</b>	<b>79</b>
<b>Anexo B.</b>	<b>Certificaciones ETFA.....</b>	<b>79</b>
<b>Anexo C.</b>	<b>Química, formato SMA.....</b>	<b>79</b>
<b>Anexo D.</b>	<b>Certificados Mediciones.....</b>	<b>79</b>
<b>Anexo E.</b>	<b>Esquemas de habilitación de pozos.....</b>	<b>79</b>

## Índice de Tablas

Tabla 2-1: Transcripción del considerando 13.1 de la RCA. “Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario (PSAV) en la Cuenca de Pedernales” .....	12
Tabla 3-1: Puntos de seguimiento correspondientes a 5 pozos/piezómetros y 6 punteras. ....	20
Tabla 3-2: Parámetros de laboratorio analizados. ....	23
Tabla 4-1: Puntos monitoreados, fecha de toma de muestra, método de muestreo y profundidad del nivel. ....	24
Tabla 4-2: Mediciones fisicoquímicas in situ en pozos realizadas en el primer semestre 2023.....	25
Tabla 4-3: Mediciones fisicoquímicas in situ en punteras realizadas en el primer semestre 2023. ....	28
Tabla 4-4: Mediciones fisicoquímicas de laboratorio en pozos realizadas en el primer semestre 2023. ...	33
Tabla 4-5: Mediciones fisicoquímicas de laboratorio en punteras realizadas en el primer semestre 2023.	35
Tabla 4-6: Mediciones de cationes y aniones disueltos en pozos realizadas en el primer semestre 2023.	40
Tabla 4-7: Mediciones de cationes y aniones disueltos en punteras realizadas en el primer semestre 2023.....	49
Tabla 5-1: Error porcentual calculado por el laboratorio. ....	66
Tabla 5-2: Verificación datos in situ v/s laboratorio – Conductividad eléctrica y pH.....	67

## Índice de Figuras

Figura 3-1: Mapa ubicación de la cuenca Salar de Pedernales. Fuente: Programa de Monitoreo cuenca de Salar de Pedernales, Amphos 21.....	19
Figura 3-2: Ubicación de los puntos de monitoreo hidroquímico en la cuenca Salar de Pedernales. ....	21
Figura 4-1: Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).....	26
Figura 4-2: Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).....	26
Figura 4-3: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH).....	27
Figura 4-4: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH).....	28
Figura 4-5. Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).....	29
Figura 4-6. Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).....	30
Figura 4-7: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH).....	31
Figura 4-8: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH).....	32
Figura 4-9: Evolución temporal de Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). ....	33
Figura 4-10: Evolución temporal de Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). ....	34
Figura 4-11: Evolución temporal de pH (unidades de pH). ....	34
Figura 4-12: Evolución temporal de pH (unidades de pH). ....	35
Figura 4-13: Evolución temporal de Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). ....	36
Figura 4-14: Evolución temporal de Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). ....	37
Figura 4-15: Evolución temporal de pH (unidades de pH). ....	38
Figura 4-16: Evolución temporal de pH (unidades de pH). ....	39
Figura 4-17: Evolución temporal de Calcio disuelto ( $\text{mg}/\text{l}$ ).....	41
Figura 4-18: Evolución temporal de Calcio disuelto ( $\text{mg}/\text{l}$ ).....	41
Figura 4-19: Evolución temporal de Magnesio disuelto ( $\text{mg}/\text{l}$ ). ....	42
Figura 4-20: Evolución temporal de Magnesio disuelto ( $\text{mg}/\text{l}$ ). ....	42

Figura 4-21: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/l).....	43
Figura 4-22: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/l).....	43
Figura 4-23: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/l). ....	44
Figura 4-24: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/l). ....	44
Figura 4-25: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/l).....	45
Figura 4-26: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/l).....	45
Figura 4-27: Evolución temporal de Cloruro (mg/l). ....	46
Figura 4-28: Evolución temporal de Cloruro (mg/l). ....	46
Figura 4-29: Evolución temporal de Nitrato (mg/l). ....	47
Figura 4-30: Evolución temporal de Nitrato(mg/l). ....	47
Figura 4-31: Evolución temporal de Sulfato (mg/l).....	48
Figura 4-32: Evolución temporal de Sulfato (mg/l).....	48
Figura 4-33: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/l).....	50
Figura 4-34: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/l).....	51
Figura 4-35: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/l). ....	52
Figura 4-36: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/l). ....	53
Figura 4-37: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/l).....	54
Figura 4-38: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/l).....	55
Figura 4-39: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/l). ....	56
Figura 4-40: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/l). ....	57
Figura 4-41: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/l).....	58
Figura 4-42: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/l).....	59
Figura 4-43: Evolución temporal de Cloruro (mg/l). ....	60
Figura 4-44: Evolución temporal de Cloruro (mg/l). ....	61

Figura 4-45: Evolución temporal de Nitrato (mg/l). .....	62
Figura 4-46: Evolución temporal de Nitrato disuelto (mg/l). .....	63
Figura 4-47: Evolución temporal de Sulfato (mg/l). .....	64
Figura 4-48: Evolución temporal de Sulfato (mg/l). .....	65
Figura 5-1: Comparación entre la conductividad eléctrica medida in situ y laboratorio en los pozos CP-11, P-19a, P-4a, PB-11 y PB-12. ....	68
Figura 5-2: Comparación entre la conductividad eléctrica medida in situ y laboratorio en las punteras PU-31, PU-43, PU-44, PU-45, PU-48 y PU-49. ....	68
Figura 5-3: Comparación entre el pH medido in situ y laboratorio en los pozos CP-11, P-19a, P-4a, PB-11 y PB-12. ....	69
Figura 5-4: Comparación entre el pH medido in situ y laboratorio en las punteras PU-31, PU-43, PU-44, PU-45, PU-48 y PU-49. ....	69
Figura 5-5: Comparación entre las mediciones tomadas in situ y en laboratorio – Conductividad eléctrica y pH. ....	70
Figura 5-6: Diagrama Piper de los puntos monitoreados en el primer semestre 2023. Los datos corresponden al último monitoreo realizado en cada punto. ....	73
Figura 5-7: Diagramas de Stiff modificado de los puntos monitoreados en el primer semestre 2023. Datos correspondientes al último monitoreo realizado en cada punto. ....	75

## Resumen Ejecutivo

El presente informe incluye los resultados del monitoreo efectuado en el marco del Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario (PSAV) en la cuenca Salar de Pedernales durante el primer semestre de 2023. El principal objetivo del informe es cumplir con dicho plan en lo que respecta a la medición de los parámetros hidroquímicos de los puntos de monitoreo en el sector.

Las tomas de muestra de agua se realizan de manera exitosa en la mayoría de los puntos del programa, salvo en las punteras PU-48 y PU-49 en marzo 2023 debido a que se encontraron sin acceso, y en las punteras PU-31 y PU-45 en junio 2023, por encontrarse congelada y por suspensión de actividades respectivamente.

En general, los parámetros hidroquímicos no presentan mayores variaciones con respecto al semestre anterior. Cabe destacar que, en marzo 2023, se identifica una disminución de sulfato (CP-11 y PB-12) y, en junio 2023, disminuye el calcio (PU-48 y P-19a) y nitrato (PU-43).

Cabe destacar que durante el primer semestre 2023 se identifican aumentos en la conductividad y sólidos disueltos totales in situ en el punto PU-43, los que no son consistentes con los valores obtenidos en laboratorio, por lo que podría asociarse a un error en la medición de terreno. En cuanto al pH in situ se reconocen disminuciones en los puntos PU-43, PU-44, PB-12 y P-4a, que no se condicen con los resultados de laboratorio.

Por otro lado, en los parámetros fisicoquímicos medidos en laboratorio, durante el primer semestre 2023, se identifica un aumento en los sólidos disueltos totales (PB-11, PB-12 y CP-11).

Las aguas monitoreadas son del tipo cloruradas sódicas, con un contenido importante de cloruro y sodio, característico de aguas tipo salmueras. Además, en los diagramas de Stiff modificado se observa una mayor predominancia de los cloruros frente a los demás aniones, mientras que en los cationes se observa una predominancia en el sodio más potasio.

## 1 Introducción

La División Salvador (DSAL) de Codelco Chile se encuentra ubicada en la Región de Atacama, comuna de Diego de Almagro, a 5,2 kilómetros de la ciudad El Salvador. DSAL se ha comprometido, mediante un Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario, al monitoreo de las Aguas Subterráneas de la cuenca Salar de Pedernales, con la finalidad de garantizar la conservación de las actuales zonas de vegetación activas del tipo SVAHT localizadas al suroeste del salar, así como controlar la extensión del cono de depresión de los pozos de bombeo asociados al Proyecto Rajo Inca (PRI), aprobado mediante la Resolución Exenta N°19 del 28 de febrero de 2020 (todos estos documentos son incluidos en el Anexo A).

Con lo anterior, DSAL solicitó a AGQ la medición trimestral de los parámetros hidroquímicos de las aguas subterráneas para el control ambiental comprometido en el Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario (PSAV) antes mencionado (Apéndice 1 del Anexo 1-2 de la Adenda Complementaria Excepcional). Anteriormente, estas actividades eran desarrolladas por GP Consultores hasta febrero de 2021.

El presente documento consolida la información hidroquímica desde diciembre del 2020 hasta junio del 2023, con el objetivo de incorporar en cada reporte semestral la data histórica y poder observar las tendencias y comportamientos de los parámetros hidroquímicos en el tiempo. La frecuencia de monitoreo comprometida es trimestral y la entrega a la información a la autoridad es semestral.

Además, cabe destacar que AGQ se trata de una “Entidad Técnica de Fiscalización Ambiental” (ETFA) debidamente inscrita en el registro de la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) y que cuenta con las resoluciones exentas pertinentes, adjuntas en el Anexo B, para la correcta ejecución de los trabajos.

## 2 Objetivos

El presente informe tiene como objetivo cumplir con el PSAV en el control de las aguas subterráneas del sector Salar de Pedernales (Proyecto Rajo Inca) en lo que respecta al control de la calidad química de los puntos de monitoreo.

## 2.1 Antecedentes

El Proyecto Rajo Inca (PRI) extiende la vida útil de la División Salvador mediante el desarrollo de un rajo abierto en el cuerpo mineralizado que históricamente se ha explotado en forma subterránea. Se estima que se podrían extraer y beneficiar aproximadamente 561 millones de toneladas (Mton) de mineral sulfurado y aproximadamente 297 Mton de mineral oxidado. El PRI considera explotar y procesar dichos minerales en las instalaciones existentes e incorporar modificaciones en ellas para optimizar e incrementar la tasa de procesamiento y la producción de cobre fino.

El Proyecto considera procesar una tasa máxima de 37 ktpd de mineral sulfurado y 30 ktpd de mineral oxidado, lo que permitiría aumentar la producción de concentrado de cobre a un promedio de 245 kton/año (máximo 370 kton/año) y la producción de cátodos de cobre a un promedio de 25 ktCuf/año con una vida útil de 43 años en operación. Esta continuidad comprende las líneas productivas de sulfuros y óxidos en las áreas de El Salvador, Pampa Austral y la extracción de agua de la cuenca Salar de Pedernales.

El presente informe analiza las variables según el Programa de Monitoreo para el sector Pedernales, el cual compromete el control de la calidad química en 5 pozos y 6 punteras.

## 2.2 Compromisos ambientales

El Proyecto Rajo Inca se ingresó al SEIA a través de una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), que fue calificada ambientalmente favorable por medio de la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) N°19/2020, en Copiapó el 28 de febrero de 2020. En ella, se establecen una serie de compromisos ambientales en relación con la componente hídrica. La RCA se adjunta en el Anexo A del presente informe.

Durante las etapas de construcción y operación del proyecto (RCA considerando 13.1) se establece un Programa de Monitoreo para el sector del Salar de Pedernales, con el fin de monitorear los niveles y calidad de las aguas subterráneas para el control de la extracción del recurso hídrico. En la Tabla 2-1 se encuentra la ficha resumen de los compromisos de calidad de aguas subterráneas para el sector.

Posteriormente a la aprobación del Proyecto Rajo Inca, y con motivo del Avenimiento entre el Consejo de Defensa del Estado (CDE) y Codelco, se estableció en la Medida H-03 de dicho acuerdo una complementación del PSAV del PRI a partir de la incorporación de 2 puntos de control adicionales.

**Tabla 2-1:** Transcripción del considerando 13.1 de la RCA. “Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario (PSAV) en la Cuenca de Pedernales”.

Tabla 13.1. Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario en la Cuenca de Pedernales	
Impacto asociado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminución del volumen de agua en el acuífero de la cuenca Salar de Pedernales.</li> <li>- Disminución del nivel de agua en la zona de vegetación del SVAHT del salar de Pedernales asociado al cono de descenso del Campo de Pozos de Bombeo.</li> </ul>
Fase del Proyecto a la que aplica	Construcción y Operación
Objetivo, descripción y justificación	<p><u>Objetivo:</u> garantizar la protección de los SVAHT activos al suroeste del salar de Pedernales, así como controlar la extensión del cono de depresión de los pozos de bombeo.</p> <p><u>Descripción:</u></p> <p>En el Plan de Seguimiento se definen los puntos de monitoreo según los antecedentes del “Modelo Hidrogeológico Conceptual de la cuenca Salar de Pedernales”, y corresponden a:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 29 pozos o piezómetros (ver Tabla 2-1 del Apéndice 1 del Anexo 1 de la Adenda Complementaria Excepcional).</li> <li>• 18 punteras (ver Tabla 2-2 del Apéndice 1 del Anexo 1 de la Adenda Complementaria Excepcional).</li> <li>• 3 estaciones meteorológicas (Tabla 2-3 del Apéndice 1 del Anexo 1 de la Adenda Complementaria Excepcional).</li> </ul> <p>Además, producto de la acción definida por el Titular sobre el traslado del 50% de los pozos de extracción (extracción de 85 l/s) desde el inicio de la fase de operación del proyecto (al menos 5 km aguas arriba del campo de pozos de bombeo del Llano Pajaritos), se deben establecer 2 puntos de monitoreo para cada uno de los nuevos pozos. La ubicación de cada uno de esos nuevos puntos de monitoreo deberá ser aprobada por la DGA de la Región de Atacama.</p> <p>Se monitorearán los siguientes parámetros en el Plan de Seguimiento:</p> <p>1) <b>niveles piezométricos y variables climáticas</b>, con lo cual se podrán detectar descensos de los niveles y determinar si estos se deben a factores climáticos o a las extracciones de agua subterránea. El monitoreo será de forma mensual, en los pozos/piezómetros y punteras (ver Tabla 2-1 y Tabla 2-2 del Apéndice 1 del Anexo 1 de la Adenda Complementaria Excepcional), a excepción de los puntos de monitoreo continuo de niveles (ver Tabla 2-5 del Apéndice 1 del Anexo 1 de la Adenda Complementaria Excepcional). El seguimiento se realizará durante las fases de construcción y operación del Proyecto Rajo Inca. Se continuará con el seguimiento una vez acabada la operación, hasta que los niveles piezométricos sean superiores a los observados previo a la entrada de operación del Proyecto Rajo Inca.</p> <p>Se entregarán a la SMA: Se entregará un único informe anual que incluya la base de datos (en Excel) información piezométrica registrada en cada mes (tanto mediciones puntuales como continuas) y el análisis evolución de los datos. En el caso de existir diferencias entre lo predicho en este proceso de evaluación y lo finalmente observado, el informe deberá referirse en detalle a ellas.</p> <p>La medición de los niveles será realizada por un organismo de inspección de Muestreo Ambiental-ETFA (Entidad Técnica de Fiscalización Ambiental).</p>

Tabla 13.1. Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario en la Cuenca de Pedernales

	<p>En caso de que no se pueda medir el nivel en uno o varios puntos de monitoreo, se dejará constancia de ello en los respectivos reportes a la SMA, acompañando la justificación que lo respalde. Sin embargo, el Titular debe establecer un número máximo fallas en la medición.</p> <p>2) <b>variables climáticas</b>, se realizará un seguimiento de las variables climáticas en las 3 estaciones meteorológicas propuestas, la estación La Ola, la estación Los Arroyos y la estación Centro Salar (Tabla 2-3 del Apéndice 1 del Anexo 1 de la Adenda Complementaria Excepcional).</p> <p>En ellas se medirán, cada 60 minutos, los siguientes parámetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Presión.</li> <li>• Altura de nieve.</li> <li>• Radiación solar.</li> <li>• Velocidad y dirección del viento.</li> <li>• Temperatura.</li> <li>• Humedad relativa.</li> <li>• Precipitación.</li> <li>• Evaporación desde el suelo en la estación meteorológica Centro Salar.</li> </ul> <p>La descarga de los datos medidos en cada una de las estaciones se realizará con una frecuencia trimestral, durante toda la fase de construcción y operación del Proyecto Rajo Inca. Además, se entregarán a la SMA reportes semestrales donde se indicarán los datos medidos y se analizará su evolución.</p> <p>Debido a las condiciones climáticas adversas que ocurren en la zona de estudio (principalmente durante el invierno) es posible que no se puedan realizar la descarga de datos. En caso de ocurrir la situación antes descrita, se informará a la SMA en los informes anuales.</p> <p>3) <b>calidad química de las aguas en el entorno del SVAHT</b> emplazado al oeste del salar.</p> <p>Se generarán datos de calidad química, los que permitirán realizar un balance hidroquímico para analizar las diferencias que se puedan producir en los caudales de entrada. Lo anterior permitirá determinar si las variaciones en el SVAHT se deben a las extracciones o bien a un cambio en las entradas naturales.</p> <p>Así, el Plan de Seguimiento contará con un monitoreo de calidad de las aguas provenientes del sector sur y oeste, que incluirá el análisis de Conductividad Eléctrica (CE), pH e iones mayoritarios.</p> <p>La toma de muestras será realizada por un organismo de inspección de Muestreo Ambiental-ETFA (Entidades Técnicas de Fiscalización Ambiental), el cual seguirá las indicaciones establecidas en la Norma NCh411/11-1998 "Guía para el Muestreo de Aguas Subterráneas", mientras que el análisis hidroquímico será llevado a cabo por un laboratorio certificado.</p> <p>La frecuencia del monitoreo será trimestral y se realizará durante las fases de construcción y operación del Proyecto Rajo Inca. Además, se entregarán reportes semestrales a la SMA, donde se incluirán los certificados con los resultados de los análisis químicos de laboratorio.</p> <p>Los puntos de monitoreo considerados para el seguimiento de la calidad química son 9 en total, de los cuales 3 corresponden a pozos/piezómetros y 6 a punteras (ver Tabla 2-4 del Apéndice 1 del Anexo 1 de la Adenda Complementaria Excepcional). Los puntos se ubican en el SVAHT, en su entorno y en los sectores de recarga ubicados al sur y oeste del SVAHT.</p>
--	--

Tabla 13.1. Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario en la Cuenca de Pedernales

	<p>Debido a las condiciones climáticas adversas que ocurren en la zona de estudio (principalmente durante el invierno) es posible que no se puedan monitorear todos los puntos. En caso de ocurrir la situación antes descrita, se informará a la SMA en los informes semestrales.</p> <p>Además, el Plan de Seguimiento debe incluir la instalación de sensores de medición continua en 10 pozos (Tabla 2-5 Apéndice 1 del Anexo 1 de la Adenda Complementaria Excepcional).</p> <p>El Titular debe presentar la actualización del modelo hidrogeológico numérico al inicio de la etapa de operación y posteriormente cada 5 años. Lo anterior permitirá garantizar una adecuación y mejora del modelo, representando las condiciones futuras de la cuenca del Salar de Pedernales en base a la nueva información disponible.</p> <p>En dicha actualización el Titular deberá:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibilizar la condición de borde en consideración a la situación sin proyecto que correspondería al cese de la extracción de agua superficial desde el tranque La Ola que impacta en el flujo superficial y subterráneo que ingresa desde el Sur.</li> <li>• Deben ser subsanadas las diferencias de cotas topográficas que presenta el modelo con lo reportado en la caracterización de los pozos (cotas informadas en Anexo 8-4 de la Adenda versus cotas modeladas en el Modelo Numérico de la Adenda Complementaria Excepcional).</li> </ul> <p>La primera actualización será reportada a la SMA, cuando se dé inicio la fase de operación del proyecto. Cuando corresponda presentar el modelo hidrogeológico actualizado, se incluirá como anexo la respectiva actualización del Plan de Seguimiento.</p> <p>Además del Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario (PSAV) debe considerar el seguimiento de la variación de los niveles piezométricos y la variación de cobertura de los SVAHT activos, que cuente con los siguientes elementos:</p> <p><b>1) Puntos de Control:</b></p> <p>El PSAV se sustenta en 9 puntos de control en total. Estos corresponden a 5 pozos/piezómetros (PB-9, PB-10, PB-11, PB-12, CP-11) y 4 punteras (PU-31, PU-45, PU-48 y PU-49). En estos puntos se controlarán los posibles efectos sobre el SVAHT activo, asociados a los descensos que podría generar la extracción desde el campo de pozos de bombeo.</p> <p>Además, una vez definidas las coordenadas exactas de la ubicación de los nuevos pozos de bombeo, al menos, a 5 km aguas arriba del campo de pozos del Llano Pajaritos, alejados del sector de vegetación activa del SVAHT actual, se establecerán 2 puntos de monitoreo para cada uno de los nuevos pozos.</p> <p>El Titular deberá presentar a la DGA de la Región de Atacama la nueva ubicación de los pozos de extracción junto a nuevos pozos de control y umbrales de activación del PSAV asociados al nuevo campo de bombeo.</p> <p><b>2) Variables de Control:</b></p> <p>La variable de control es el nivel piezométrico en los puntos de control del PSAV, los cuales serán reportados como cota del agua subterránea referido al nivel del mar (m s.n.m.) y metros bajo el nivel de terreno (m b.n.t.).</p> <p><b>3) Valores Umbrales,</b> que activan los niveles de acción.</p> <p>La activación del PSAV estará sujeta a la ocurrencia de cualquiera de estas condiciones o ambas en conjunto:</p>
--	---

Tabla 13.1. Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario en la Cuenca de Pedernales

a. **Nivel freático inferior al Valor Umbral Mínimo (VUM) en cualquiera de los puntos de control**, en al menos el 50% de las mediciones en los últimos tres meses de medición continua. El VUM, se define como el máximo descenso observado medido desde el nivel de terreno (m.b.n.t.) y se muestran en la tabla a continuación.

b. **Reducción en un 5% de la cobertura vegetal del SVAHT activo**, respecto a lo observado en línea de base.

Tabla: Valores umbrales de activación del PSAV

Pozo	VUM (mbnt)	Reducción Cobertura Vegetal
CP-11	2.4	>5%
PB-10	20.2	
PB-11	26.7	
PB-12	18.6	
PB-9	24.8	
PU-49	1.8	
PU-45	0.8	
PU-48	0.6	
PU-31	0.8	

4) **Acciones que se deben tomar**, en caso de que dichos niveles se activen.

El PSAV debe estar formado por 2 fases, cuyas características se presentan a continuación:

**Fase 1:**

- La fase 1 se debe activar cuando el nivel freático sea inferior al Valor Umbral Mínimo (VUM) en cualquiera de los puntos de control, en al menos el 50% de las mediciones en los últimos tres meses de medición continua y/o se produzca una reducción en un 5% de la cobertura vegetal del SVAHT activo, respecto a lo observado en la línea de base.

- En caso de activarse la fase 1, el titular deberá elaborar un estudio con la siguiente información como contenidos mínimos:

a. Si la activación se produjo por la superación del VUM: o Determinar la interacción de los niveles de aguas superficiales y subterráneas que alimentan la zona de vegetación del SVAHT.

o Determinar si los descensos son originados por los pozos de bombeo del salar de Pedernales, o se deben a causas externas.

o Analizar el estado de los organismos de la variable hidrobiológica.

b. Si la activación se produjo por una disminución superior al 5% de la cobertura vegetal:

o Determinar si la disminución de la cobertura vegetal se debe al funcionamiento del proyecto o a causas externas.

- El estudio será entregado a la DGA de la Región de Atacama y SAG de la Región de Atacama quienes deberán resolver, en base a los antecedentes presentados por el titular, si la activación del PSAV se debe a los efectos del bombeo o no en un plazo no superior a los 3 meses desde la activación del nivel de acción.

Tabla 13.1. Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario en la Cuenca de Pedernales

<p>• Si la autoridad (DGA y SAG) resuelve que el descenso es provocado por los efectos del bombeo, se activará la Fase 2 del PSAV, en caso contrario, se desactivará la Fase 1 de PSAV.</p> <p><b>Fase 2:</b></p> <p>a. Si la activación de la fase 2, se debe exclusivamente a la activación del VUM, el Titular deberá:</p> <p>o Trasladar el 50% del caudal total de bombeo. Recordar que el otro 50% del caudal debe ser trasladado desde el inicio de la fase de operación del proyecto sin depender de la activación del PSAV. El traslado del punto de extracción debe ser al menos, a 5 km aguas arriba del campo de pozos del Llano Pajaritos, alejados del SVAHT activo.</p> <p>o Presentar a la DGA de la Región de Atacama en un plazo no superior a 3 meses desde la activación de la Fase 2, dos puntos de monitoreo para cada uno de los nuevos pozos y sus correspondientes umbrales de activación. La ubicación de estos pozos y umbrales de activación deberá ser válida por la DGA de la Región de Atacama.</p> <p>b. Si la activación de la Fase 2, se debe exclusivamente a la disminución en un 5% de la cobertura vegetal determinada en la línea de base, el titular deberá:</p> <p>o Trasladar el 50% del caudal total de bombeo. Recordar que el otro 50% del caudal debe ser trasladado desde el inicio de la fase de operación del proyecto sin depender de la activación del PSAV. El traslado del punto de extracción debe ser al menos, a 5 km aguas arriba del campo de pozos del Llano Pajaritos, alejados del SVAHT.</p> <p>o Presentar a la DGA de la Región de Atacama en un plazo no superior a 3 meses desde la activación de la Fase 2, dos puntos de monitoreo para cada uno de los nuevos pozos y sus correspondientes umbrales de activación. La ubicación de estos pozos y umbrales de activación deberá ser válida por la DGA de la Región de Atacama.</p> <p>o Reducir hasta 40 lt/s el caudal de extracción. Estos 40 lt/s son adicionales a los 40 lt/s ya reducidos como compromiso voluntario que debe materializarse desde el inicio de la fase de operación del proyecto sin depender de la activación del PSAV.</p> <p>• Los 40 lt/s a reducir, se realizarán en 2 etapas de 20 lt/s cada una que se describen a continuación:</p> <p>i. Activada la Fase 2 de PSAV, se reducirá automáticamente 20 lt/s.</p> <p>ii. Si los 20 lt/s reducidos anteriormente, no genera una recuperación de la cobertura vegetal del SVAHT tal que ésta sea inferior al 5% en los 3 meses siguientes desde la activación de la medida, se deberá reducir otros 20 lt/s.</p> <p>c. Si la fase 2 se activa por ambas condiciones, es decir, niveles freáticos bajo el UVM y pérdida de cobertura vegetal sobre el 5% de lo presentado como línea de base, el titular deberá:</p> <p>o Presentar toda la información contenida en los puntos a) y b).</p> <p>d. Si la activación de la Fase 2 se debió exclusivamente por la activación del VUM, no podrá desactivarse en un plazo inferior a 6 meses desde su activación. La desactivación ocurrirá cuando el nivel piezométrico en todos los puntos de control sea superior al VUM en el 50% de las mediciones en los últimos tres meses de medición continua.</p> <p>e. Si la activación de la Fase 2 se debió exclusivamente por la pérdida de cobertura vegetal, no podrá desactivarse en un plazo inferior a 1 año desde su activación. La desactivación ocurrirá cuando la pérdida de cobertura de los últimos 12 meses sea inferior al 5% definido como umbral máximo permitido.</p>
--

Tabla 13.1. Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario en la Cuenca de Pedernales

	<p>f. En caso de que ambos umbrales de activación estén activos, VUM y cobertura vegetal, la desactivación del PSAV deberá cumplir conjuntamente las condiciones del punto d) y e).</p> <p>g. El Titular deberá enviar un reporte de desactivación del PSAV a la DGA y SAG quienes autorizarán la desactivación en un plazo no superior a 3 meses.</p> <p>El Titular deberá esquematizar el funcionamiento del PSAV en un diagrama de flujo, que indique claramente las variables de control, decisiones, acciones y todos los eventos que se requieran para su entendimiento y seguimiento.</p> <p><u>Justificación:</u> considerando los niveles de extracción de agua subterránea en el Salar de Pedernales podría generar disminuciones en los niveles freáticos que afecten a los SVAHT presentes en el Salar.</p>
Lugar, forma y oportunidad de implementación	<p>Lugar:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 29 pozos o piezómetros</li> <li>• 18 punteras</li> <li>• Estaciones meteorológicas</li> </ul> <p>El detalle de la ubicación de estos puntos se presenta en el Apéndice 1 del Anexo 1-2 de la Adenda Excepcional.</p> <p>Forma:</p> <p>En los pozos o piezómetros y punteras se medirá:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Profundidad del nivel freático.</li> </ul> <p>En las estaciones meteorológicas se medirá:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Presión</li> <li>• Altura de nieve</li> <li>• Radiación solar</li> <li>• Velocidad y dirección del viento</li> <li>• Temperatura</li> <li>• Humedad relativa</li> <li>• Precipitación</li> <li>• Evaporación desde el suelo (estación Centro Salar).</li> </ul> <p>Calidad de las aguas, se medirá calidad de las aguas en 9 puntos, cuyo detalle se describe en el punto 2.2.3 (Tabla 2-4) del Apéndice 1 del Anexo 1-2 de la Adenda Excepcional. Este monitoreo incluirá el análisis de Conductividad Eléctrica (CE), pH e iones mayoritarios.</p> <p>Instalación de sensores de medición continua de nivel piezométrico, se registrará dos veces al día el nivel piezométrico en 10 puntos de monitoreo ubicados en el entorno del SVAHT y del campo de pozos de bombeo, con descarga de datos trimestral. El detalle de los puntos de monitoreo se describe en el punto 2.2.4 (Tabla 2-5) del Apéndice 1 del Anexo 1-2 de la Adenda Excepcional.</p> <p>Actualización del modelo. Cada 5 años.</p> <p>Oportunidad: Desde el inicio de la fase de construcción del Proyecto hasta el final de la fase de operación. Se continuará con el seguimiento una vez acabada la operación, hasta que los niveles piezométricos sean superiores a los observados previo a la entrada de operación del Proyecto Rajo Inca.</p> <p>La frecuencia de medición será:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Profundidad nivel freático: mediciones mensuales.</li> <li>2. Variables climáticas: mediciones horarias con descarga de los datos trimestral</li> <li>3. Calidad de las aguas: mediciones trimestrales.</li> </ol>

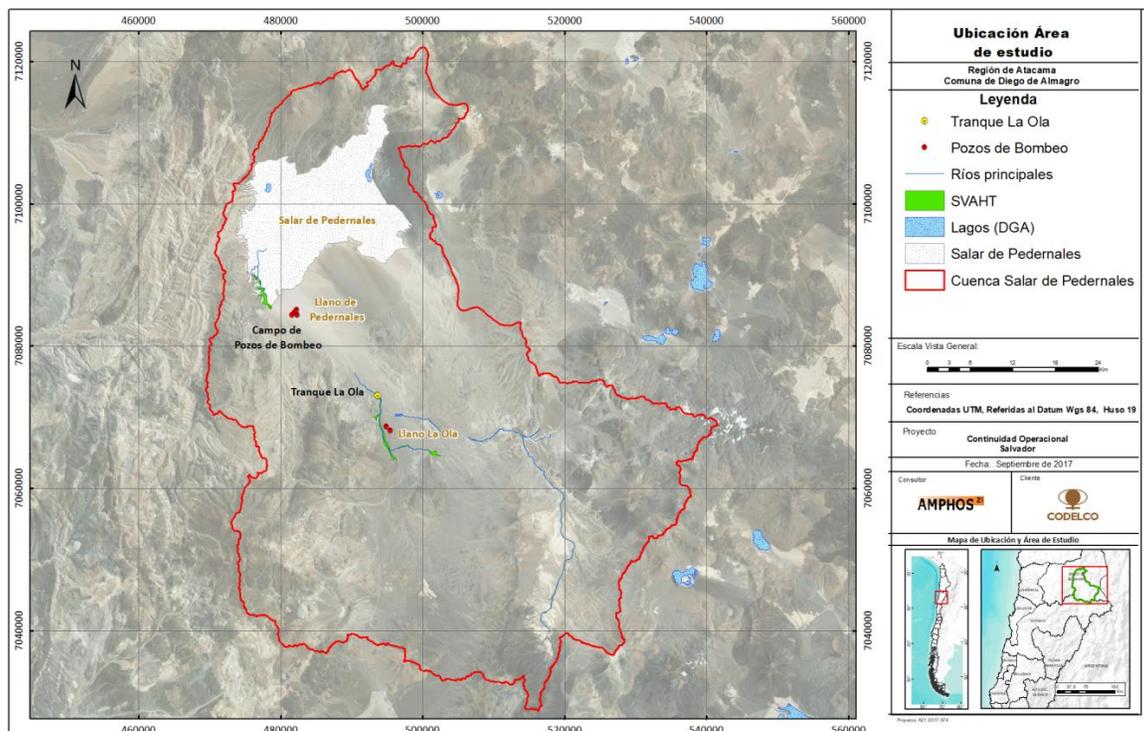
Tabla 13.1. Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario en la Cuenca de Pedernales	
	<ol style="list-style-type: none"><li>4. Sensores de medición continua: 2 mediciones por día con descarga de los datos trimestral.</li><li>5. Actualización del modelo. No aplica</li></ol>
Indicador que acredite su cumplimiento	Registros de Profundidad nivel freático, Variables climáticas, Calidad de las aguas, Sensores de medición continua y Actualización del modelo.
Forma de control y seguimiento	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Profundidad nivel freático: informe anual a SMA que incluya la base de datos (en Excel) y el análisis.</li><li>2. Variables climáticas: reporte semestral a SMA.</li><li>3. Calidad de las aguas: reporte semestral a SMA.</li><li>4. Sensores de medición continua: informe anual a SMA que incluya la base de datos (en Excel) y el análisis.</li><li>5. Actualización del modelo: cada 5 años a SMA.</li></ol>

### 3 Materiales y métodos

#### 3.1 Descripción del área de estudio

La cuenca Salar de Pedernales es la cuenca cerrada de mayor extensión de la región de Atacama. Se caracteriza por presentar unidades sedimentarias, principalmente evaporitas, y formaciones volcánicas e intrusivas. En su límite septentrional se encuentra el salar de Pedernales, el cual posee una superficie de 335 km<sup>2</sup>.

El salar de Pedernales es considerado como sitio prioritario para la conservación, este se ubica a una distancia de aproximadamente 27 km en línea recta del sector Salvador. En los sectores conocidos como Llano de Pedernales y Llano La Ola se bombean aguas salobres de las napas, las cuales son utilizadas como aguas de uso industrial. En la Figura 3-1 se presenta la ubicación de las áreas de la cuenca Salar de Pedernales.



**Figura 3-1:** Mapa ubicación de la cuenca Salar de Pedernales. Fuente: Programa de Monitoreo cuenca de Salar de Pedernales, Amphos 21.

### 3.2 Puntos y programa de monitoreo

Los puntos de monitoreo considerados para el seguimiento de la calidad química en el PSAV son 9, de los cuales 3 corresponden a pozos/piezómetros y 6 a punteras (Tabla 3-1). Adicionalmente, se consideran 2 pozos comprometidos en el marco del acuerdo de avenimiento y transacción con el Consejo de Defensa del Estado (P-4a y P-19a). Los puntos se ubican en el SVAHT, en su entorno y en los sectores de recarga ubicados al sur y oeste del SVAHT. En el Anexo E se presentan los esquemas de habilitación de pozos.

El seguimiento en todos los puntos mencionados es trimestral y se realizará durante las fases de construcción y operación del PRI y se continuará con el seguimiento una vez acabada la operación, hasta que los niveles piezométricos sean similares a los observados previo a la entrada de operación del PRI.

**Tabla 3-1:** Puntos de seguimiento correspondientes a 5 pozos/piezómetros y 6 punteras.

Nombre punto	Este WGS84 (m)	Norte WGS84 (m)	Cota (m s.n.m.) (*)
CP-11	478.477	7.087.322	3.228
PB-11	479.585	7.084.355	3.380
PB-12	480.889	7.085.683	3.373
PU-31	477.255	7.088.087	3.357
PU-43	476.634	7.087.031	3.361
PU-44	476.511	7.088.181	3.360
PU-45	476.775	7.089.102	3.361
PU-48	477.596	7.088.149	3.358
PU-49	478.041	7.087.092	3.369
P-19a	480.343	7.08.5060	3.375
P-4a	481.828	7.086.312	3.375

(\*): Datos obtenidos desde documento "Esquema de los Pozos y Punteras en Salar de Pedernales" de GAC (año 2019).

La ubicación de los puntos de monitoreo se presenta en la Figura 3-2.

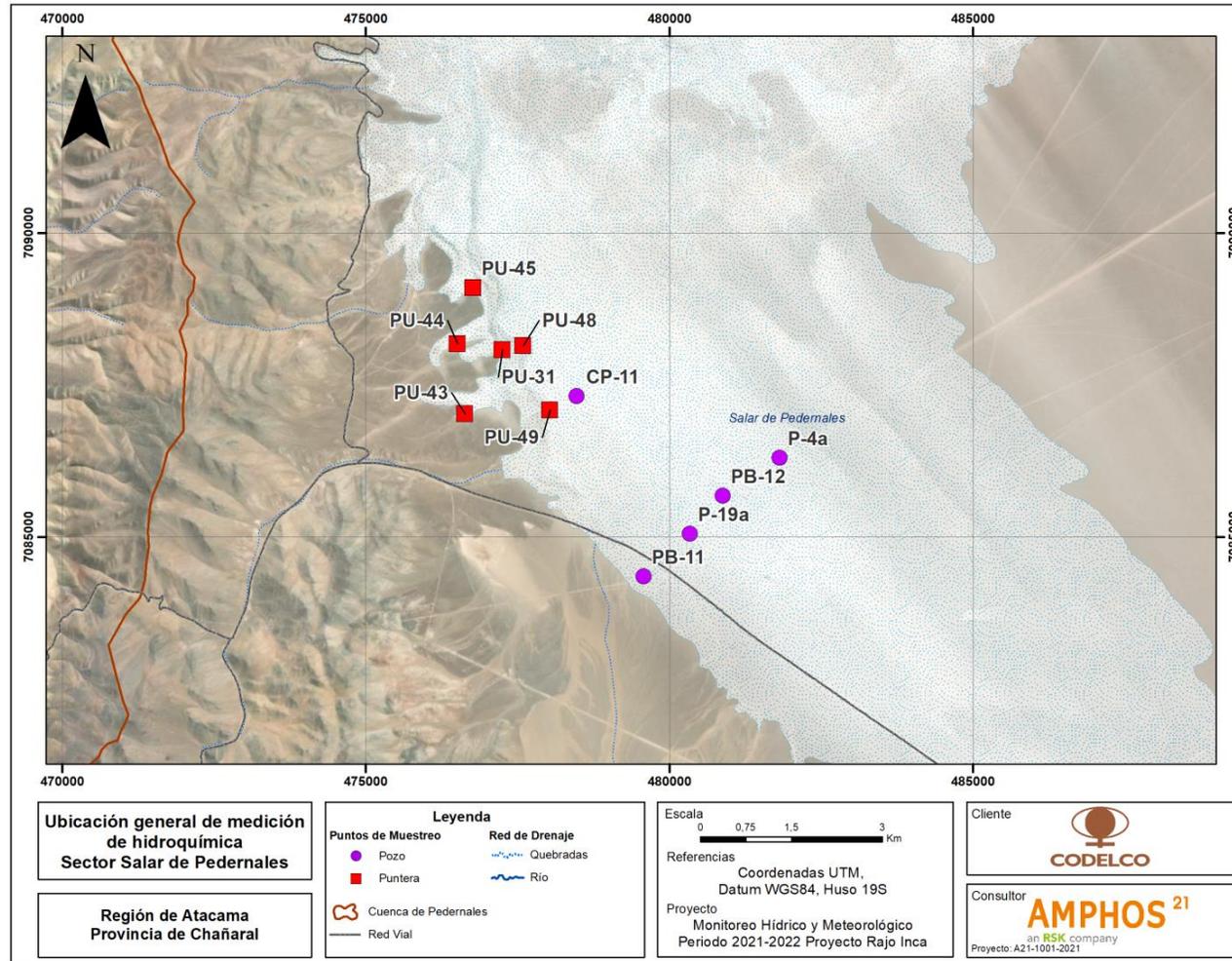


Figura 3-2: Ubicación de los puntos de monitoreo hidroquímico en la cuenca Salar de Pedernales.

### 3.3 Metodologías

#### 3.3.1 Mediciones parámetros fisicoquímicos in situ

Los trabajos de terreno de medición de los parámetros fisicoquímicos han sido realizados por la ETFA AGQ desde el mes de abril 2021. Las acreditaciones ETFA correspondientes se encuentran adjuntas en el Anexo B.

En los puntos de monitoreo se miden los siguientes parámetros fisicoquímicos:

- Conductividad eléctrica (CE).
- Potencial de hidrógeno (pH).

Las mediciones de estos parámetros son efectuadas en el mismo cuerpo de agua o en una muestra representativa previamente extraída del cuerpo de agua. En ambos casos, se considera que la muestra es tomada in situ.

#### 3.3.2 Toma de muestra

Los trabajos de terreno asociados a la toma de las muestras han sido realizados por la ETFA AGQ desde el mes de abril de 2021. Las acreditaciones ETFA correspondientes se encuentran adjuntas en el Anexo B.

La toma de muestras en los puntos definidos se realiza mediante la metodología normalizada en la NCH 411/11. Para ello, las muestras se obtienen utilizando una bomba o una botella vertical, la cual es ingresada en el punto de monitoreo y se extrae un volumen de agua suficiente para el llenado del set de envases. En el caso de utilizar la bomba, se verifica previamente la estabilización de los parámetros fisicoquímicos antes del llenado del set de envases.

Los envases son ambientados, antes de su llenado, a lo menos 3 veces con la misma agua del punto monitoreado (siempre y cuando no contenga preservantes en su interior).

Una vez terminado con el llenado de los envases, estos son guardados en neveras con gel pack para mantener la cadena de frío y ser trasladados al laboratorio, respetando los tiempos indicados en la normativa anteriormente señalada.

Además, en cada punto monitoreado, se realiza un registro fotográfico del punto al momento de su visita.

### 3.3.3 Análisis hidroquímico

Los parámetros hidroquímicos analizados en el laboratorio certificado son los indicados en la Tabla 3-2.

**Tabla 3-2:** *Parámetros de laboratorio analizados.*

Parámetros	
Calcio	Sulfato
Magnesio	Cloruro
Sodio	Nitrato
Potasio	Balance Iónico
Bicarbonato	-

### 3.3.4 Control de calidad

Una vez los resultados de laboratorio son emitidos, estos son verificados mediante un control de calidad. En el control de calidad se comparan los resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos in situ con los respectivos obtenidos del laboratorio, y también se verifica el balance iónico de cada muestra.

Adicionalmente, se revisa si existe alguna desviación de los valores informados frente a la data histórica.

Para validar una muestra se siguen los siguientes márgenes de variaciones:

- Conductividad eléctrica (a 25°C): se verifica que la diferencia entre el dato tomado in situ y el resultante del análisis de laboratorio no sea superior al 10% entre ellos.
- pH: se verifica que la diferencia entre el dato tomado in situ y el resultante del análisis de laboratorio no sea superior al 10% entre ellos.
- Balance iónico: En las aguas naturales se espera que sus elementos se encuentren en equilibrio iónico (electroneutralidad). Por lo tanto, se aceptan las mediciones que presenten una diferencia menor o igual al 10%.

## 4 Resultados

### 4.1 Toma de muestras

En el primer semestre del 2023 se tomaron muestras trimestrales de manera manual y a nivel del agua (superficie) en 10 puntos en la cuenca Salar de Pedernales. En la Tabla 4-1 se indican las fechas, el método de muestreo y la profundidad del nivel.

**Tabla 4-1:** Puntos monitoreados, fecha de toma de muestra, método de muestreo y profundidad del nivel.

Nombre punto	Fecha	Método de muestreo	Profundidad de nivel (m b.n.t.)
CP-11	09-03-2023	Bailer	1,232
CP-11	08-06-2023	Bailer	1,209
PB-11	08-03-2023	Bailer	21,731
PB-11	01-06-2023	Bailer	22,226
PB-12	08-03-2023	Bailer	15,437
PB-12	01-06-2023	Bailer	15,392
PU-31	16-03-2023	Bailer	0,139
PU-31	15-06-2023	-	(*)
PU-43	29-03-2023	Bailer	0,943
PU-43	07-06-2023	Bailer	0,692
PU-44	16-03-2023	Bailer	0,180
PU-44	08-06-2023	Bailer	0,128
PU-45	16-03-2023	Bailer	0,496
PU-45	30-06-2023	-	(***)
PU-48	09-03-2023	-	(**)
PU-48	12-06-2023	Bailer	0,115
PU-49	08-03-2023	-	(**)
PU-49	29-06-2023	Bailer	0,857
P-19a	15-03-2023	Bailer	17,284
P-19a	29-06-2023	Bailer	17,230
P-4a	15-03-2023	Bailer	16,358
P-4a	08-06-2023	Bailer	16,325

(\*): Punto congelado.

(\*\*): Sin Acceso.

(\*\*\*): Suspensión de actividades.

## 4.2 Parámetros fisicoquímicos in situ

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos de los pozos y punteras son presentados en la Tabla 4-2 y Tabla 4-3. De la Figura 4-1 a la Figura 4-8 se encuentran los gráficos con la evolución temporal de los resultados. Los datos se presentan adjuntos en el Anexo C en el formato que la SMA exige.

**Tabla 4-2:** Mediciones fisicoquímicas in situ en pozos realizadas en el primer semestre 2023.

Parámetros	CP-11		PB-11		PB-12		P-19a		P-4a	
	Mar.23	Jun. 23								
CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	4.732	4.703	(*)	3.046	4.766	4.670	4.711	4.478	4.769	4.828
pH (u pH)	7,49	6,98	7,54	7,88	7,59	6,87	7,81	7,67	7,80	6,99

(\*): Error de medición en terreno.

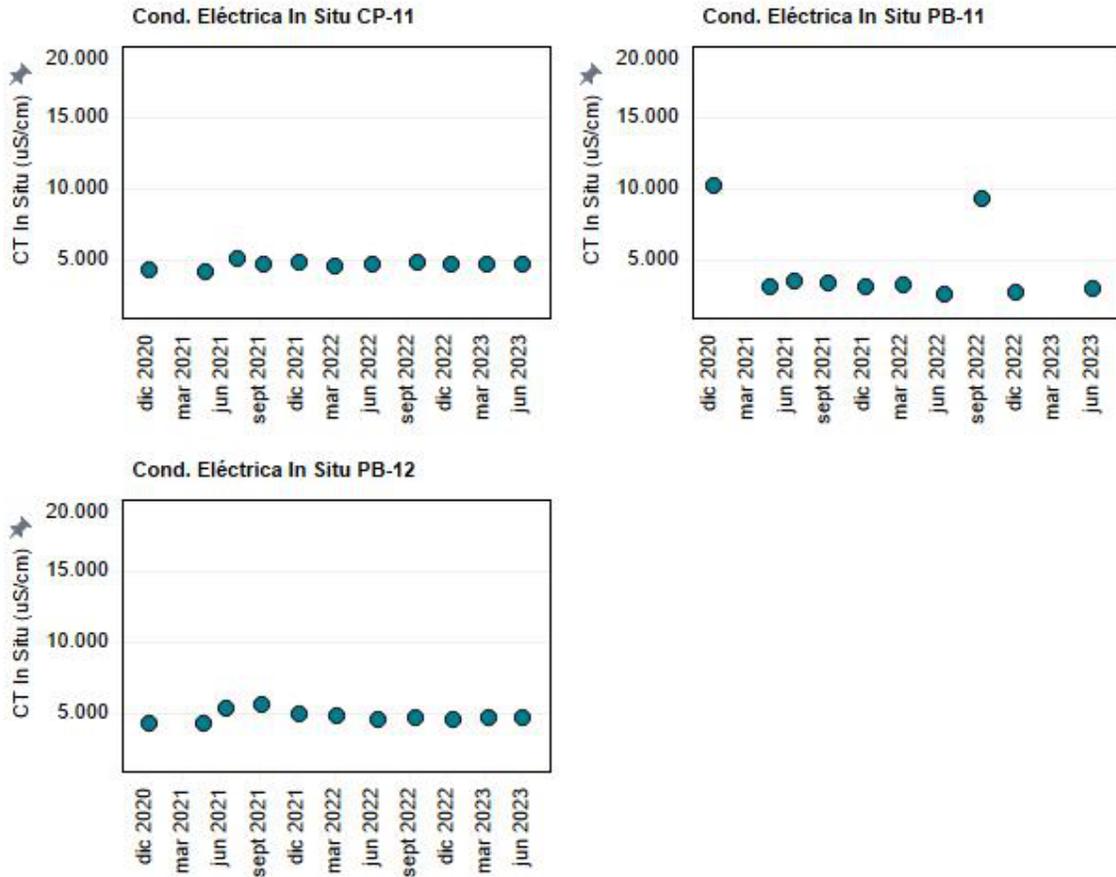


Figura 4-1: Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ (µS/cm).

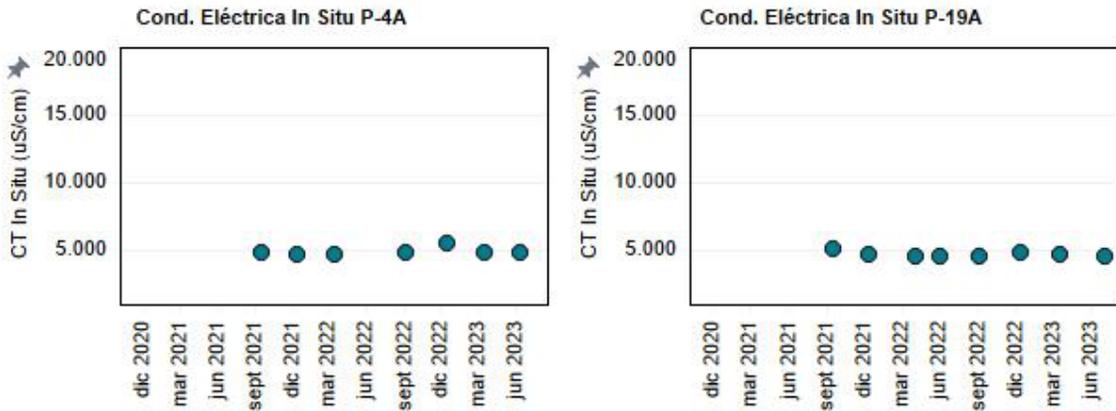


Figura 4-2: Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ (µS/cm).

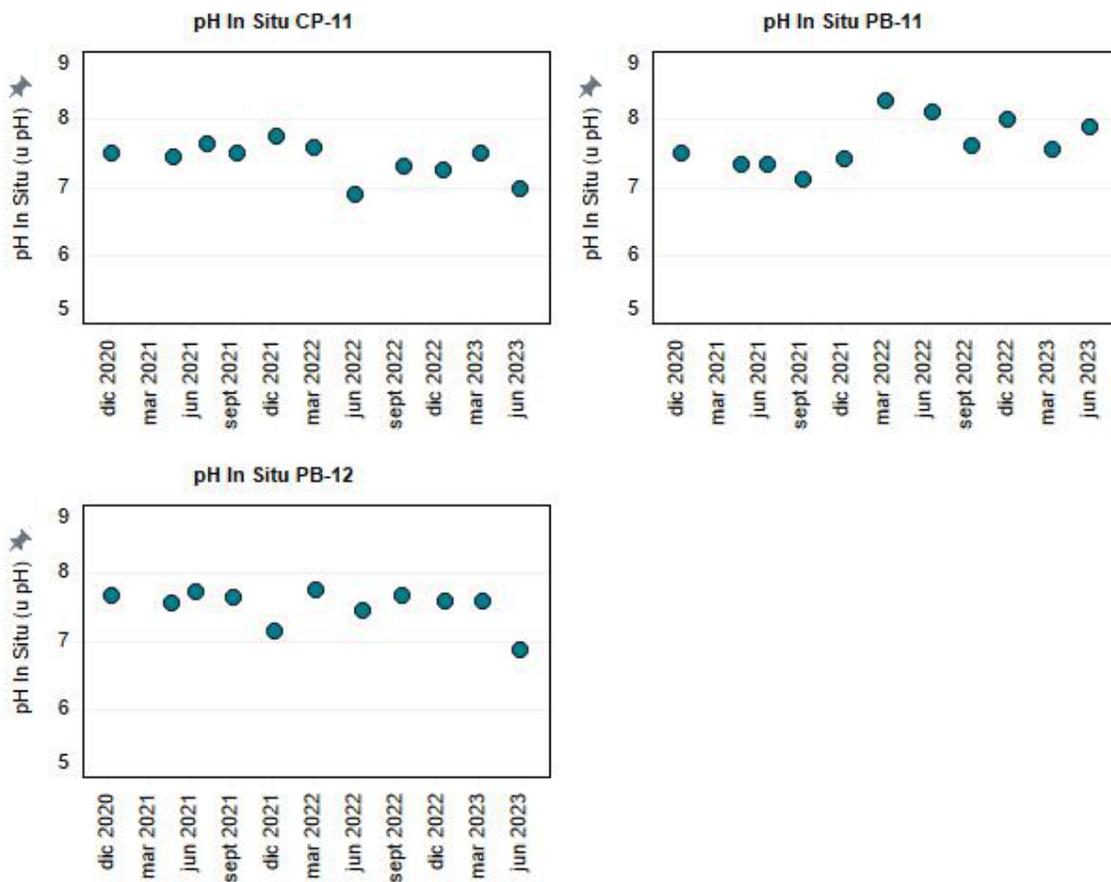


Figura 4-3: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH).

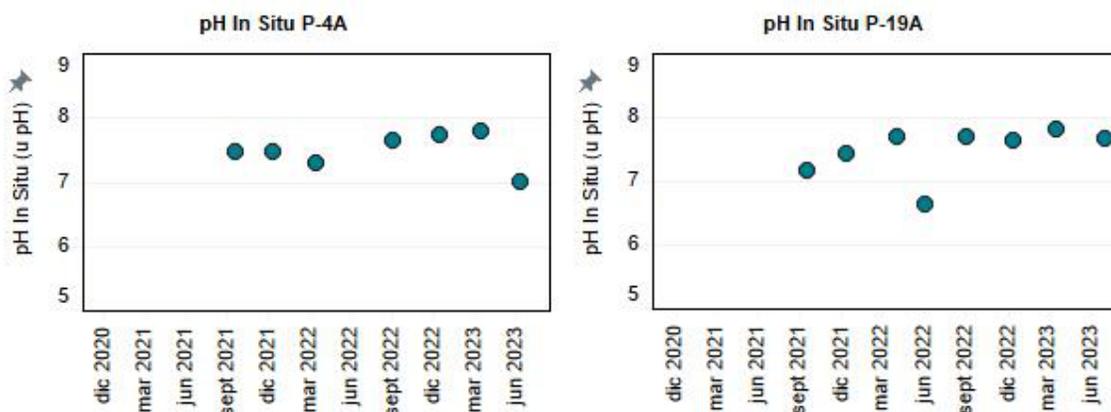


Figura 4-4: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH).

Tabla 4-3: Mediciones fisicoquímicas in situ en punteras realizadas en el primer semestre 2023.

Parámetros	PU-31		PU-43		PU-44	
	Mar.23	Jun.23	Mar.23	Jun.23	Mar.23	Jun.23
CE (µS/cm)	10.120	(*)	6.220	13.050	7.560	7.816
pH (u pH)	6,64	(*)	6,66	7,59	7,77	7,10

Parámetros	PU-45		PU-48		PU-49	
	Mar.23	Jun.23	Mar.23	Jun.23	Mar.23	Jun.23
CE (µS/cm)	8.144	(***)	(**)	4.996	(**)	5.975
pH (u pH)	7,75	(***)	(**)	7,38	(**)	7,47

(\*): Punto congelado.

(\*\*): Sin Acceso.

(\*\*\*) : Suspensión de actividades.

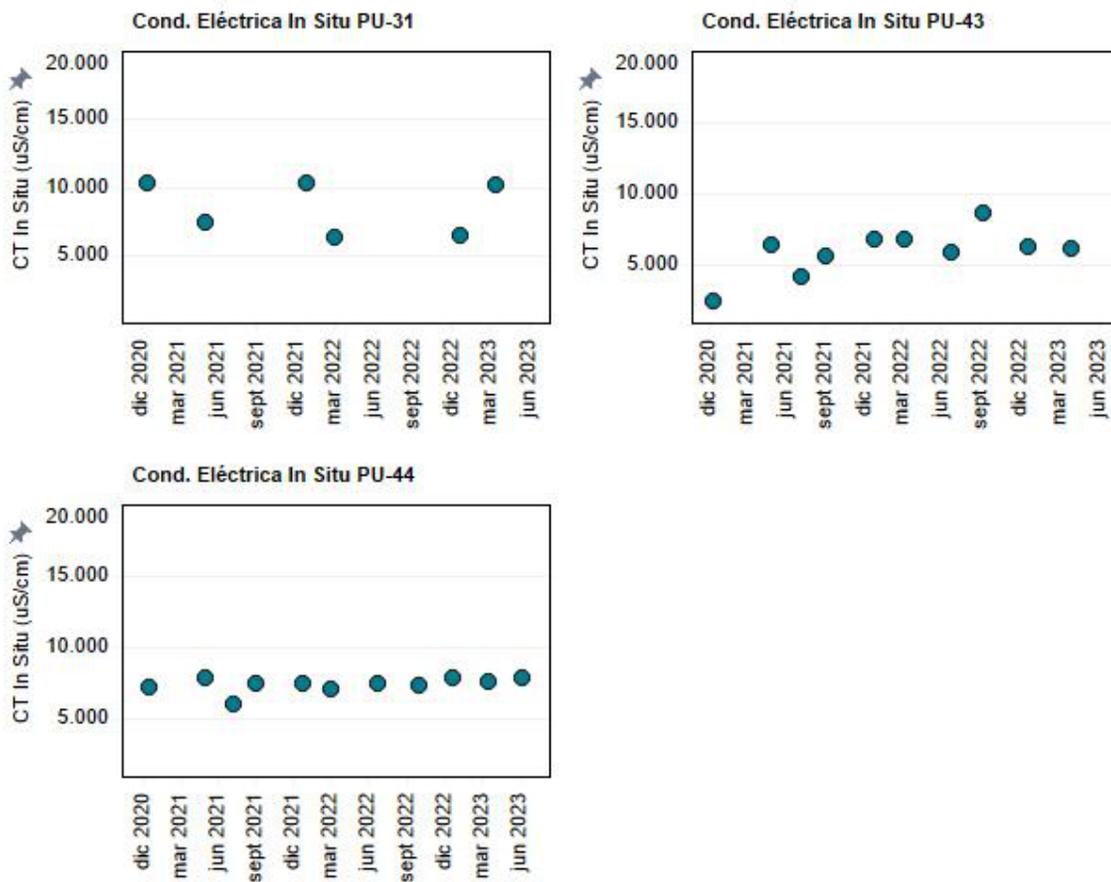


Figura 4-5. Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ ( $\mu\text{S/cm}$ ).

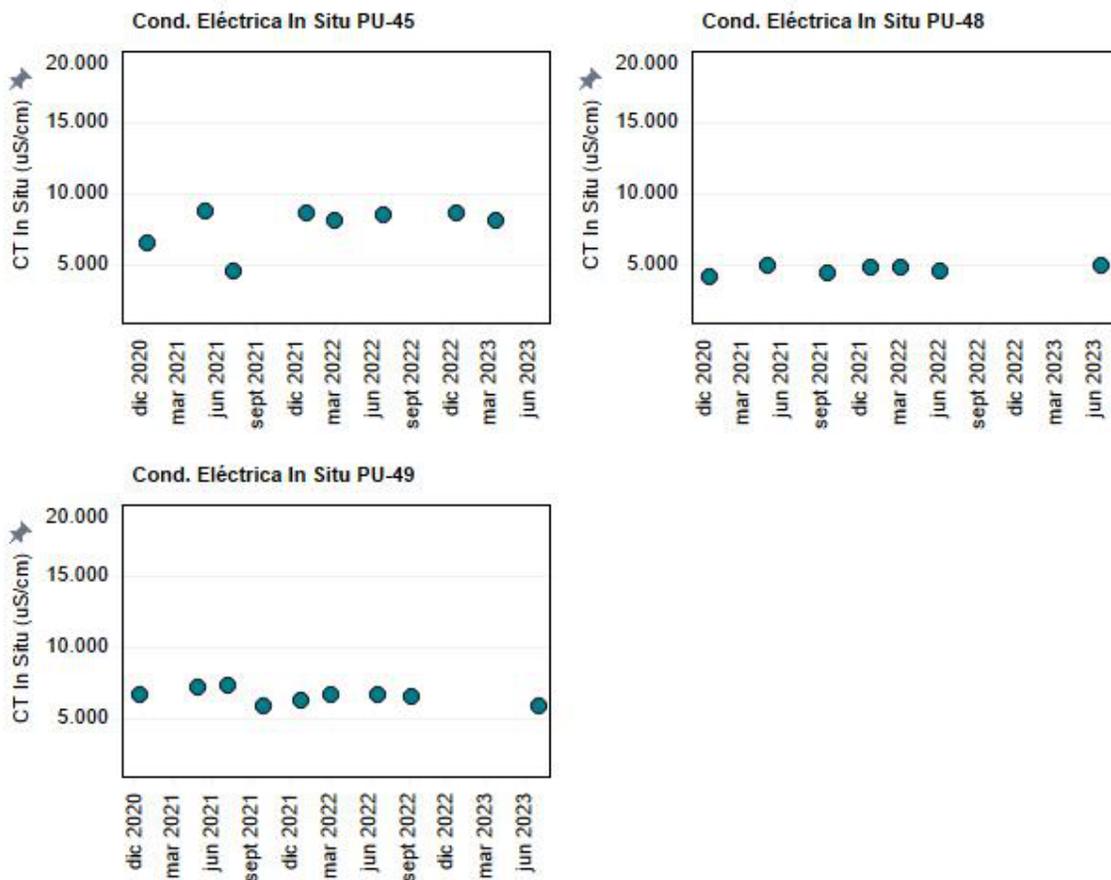


Figura 4-6. Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

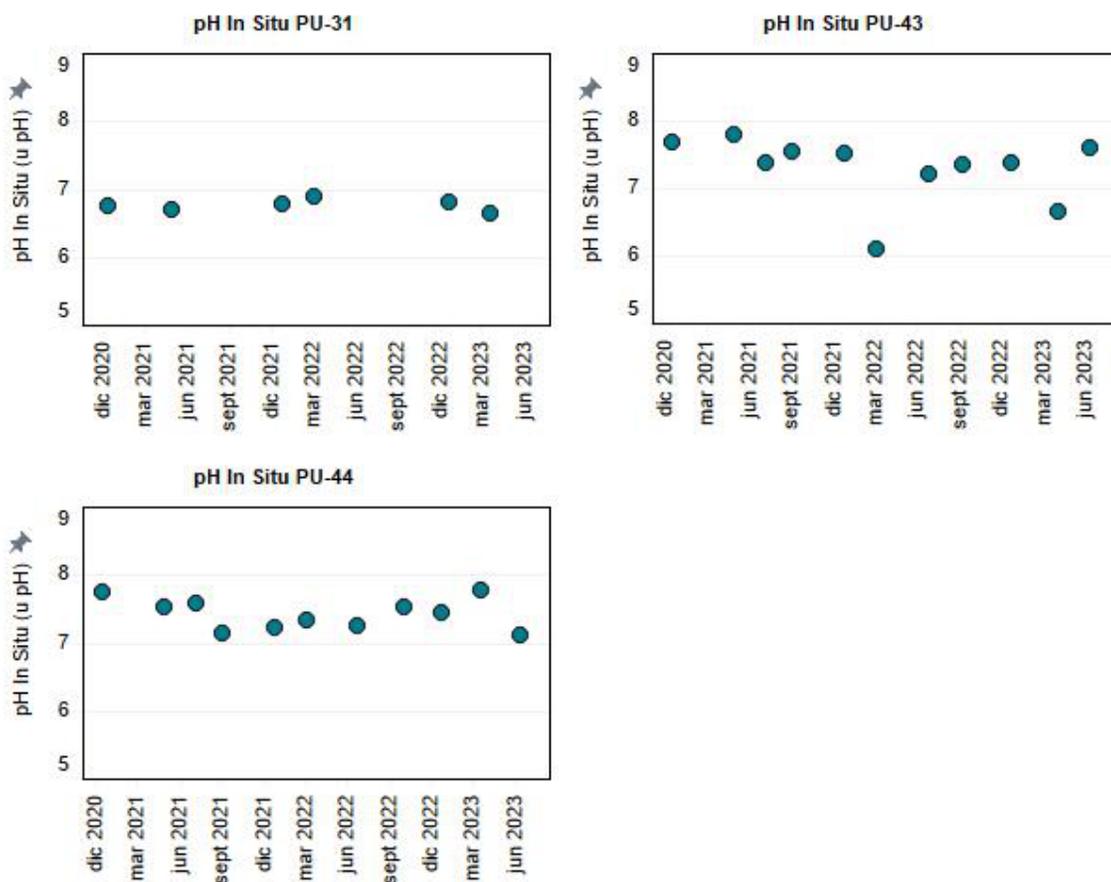
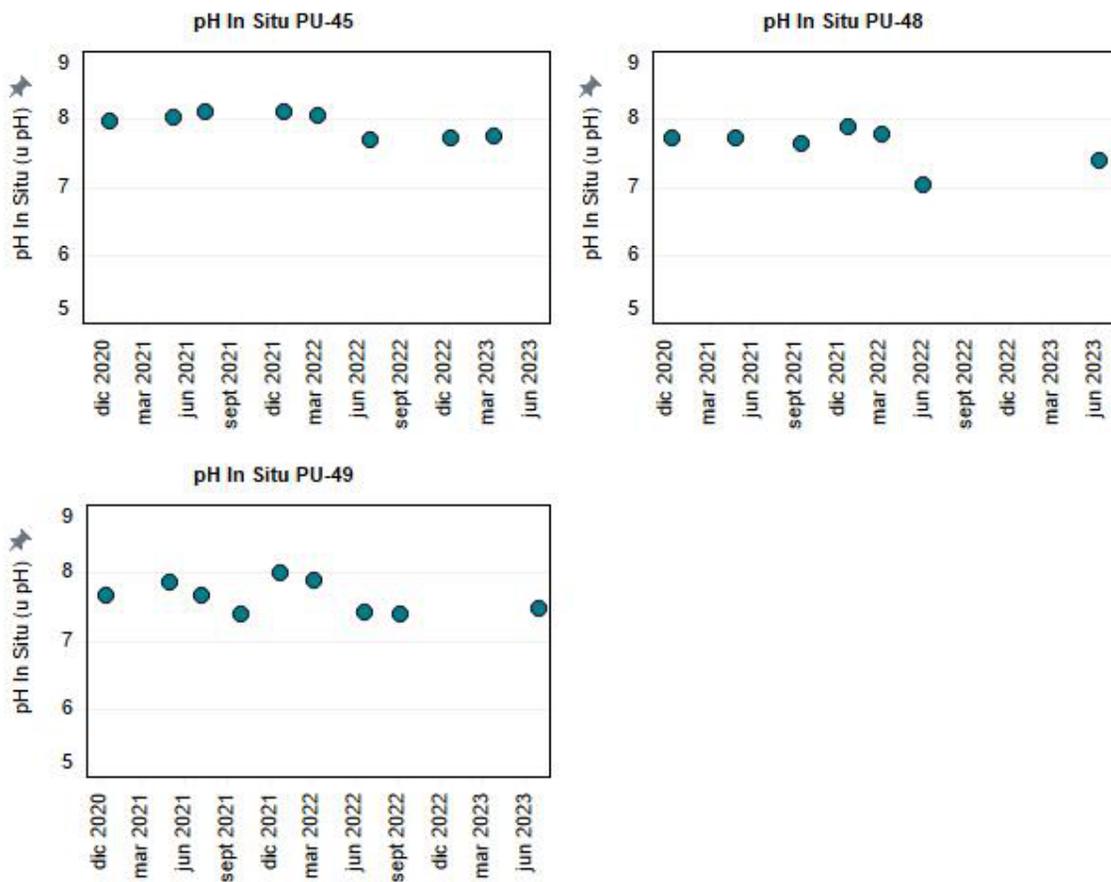


Figura 4-7: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH).



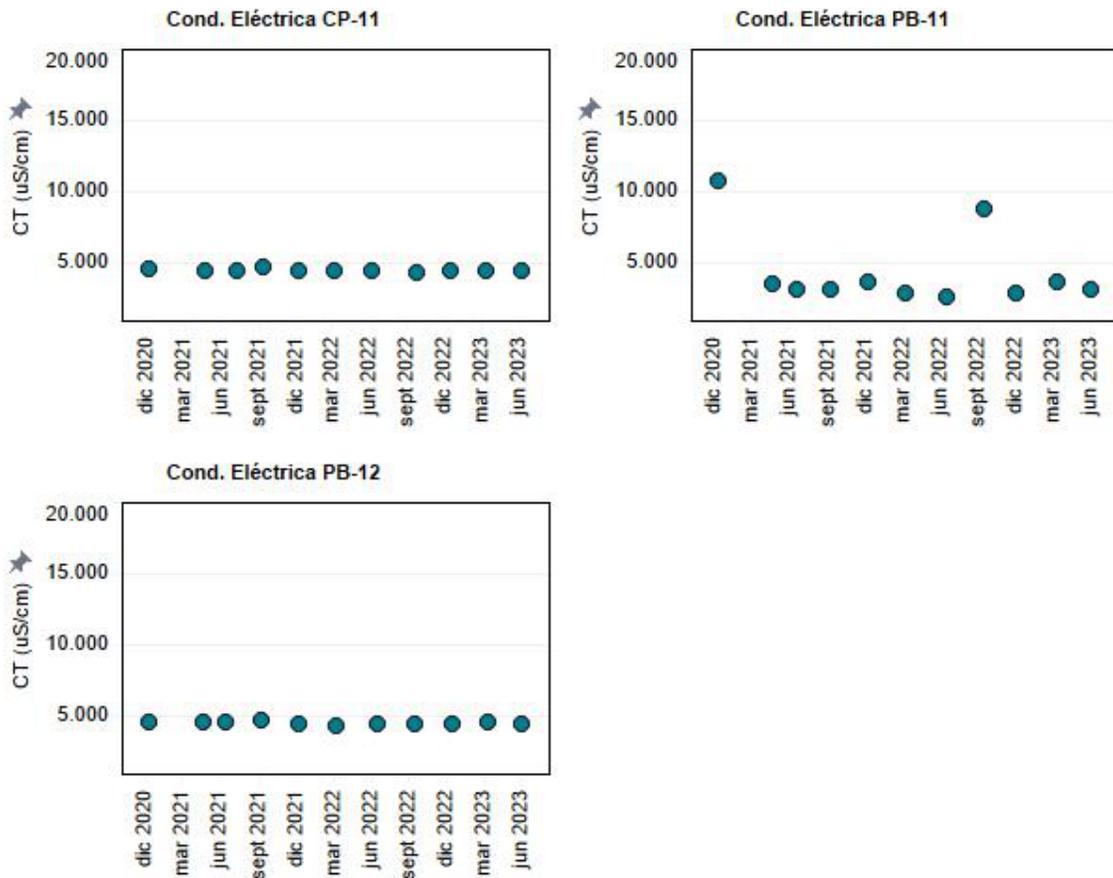
**Figura 4-8:** Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH).

### 4.3 Parámetros fisicoquímicos laboratorio

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos del análisis en laboratorio de los pozos y punteras son presentados en la Tabla 4-4 y la Tabla 4-5. De la Figura 4-9 a la Figura 4-16 se muestran los gráficos de evolución temporal. Los datos se presentan adjuntos en el Anexo C en el formato que la SMA exige.

**Tabla 4-4:** Mediciones fisicoquímicas de laboratorio en pozos realizadas en el primer semestre 2023.

Parámetros	CP-11		PB-11		PB-12		P-19a		P-4a	
	Mar.23	Jun. 23								
CE (μS/cm)	4.482	4.535	3.686	3.120	4.540	4.523	4.494	4.251	4.510	4.718
pH (u pH)	7,95	7,93	8,28	8,48	7,93	7,83	7,91	7,83	7,91	7,94



**Figura 4-9:** Evolución temporal de Conductividad eléctrica (μS/cm).

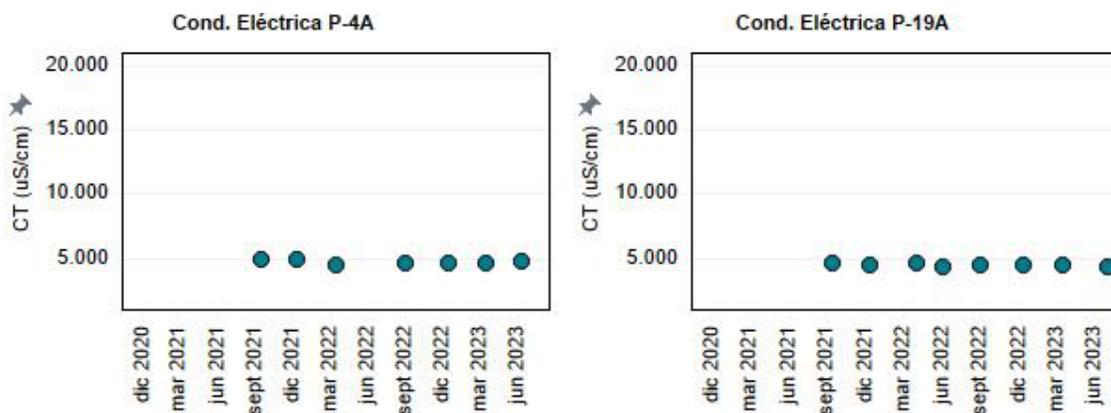


Figura 4-10: Evolución temporal de Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

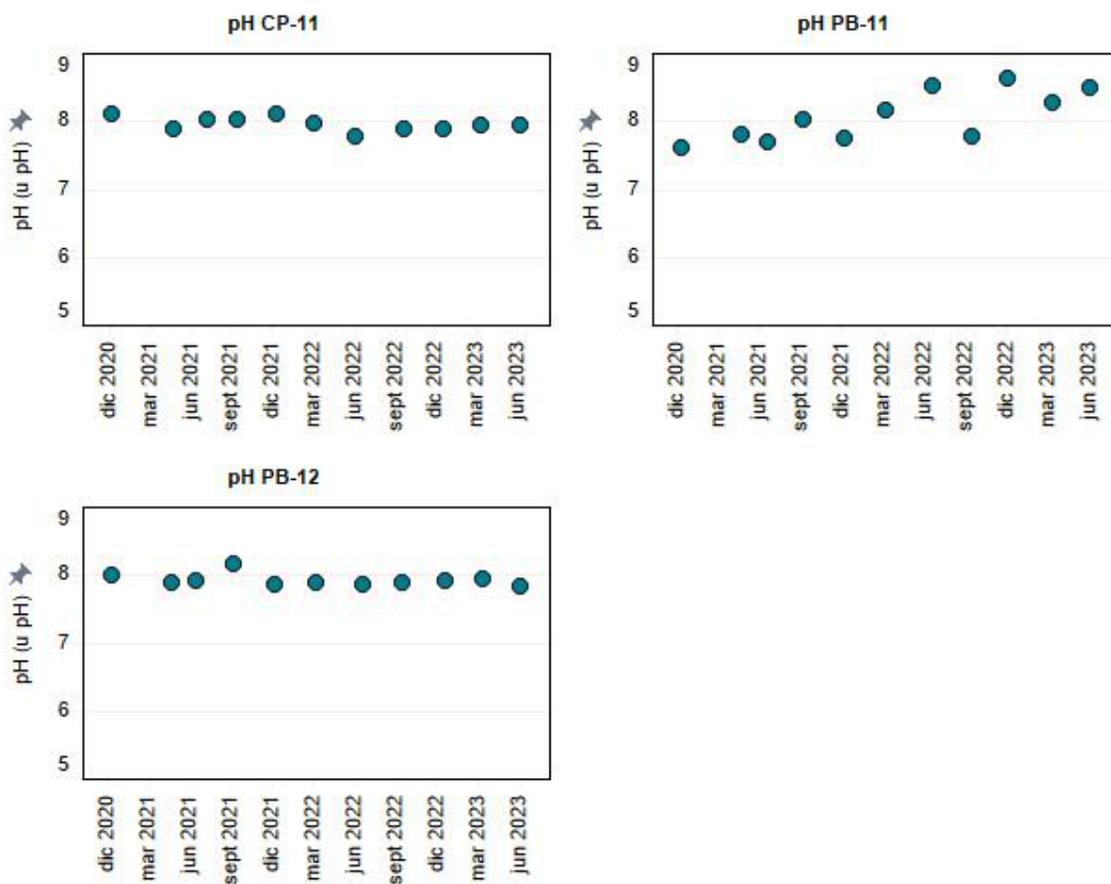


Figura 4-11: Evolución temporal de pH (unidades de pH).

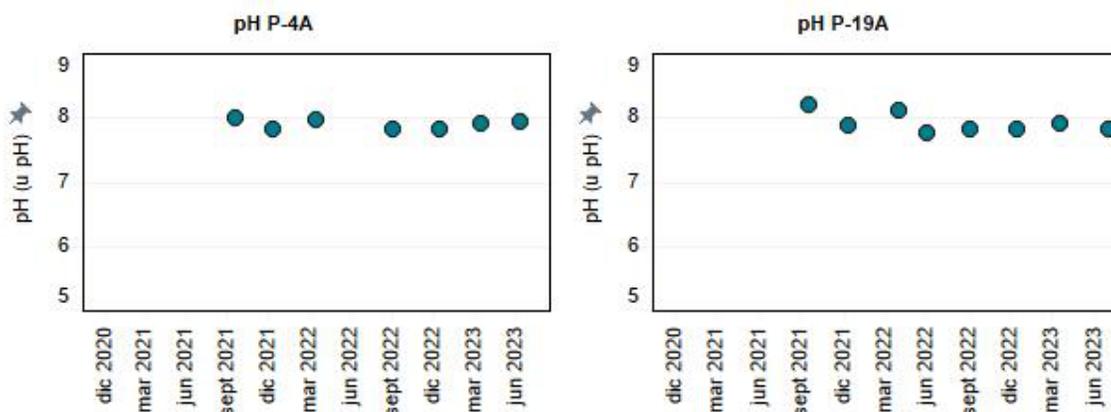


Figura 4-12: Evolución temporal de pH (unidades de pH).

Tabla 4-5: Mediciones fisicoquímicas de laboratorio en punteras realizadas en el primer semestre 2023.

Parámetros	PU-31		PU-43		PU-44	
	Mar.23	Jun.23	Mar.23	Jun.23	Mar.23	Jun.23
CE (μS/cm)	9.086	(*)	5.970	6.536	7.279	7.135
pH (u pH)	7,46	(*)	8,02	7,72	7,87	7,91
Parámetros	PU-45		PU-48		PU-49	
	Mar.23	Jun.23	Mar.23	Jun.23	Mar.23	Jun.23
CE (μS/cm)	8.063	(***)	(**)	4.429	(**)	5.497
pH (u pH)	8,02	(***)	(**)	7,90	(**)	7,84

(\*): Punto congelado.

(\*\*): Sin Acceso.

(\*\*\*) : Suspensión de actividades.

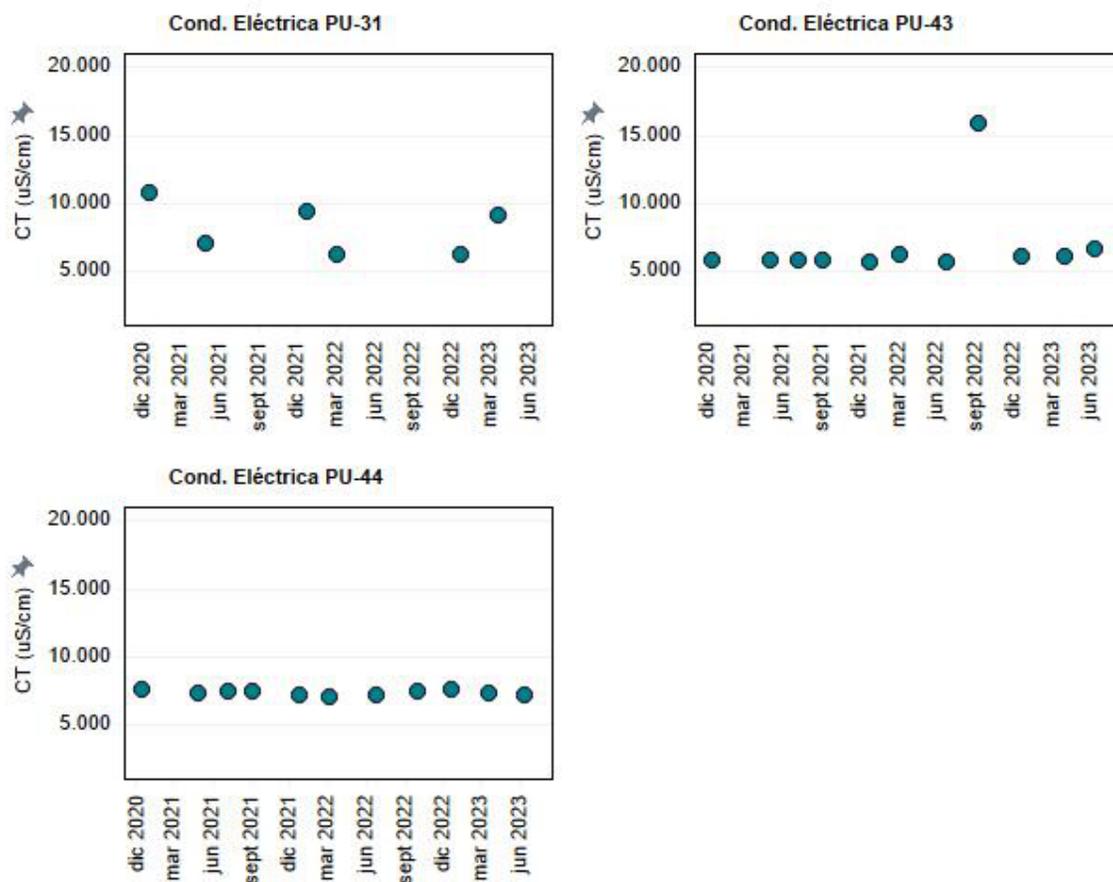
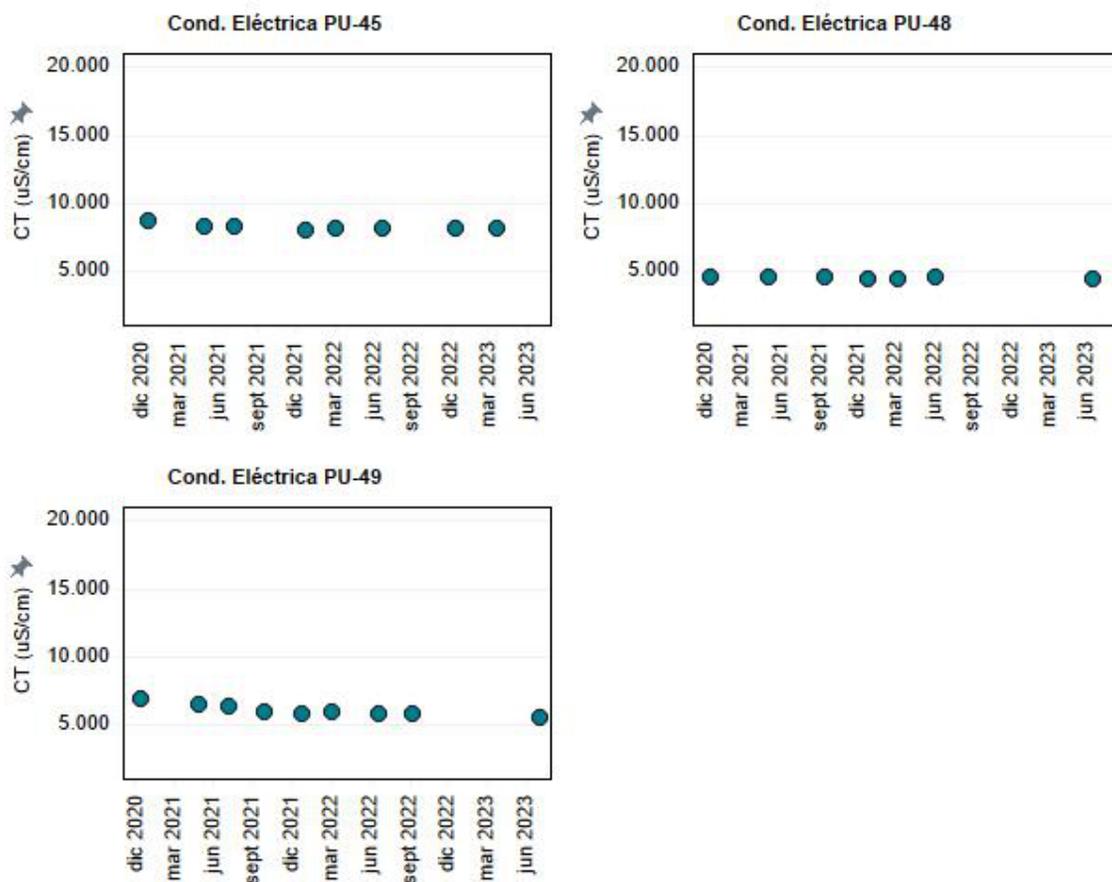


Figura 4-13: Evolución temporal de Conductividad eléctrica (µS/cm).



**Figura 4-14:** Evolución temporal de Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

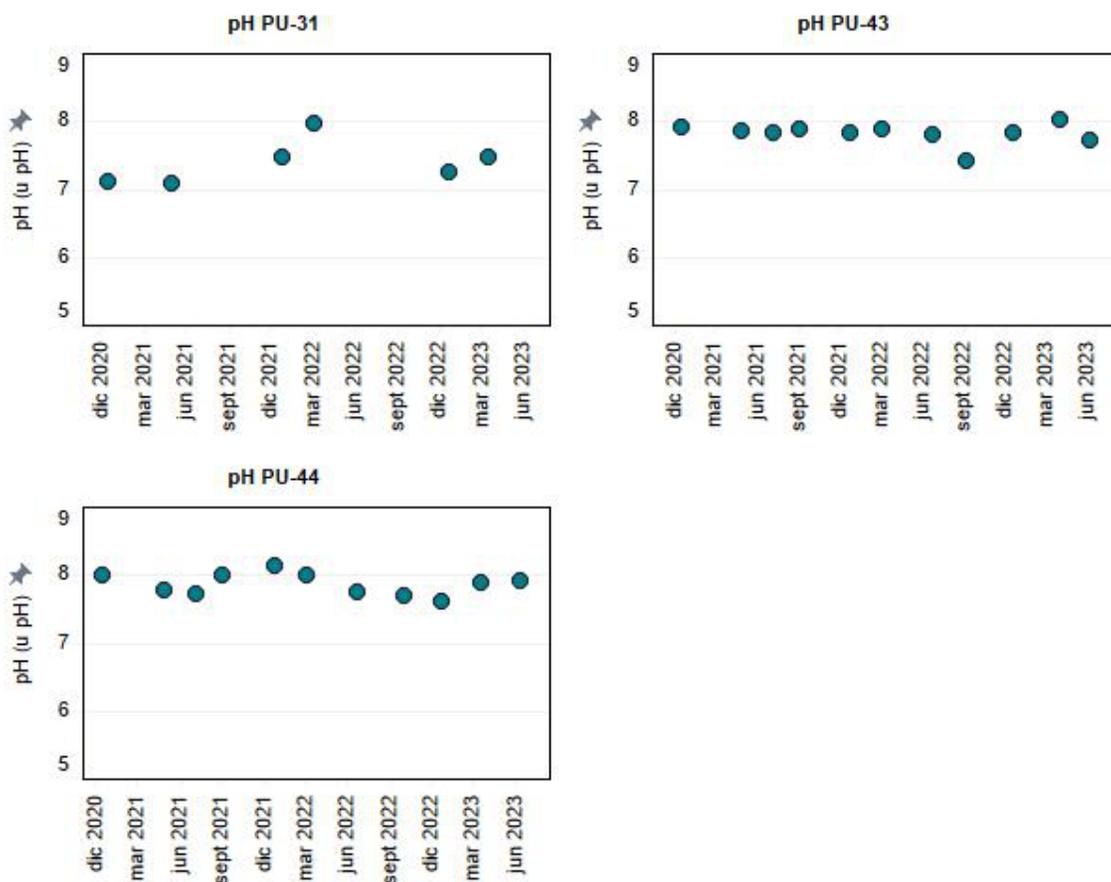


Figura 4-15: Evolución temporal de pH (unidades de pH).

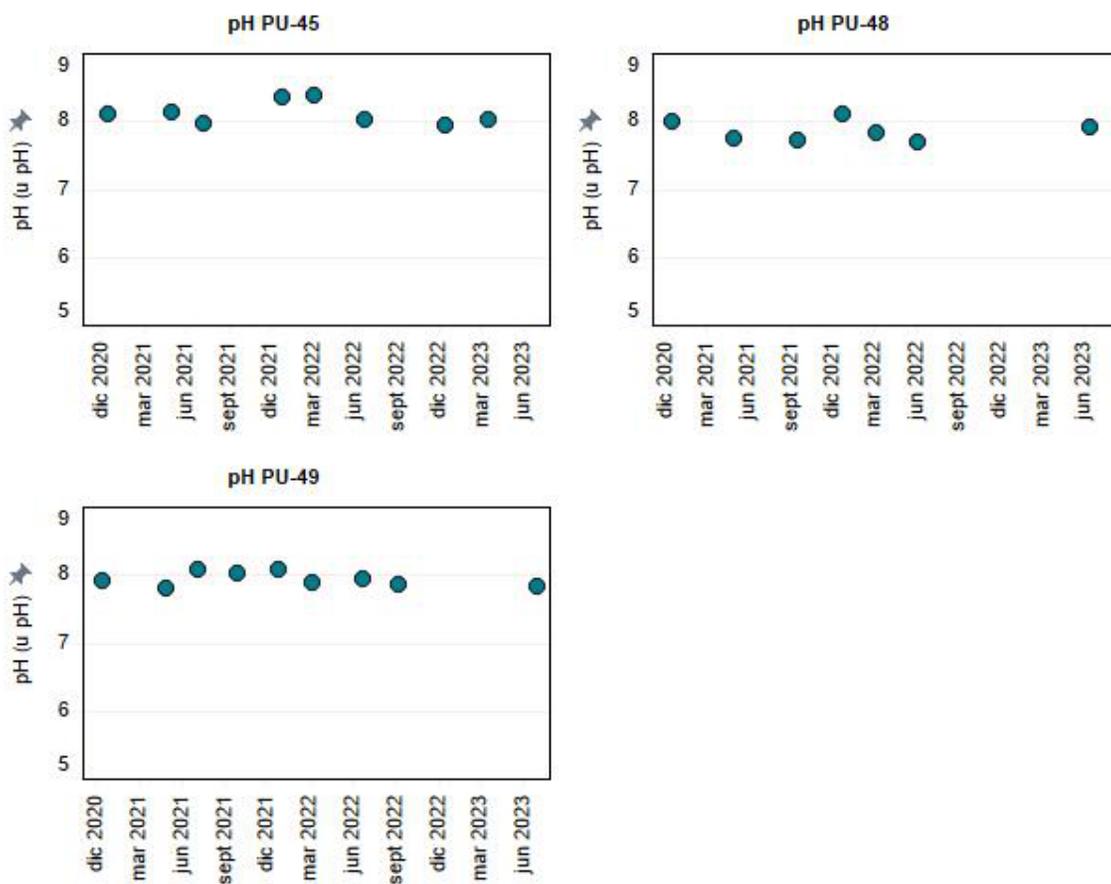


Figura 4-16: Evolución temporal de pH (unidades de pH).

#### 4.4 Cationes – aniones disueltos

Los resultados de los cationes y aniones disueltos obtenidos del análisis en laboratorio de los pozos y punteras son presentados en la Tabla 4-6 y Tabla 4-7. De la Figura 4-17 a la Figura 4-48 se muestra la evolución temporal de los resultados. Los datos se presentan adjuntos en el Anexo C en el formato que la SMA exige.

**Tabla 4-6:** Mediciones de cationes y aniones disueltos en pozos realizadas en el primer semestre 2023.

Parámetros	CP-11		PB-11		PB-12		P-19a		P-4a	
	Mar.23	Jun.23								
Calcio (mg/l)	125	121	79,1	28	133	131	115	35	123	145
Magnesio (mg/l)	47,7	38,8	33,5	12,4	52,9	37,1	36,2	35	38,4	39,7
Potasio (mg/l)	57,4	45,2	46,5	29,9	56,6	43,7	39,7	42,7	41,7	49,9
Sodio (mg/l)	674	614	656	459	753	608	720	603	722	590
Bicarbonato (mg/l)	121	111	9,54	1,99	124	113	145	108	158	115
Cloruro (mg/l)	1.115	1.272	832	612	1.185	1.155	1.319	1.239	1.413	1.347
Nitrato (mg/l)	2,03	3,83	9,54	1,99	4,31	4,42	4,72	4	8,37	5,51
Sulfato (mg/l)	213	284	414	491	231	286	313	395	318	288

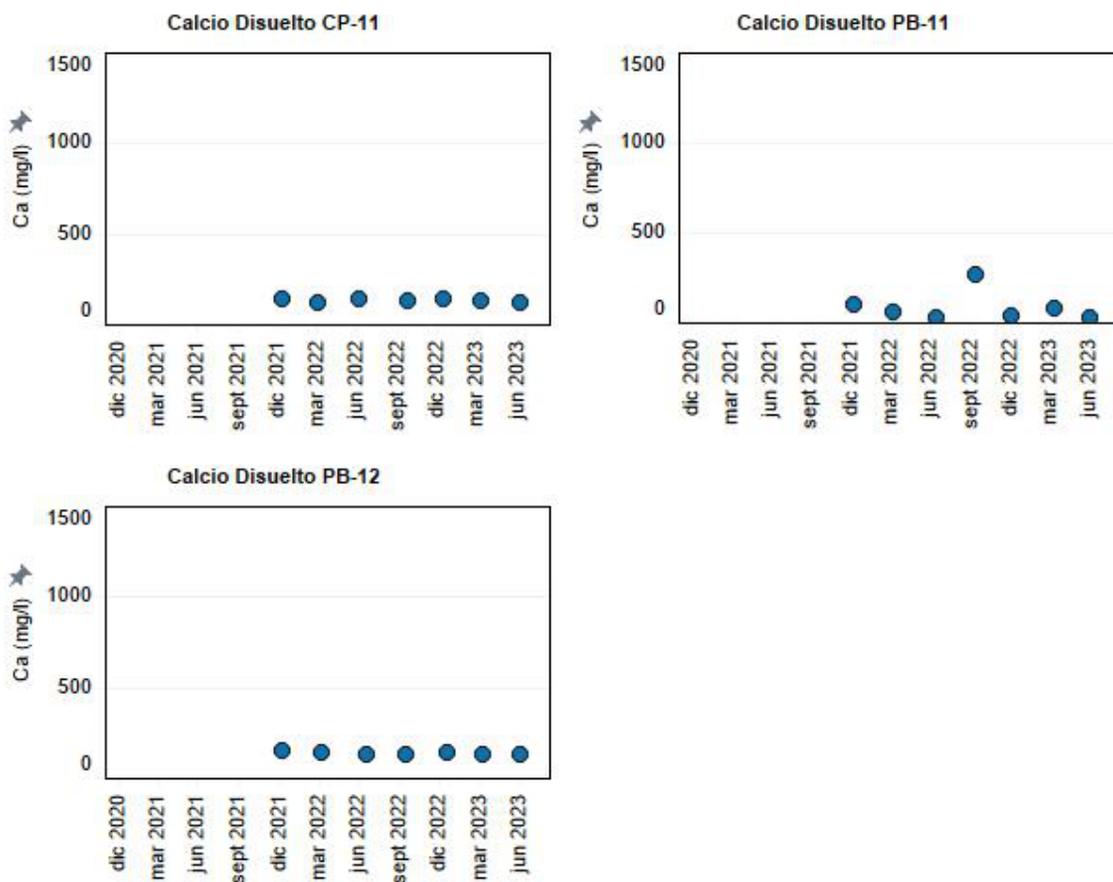


Figura 4-17: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/l).

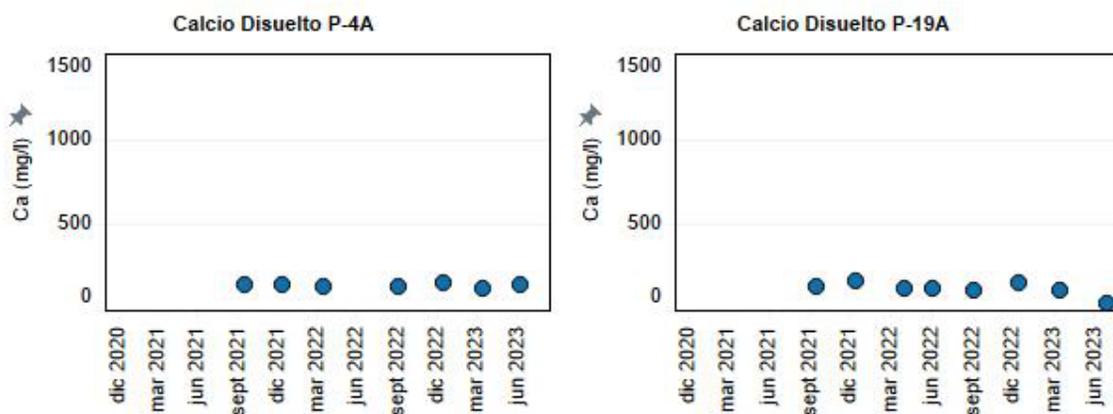


Figura 4-18: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/l).

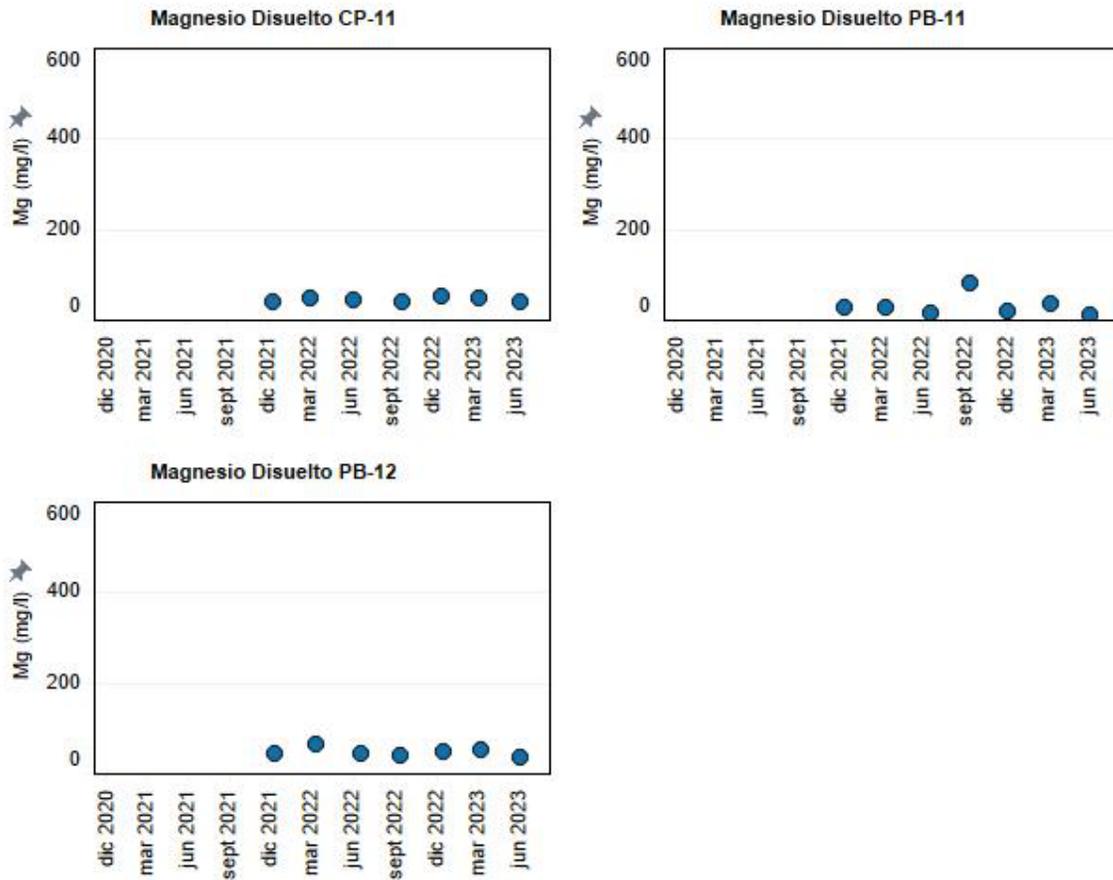


Figura 4-19: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/l).

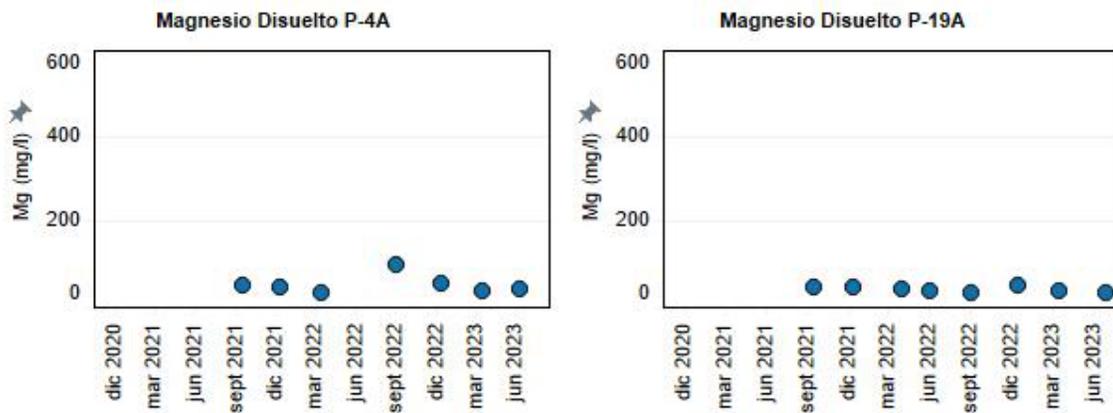


Figura 4-20: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/l).

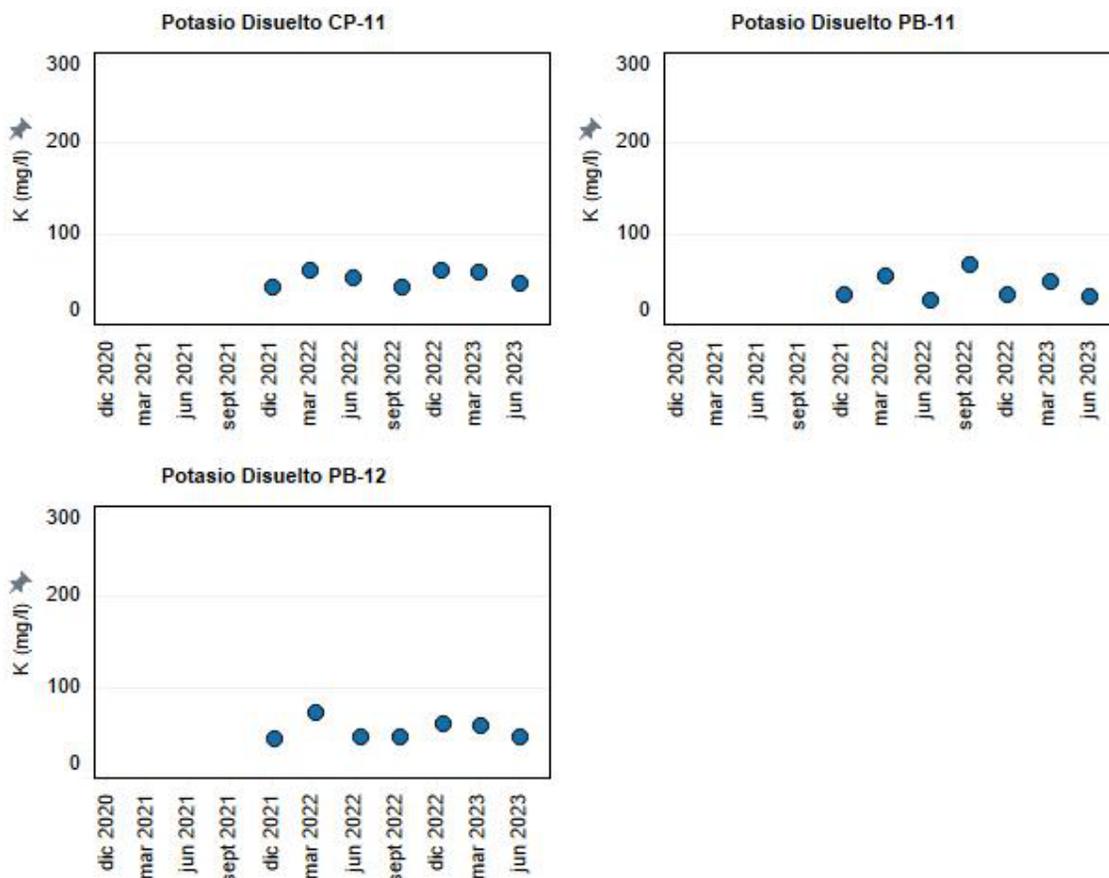


Figura 4-21: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/l).

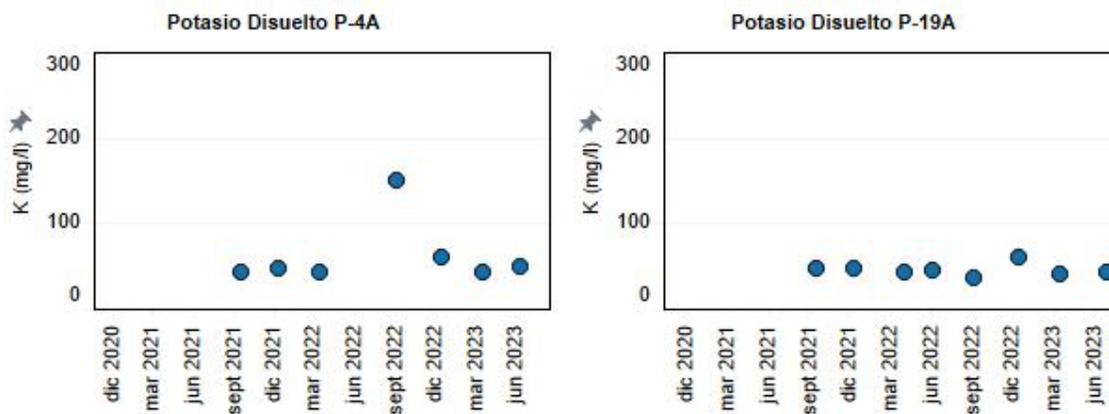


Figura 4-22: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/l).

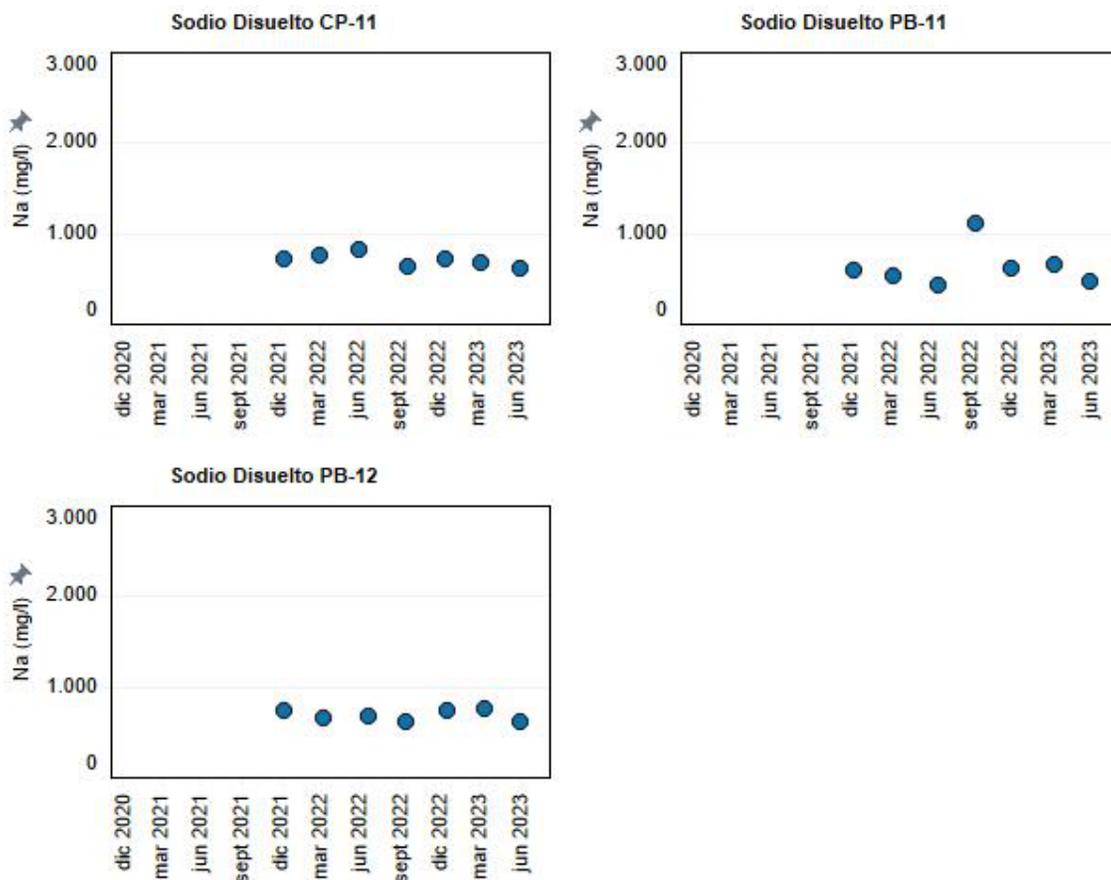


Figura 4-23: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/l).

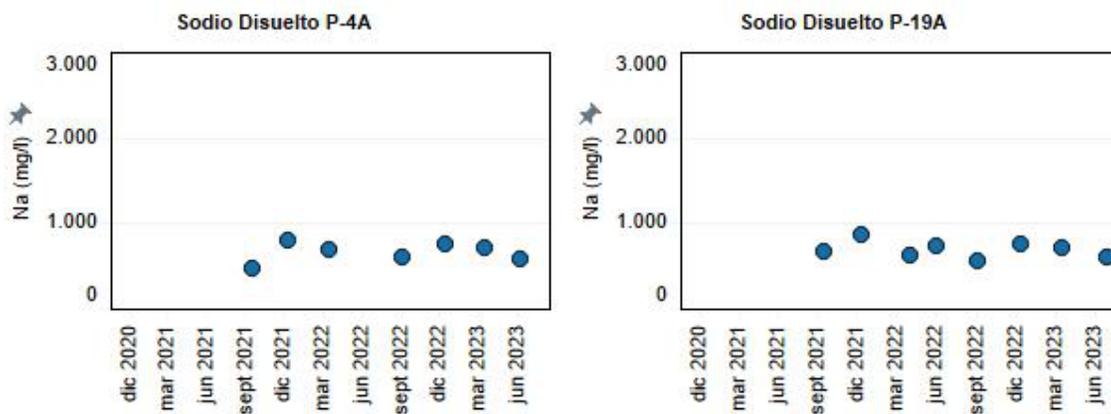


Figura 4-24: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/l).

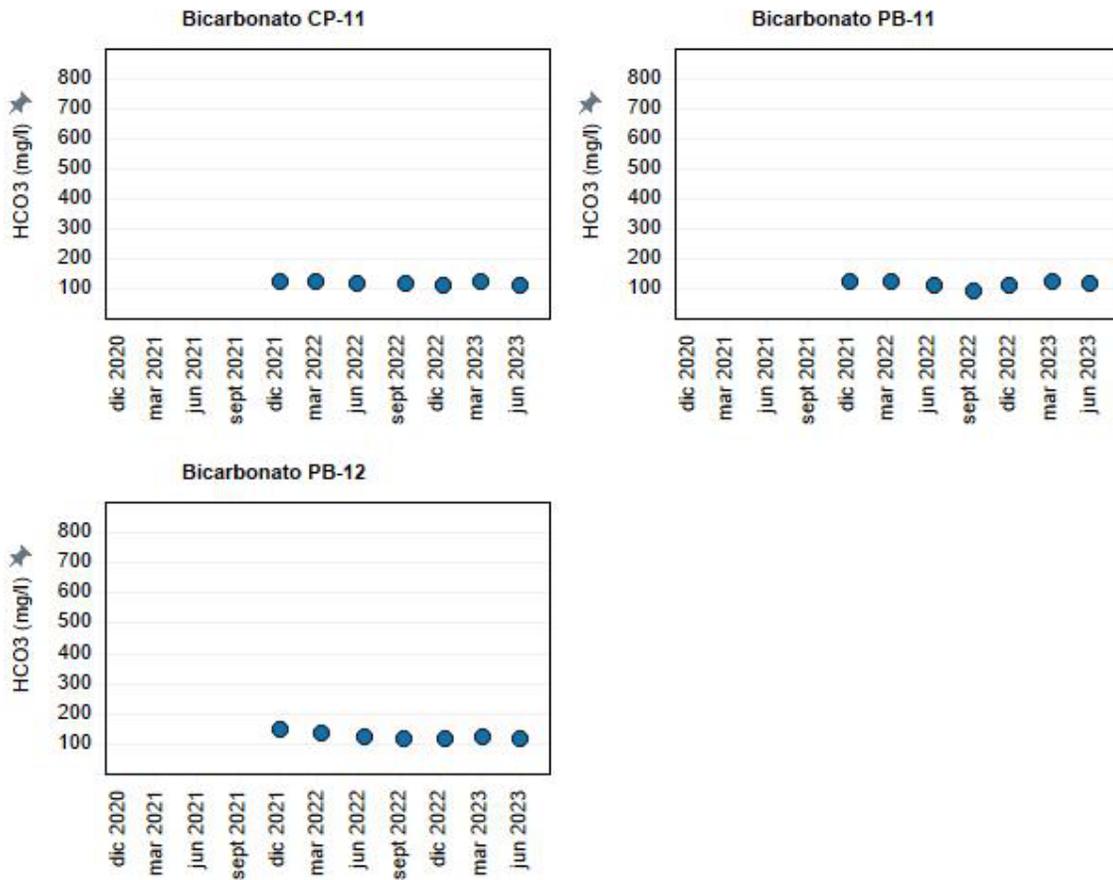


Figura 4-25: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/l).

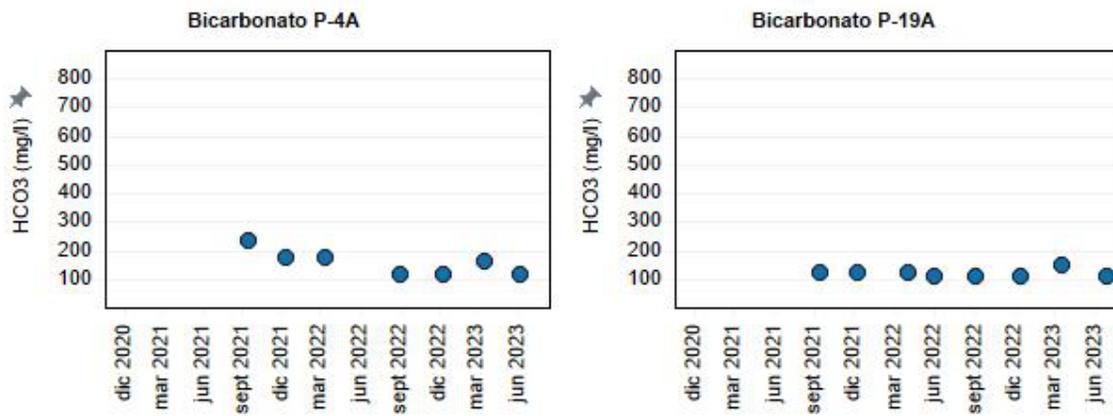


Figura 4-26: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/l).

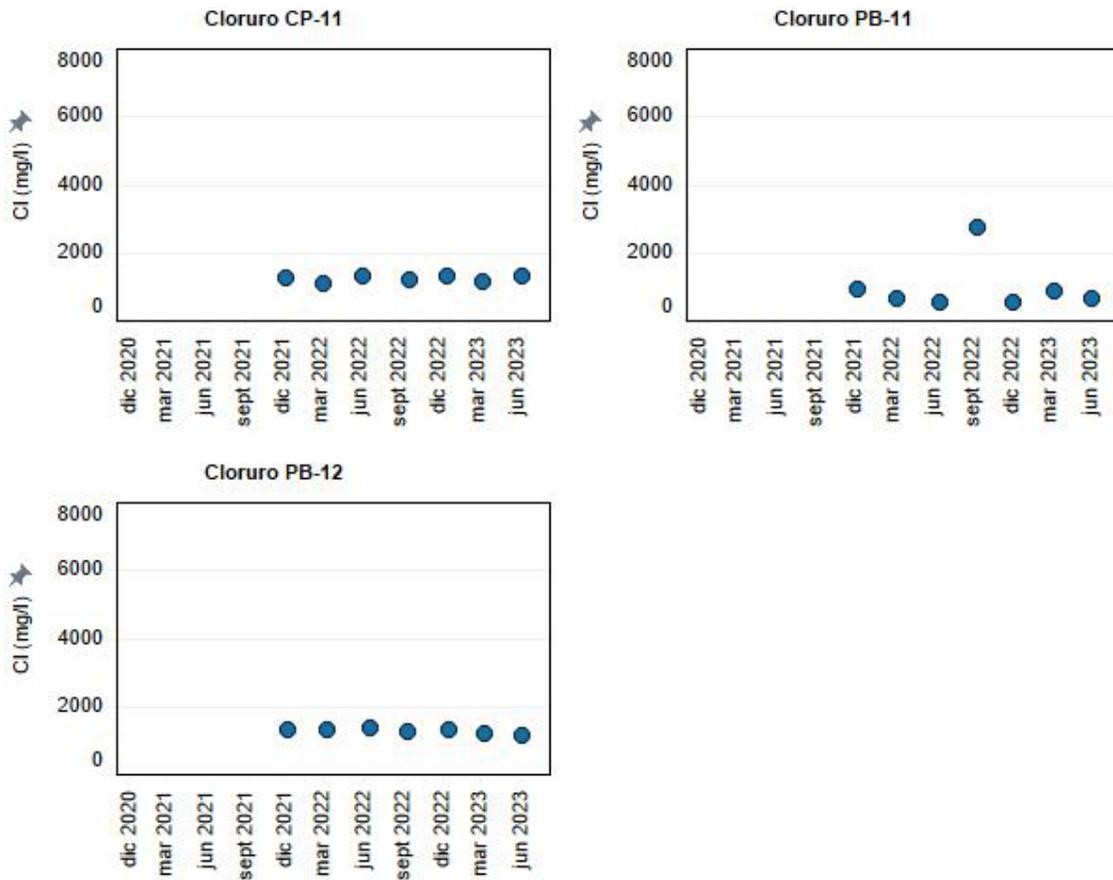


Figura 4-27: Evolución temporal de Cloruro (mg/l).

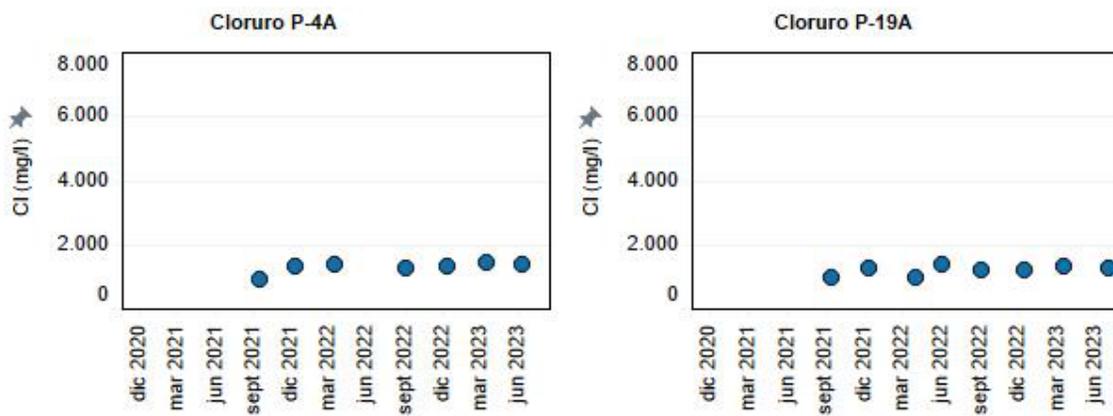


Figura 4-28: Evolución temporal de Cloruro (mg/l).

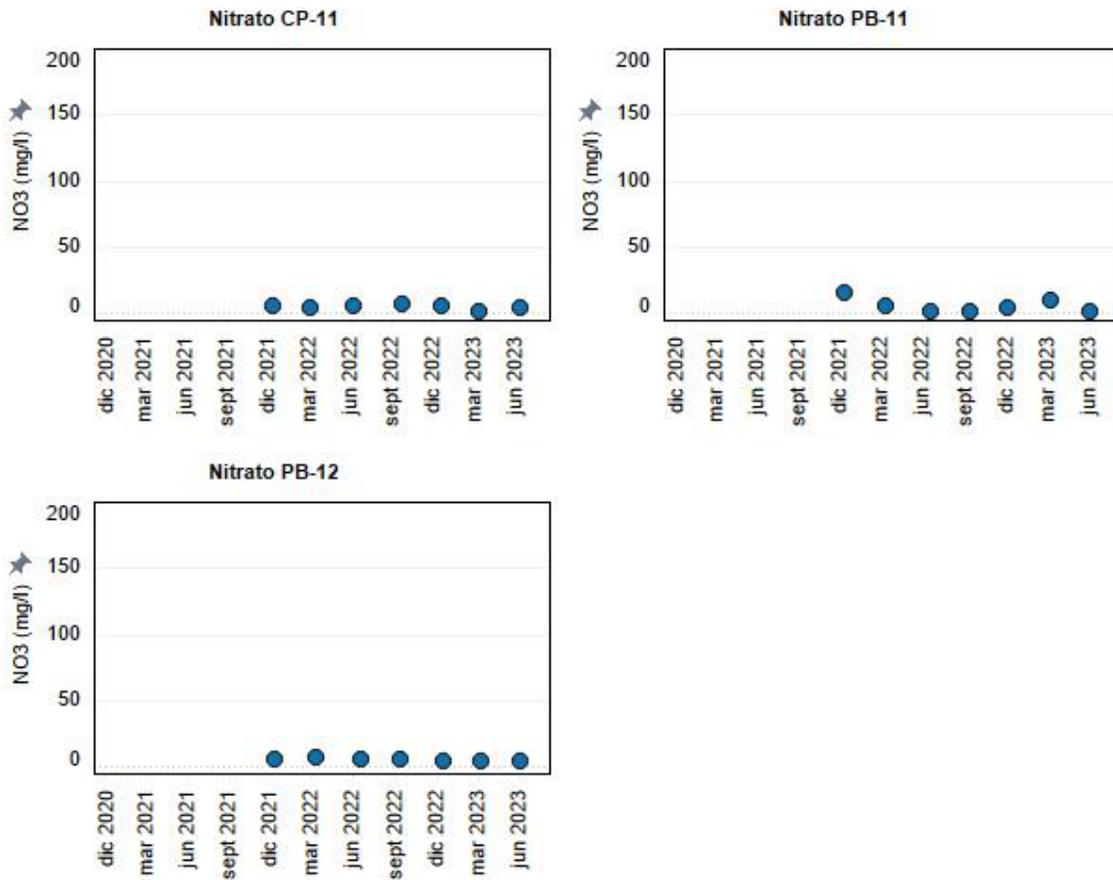


Figura 4-29: Evolución temporal de Nitrato (mg/l).

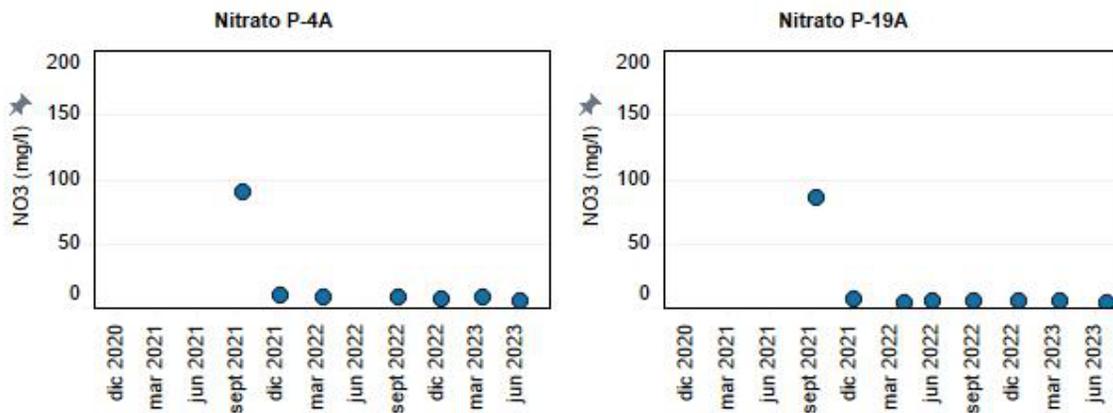


Figura 4-30: Evolución temporal de Nitrato(mg/l).

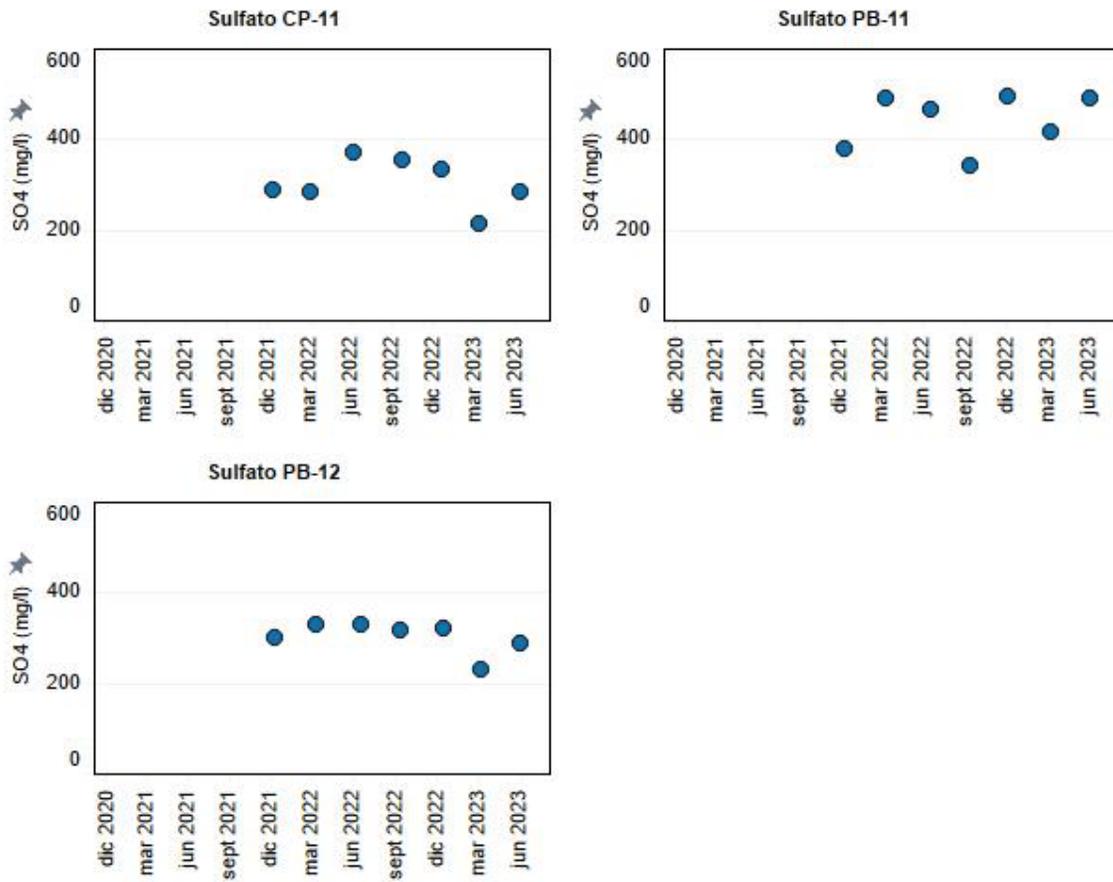


Figura 4-31: Evolución temporal de Sulfato (mg/l).

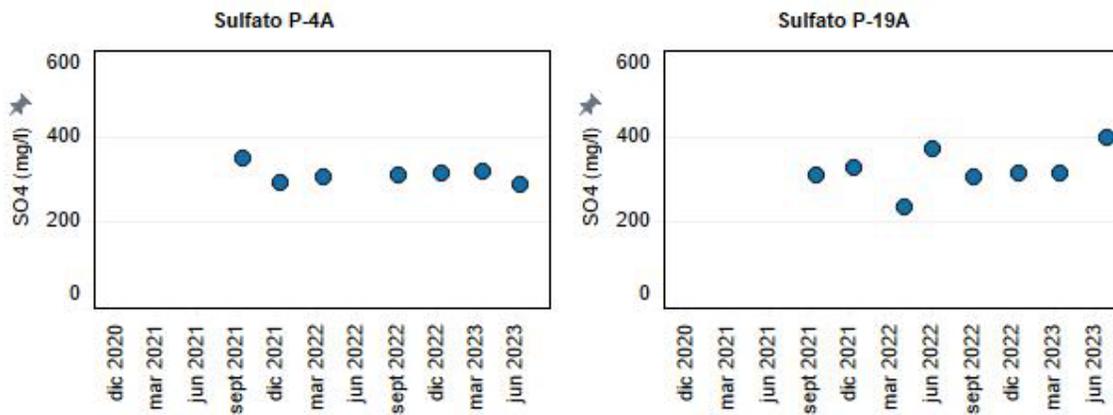


Figura 4-32: Evolución temporal de Sulfato (mg/l).

**Tabla 4-7:** Mediciones de cationes y aniones disueltos en punteras realizadas en el primer semestre 2023.

Parámetros	PU-31		PU-43		PU-44	
	Mar.23	Jun.23	Mar.23	Jun.23	Mar.23	Jun.23
Calcio (mg/l)	175	(*)	166	157	146	173
Magnesio (mg/l)	107	(*)	49,7	35,4	51,5	52,0
Potasio (mg/l)	115	(*)	79,4	66,4	70,2	82,2
Sodio (mg/l)	1.578	(*)	951	818	1.241	1.008
Bicarbonato (mg/l)	173	(*)	112	124	152	129
Cloruro (mg/l)	2.893	(*)	1.676	1.637	2.350	2.210
Nitrato (mg/l)	<0,20	(*)	18,2	14,00	0,52	0,91
Sulfato (mg/l)	403	(*)	335	339	311	295

Parámetros	PU-45		PU-48		PU-49	
	Mar.23	Jun.23	Mar.23	Jun.23	Mar.23	Jun.23
Calcio (mg/l)	103	(***)	(**)	41,4	(**)	139
Magnesio (mg/l)	51,2	(***)	(**)	41,4	(**)	44,7
Potasio (mg/l)	97,6	(***)	(**)	49,1	(**)	56,9
Sodio (mg/l)	1.546	(***)	(**)	685	(**)	820
Bicarbonato (mg/l)	328	(***)	(**)	132	(**)	127
Cloruro (mg/l)	2.579	(***)	(**)	1.253	(**)	1.722
Nitrato (mg/l)	6,97	(***)	(**)	1,67	(**)	5,34
Sulfato (mg/l)	346	(***)	(**)	304	(**)	319

(\*) : Punto congelado.

(\*\*) : Sin Acceso.

(\*\*\*) : Suspensión de actividades.

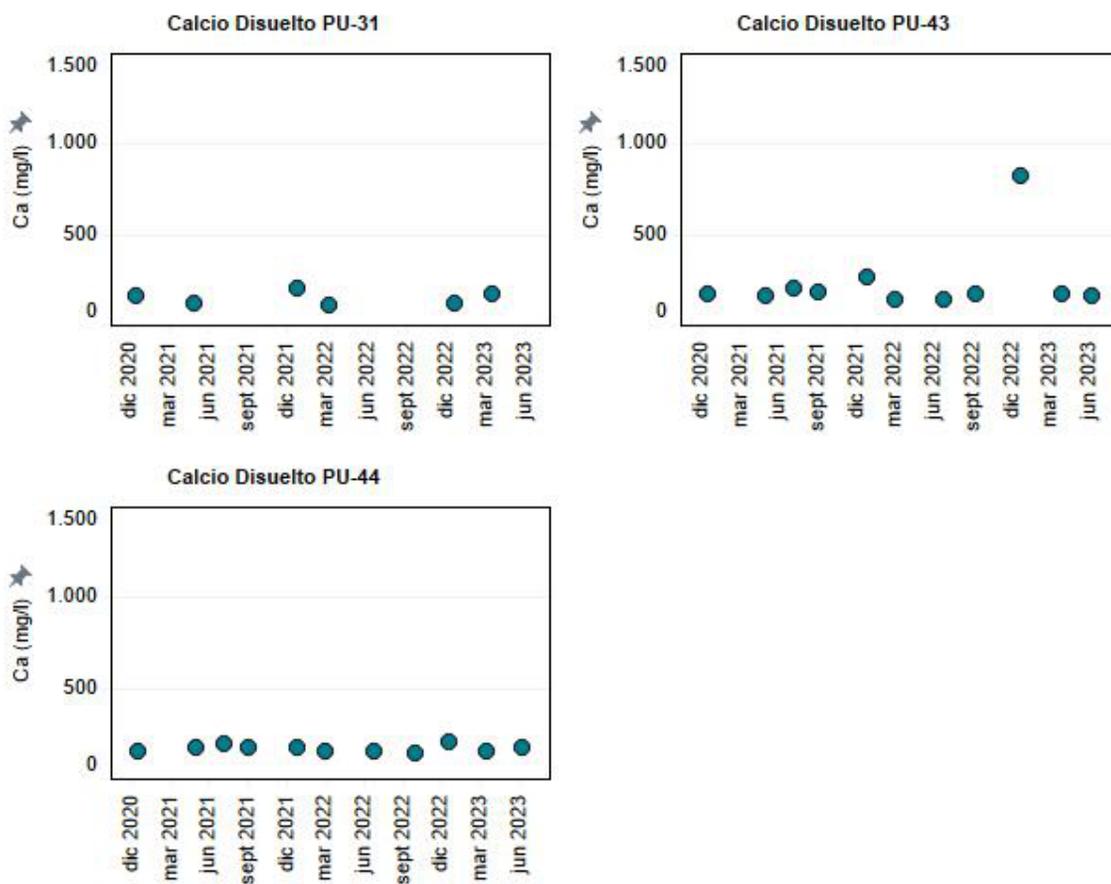


Figura 4-33: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/l).

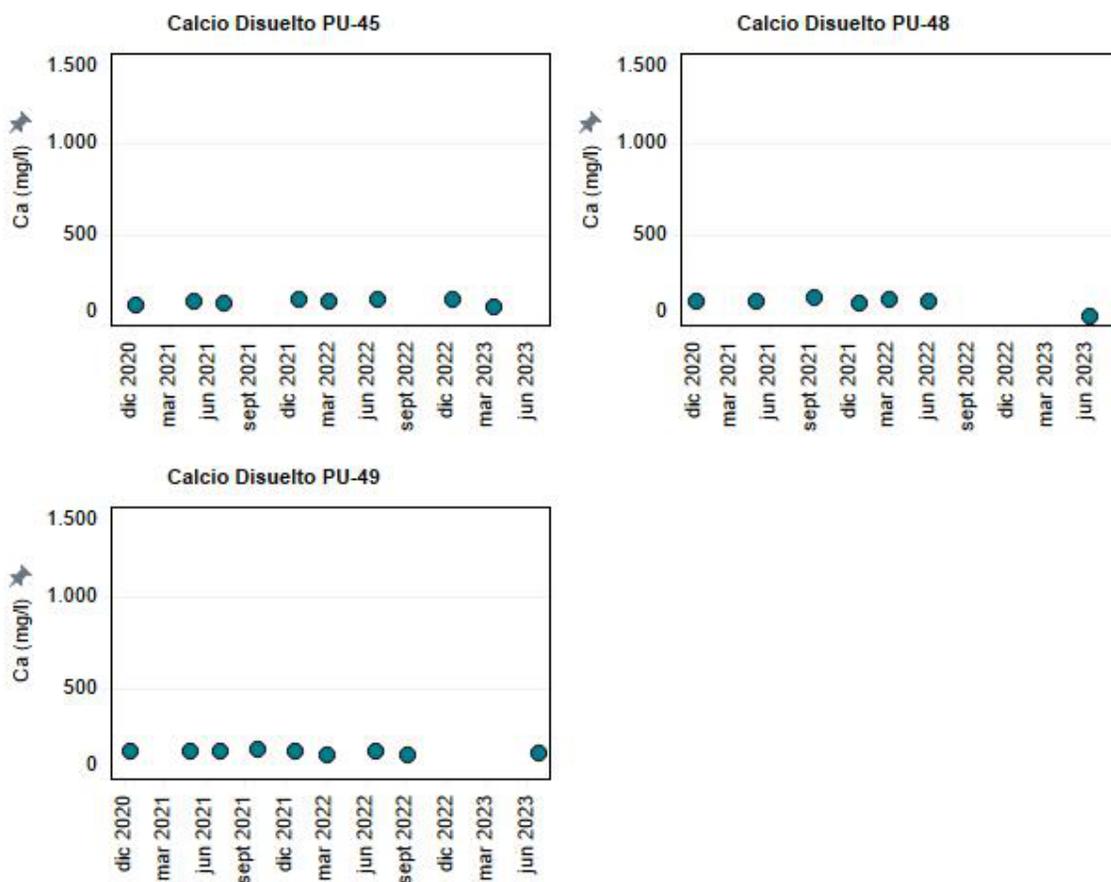


Figura 4-34: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/l).

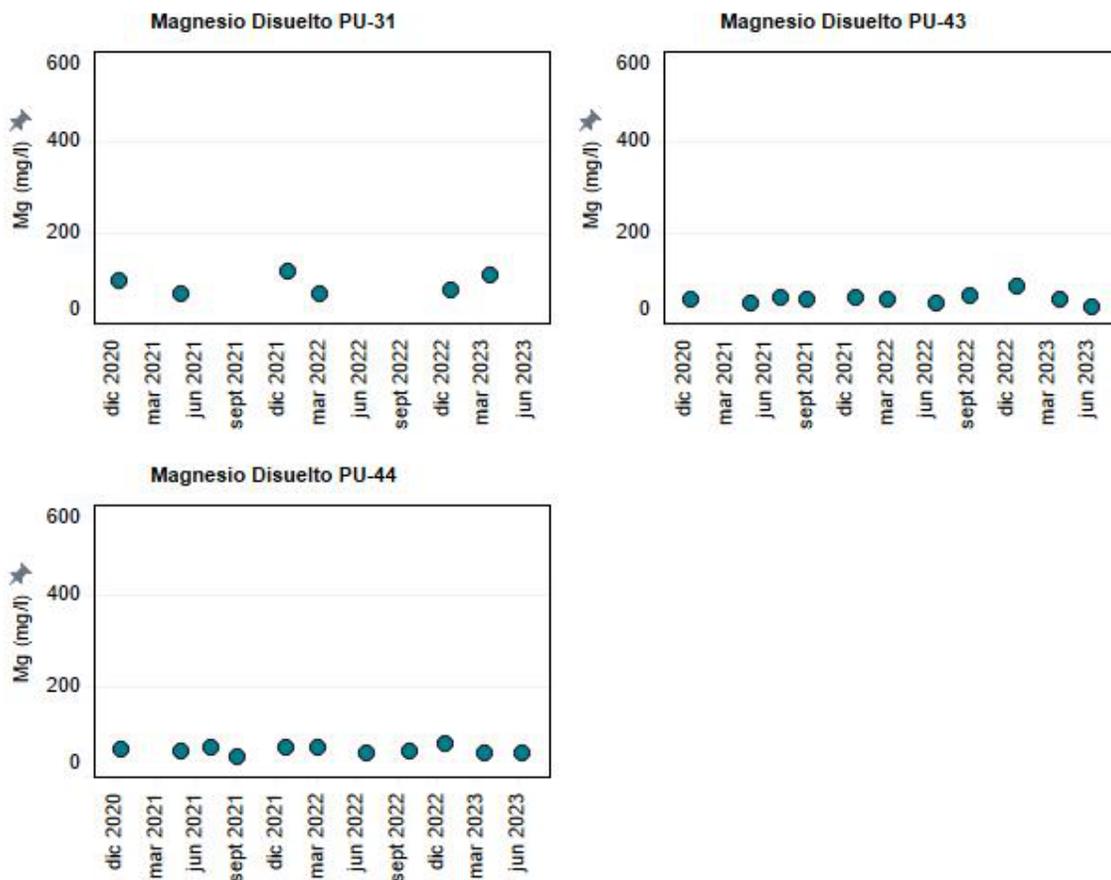


Figura 4-35: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/l).

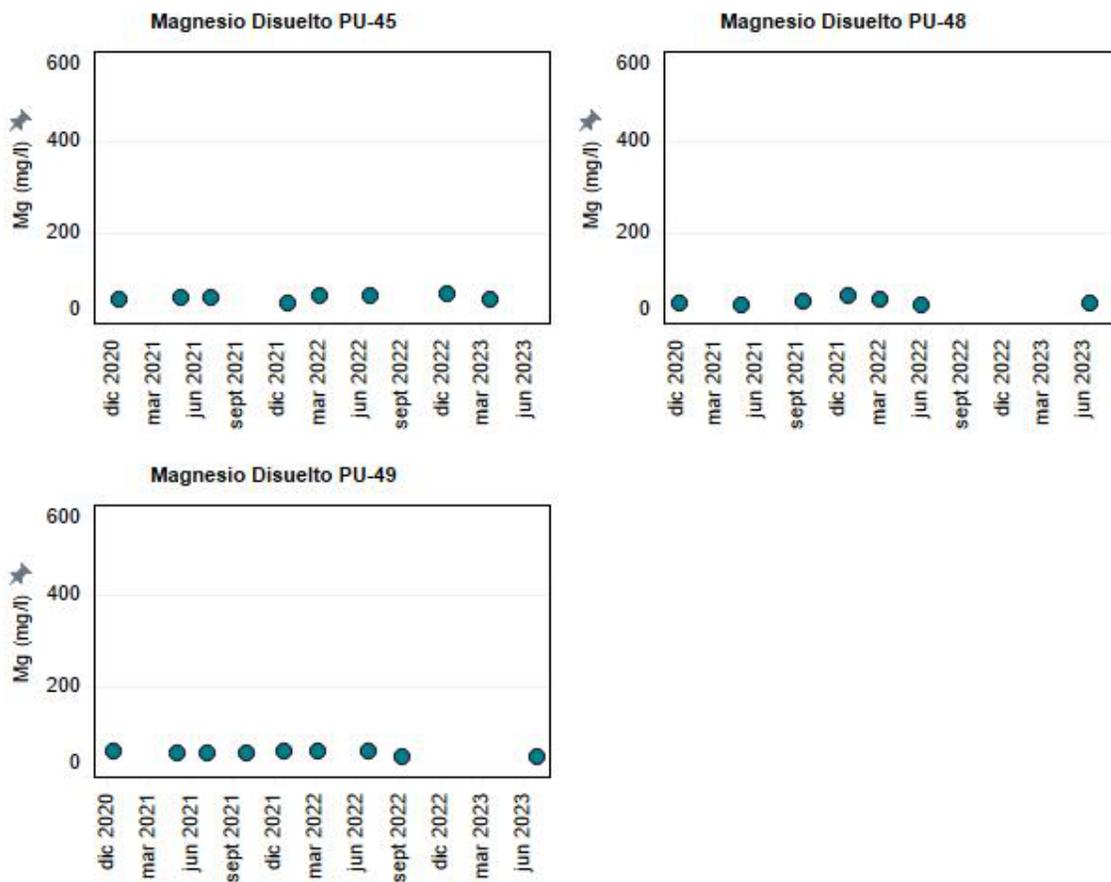


Figura 4-36: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/l).

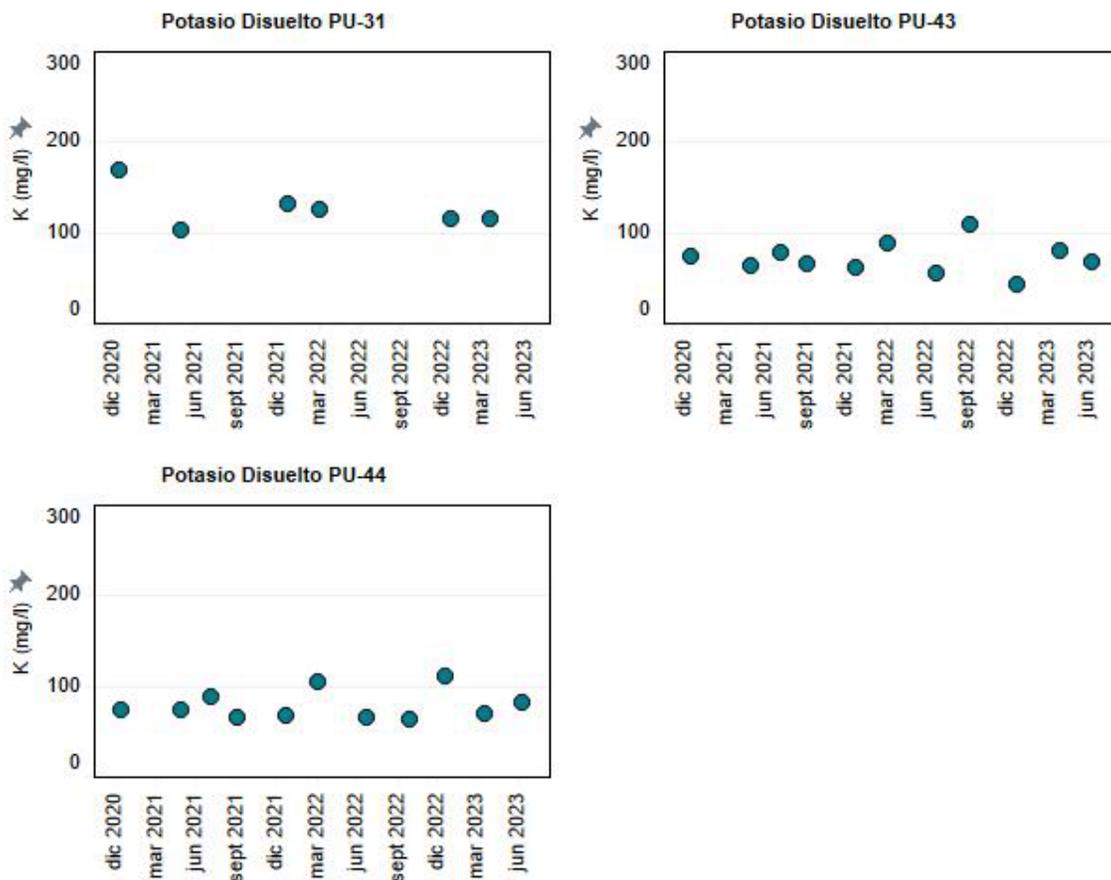


Figura 4-37: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/l).

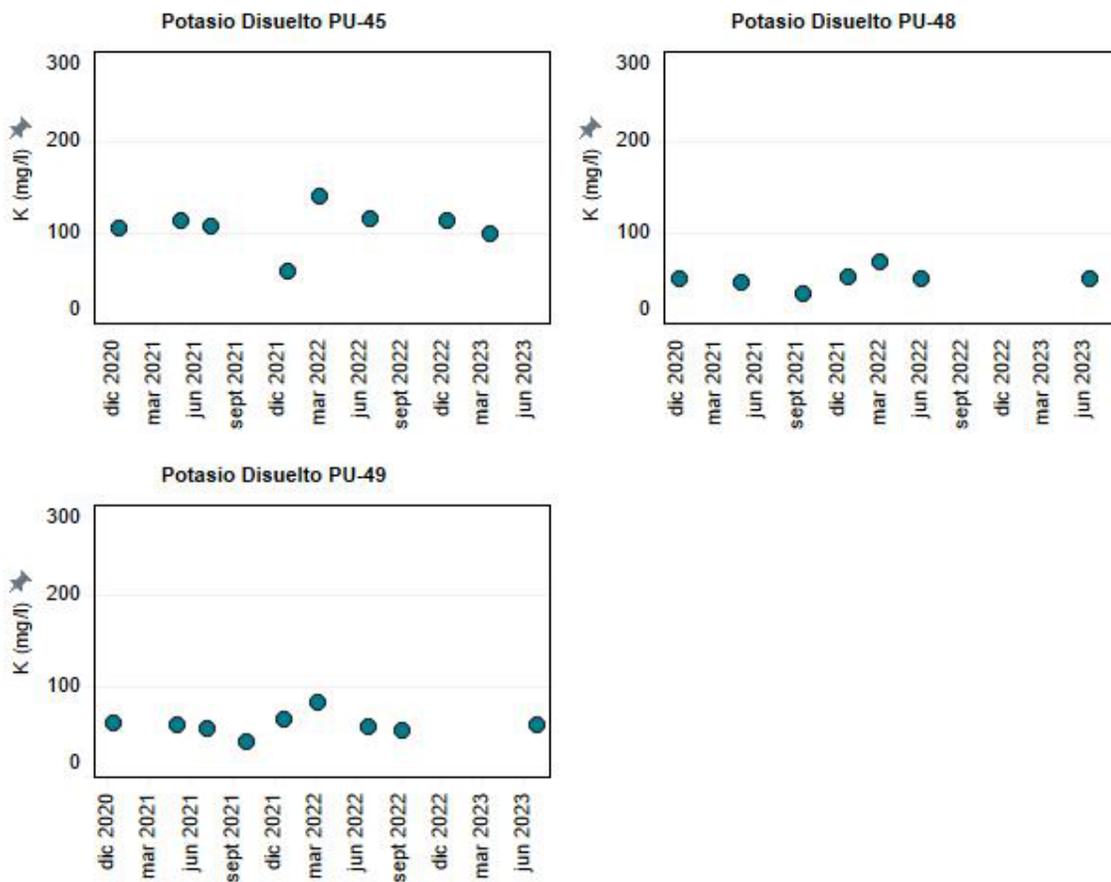


Figura 4-38: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/l).

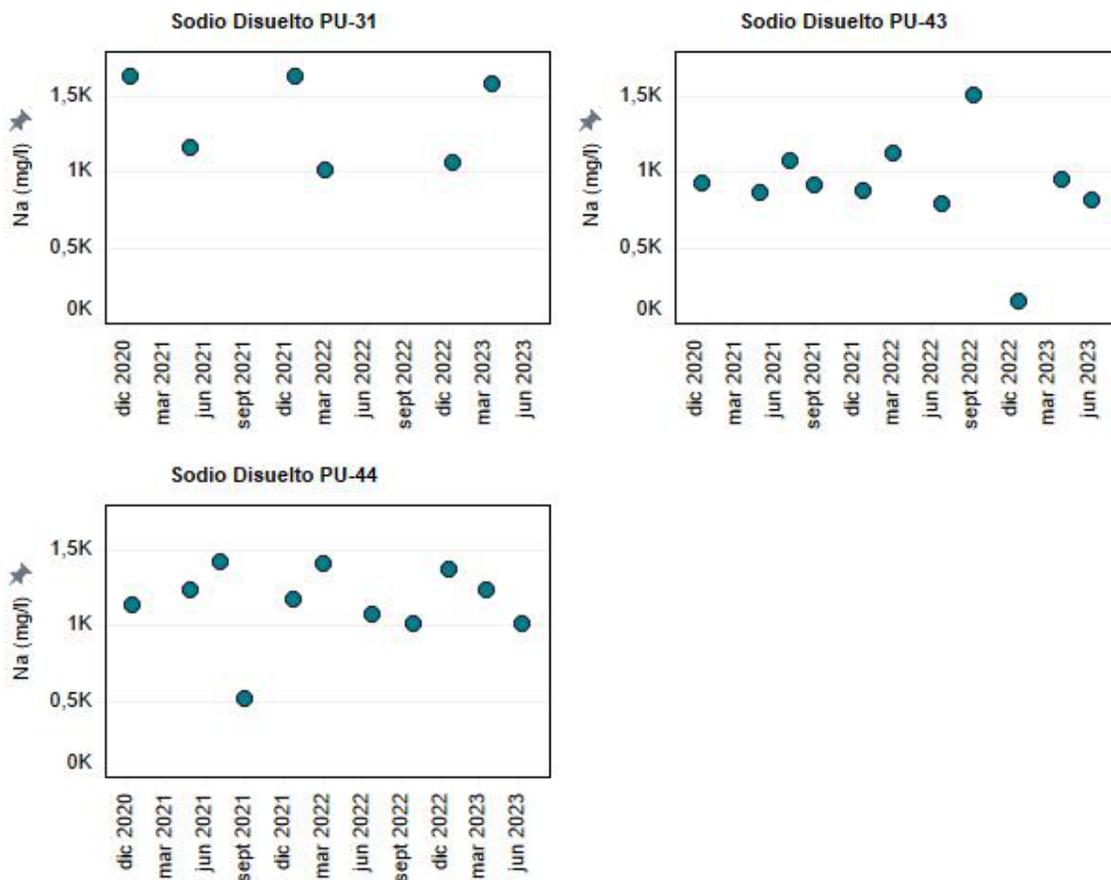


Figura 4-39: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/l).

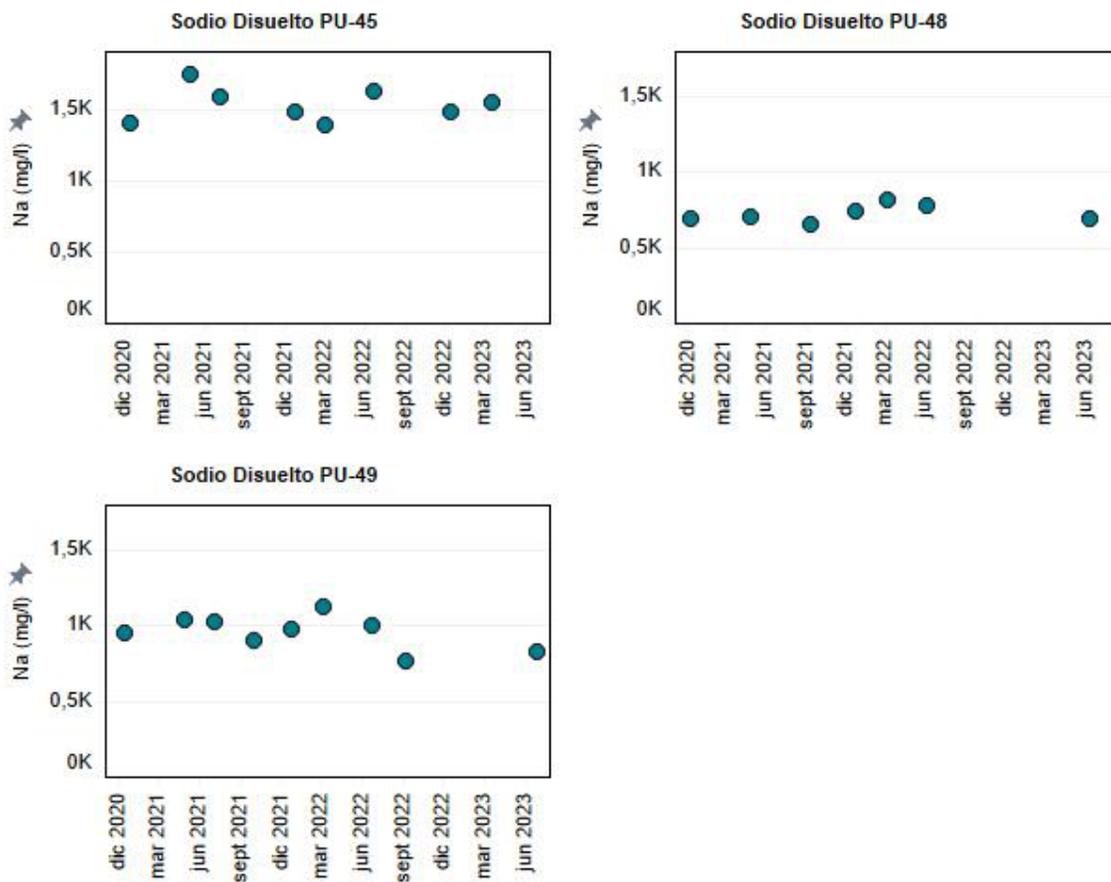


Figura 4-40: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/l).

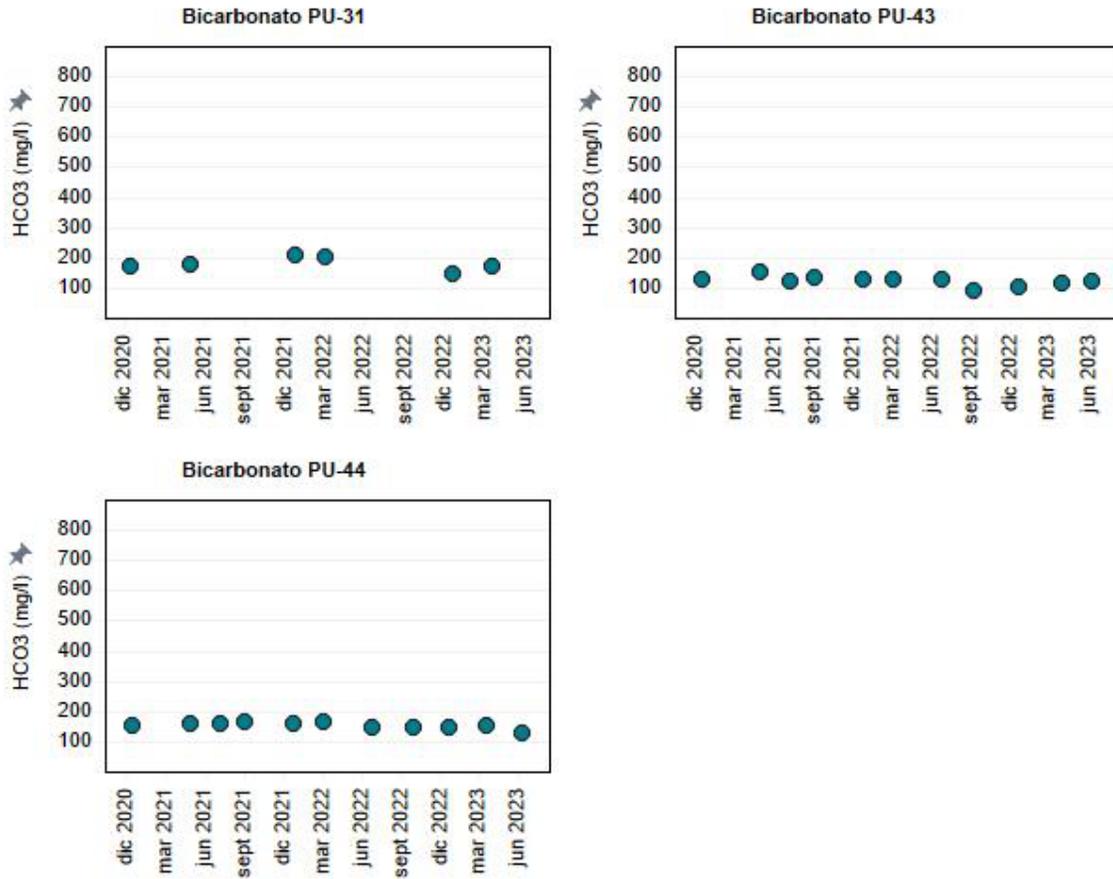


Figura 4-41: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/l).

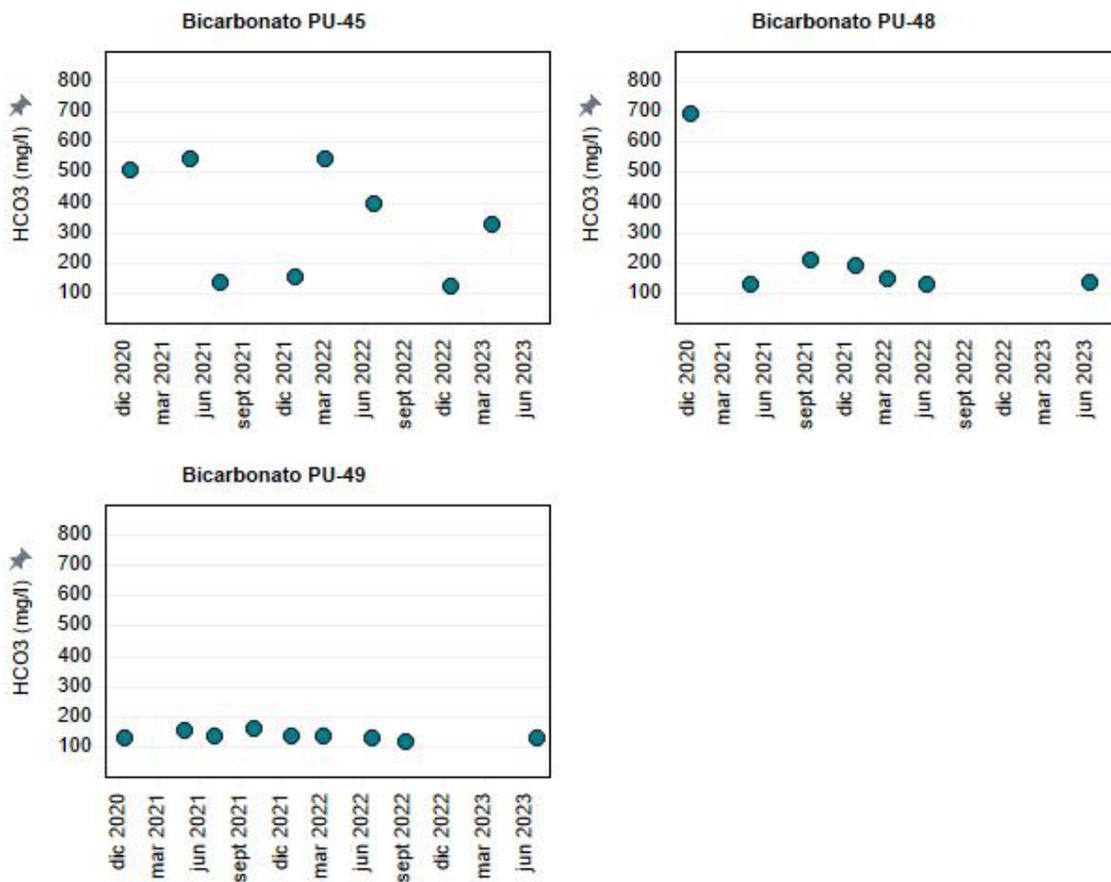


Figura 4-42: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/l).

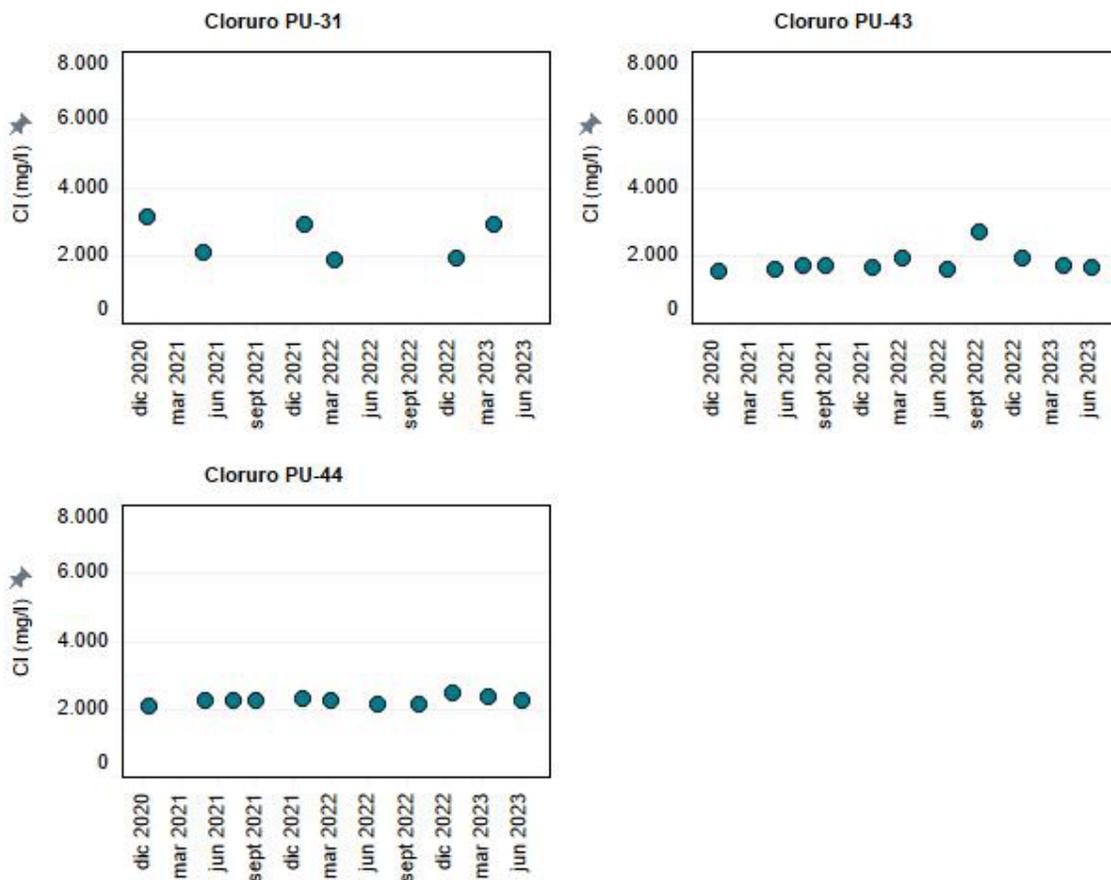


Figura 4-43: Evolución temporal de Cloruro (mg/l).

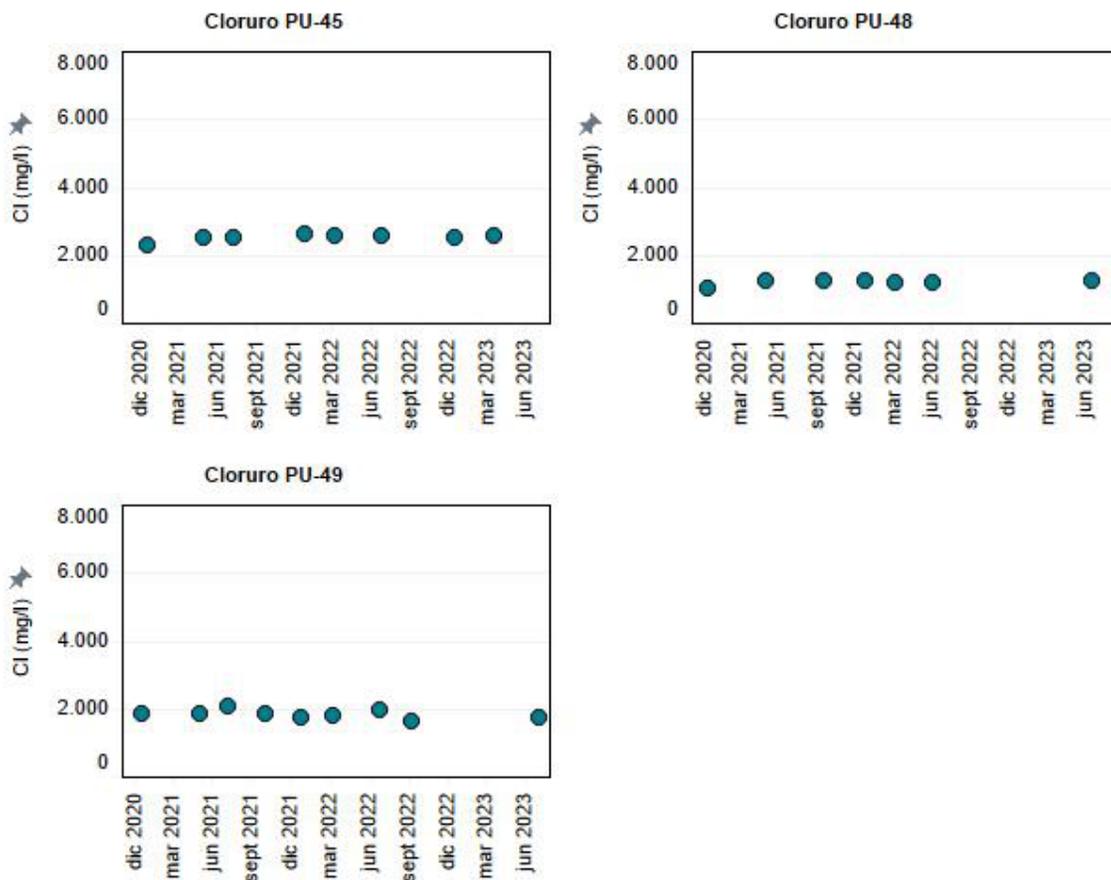


Figura 4-44: Evolución temporal de Cloruro (mg/l).

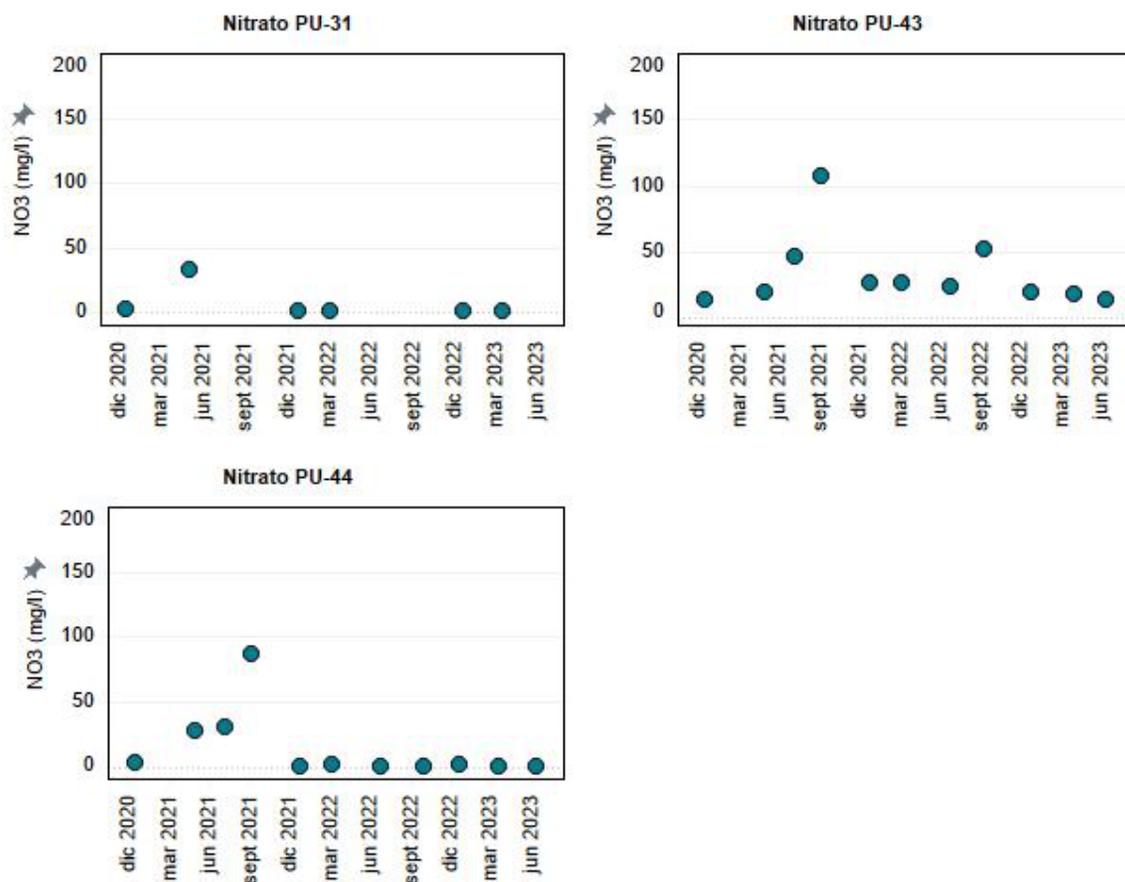


Figura 4-45: Evolución temporal de Nitrato (mg/l).

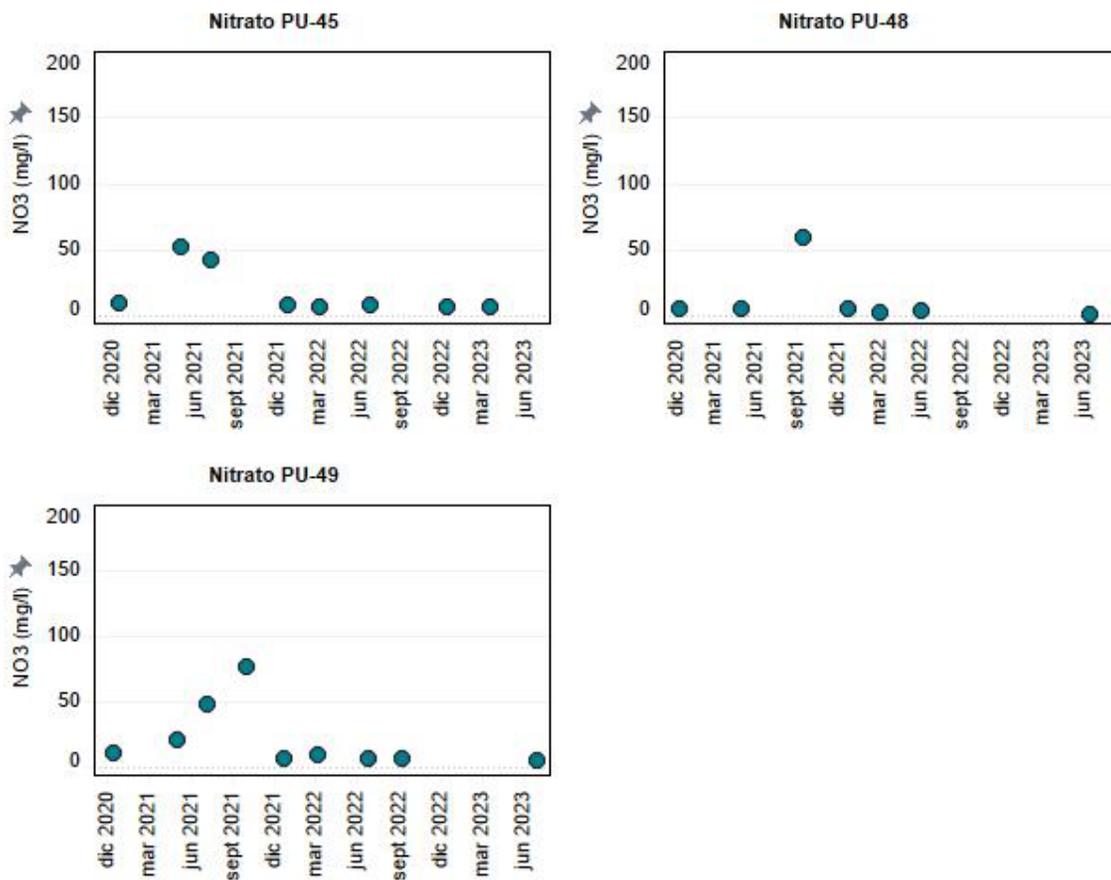


Figura 4-46: Evolución temporal de Nitrato disuelto (mg/l).

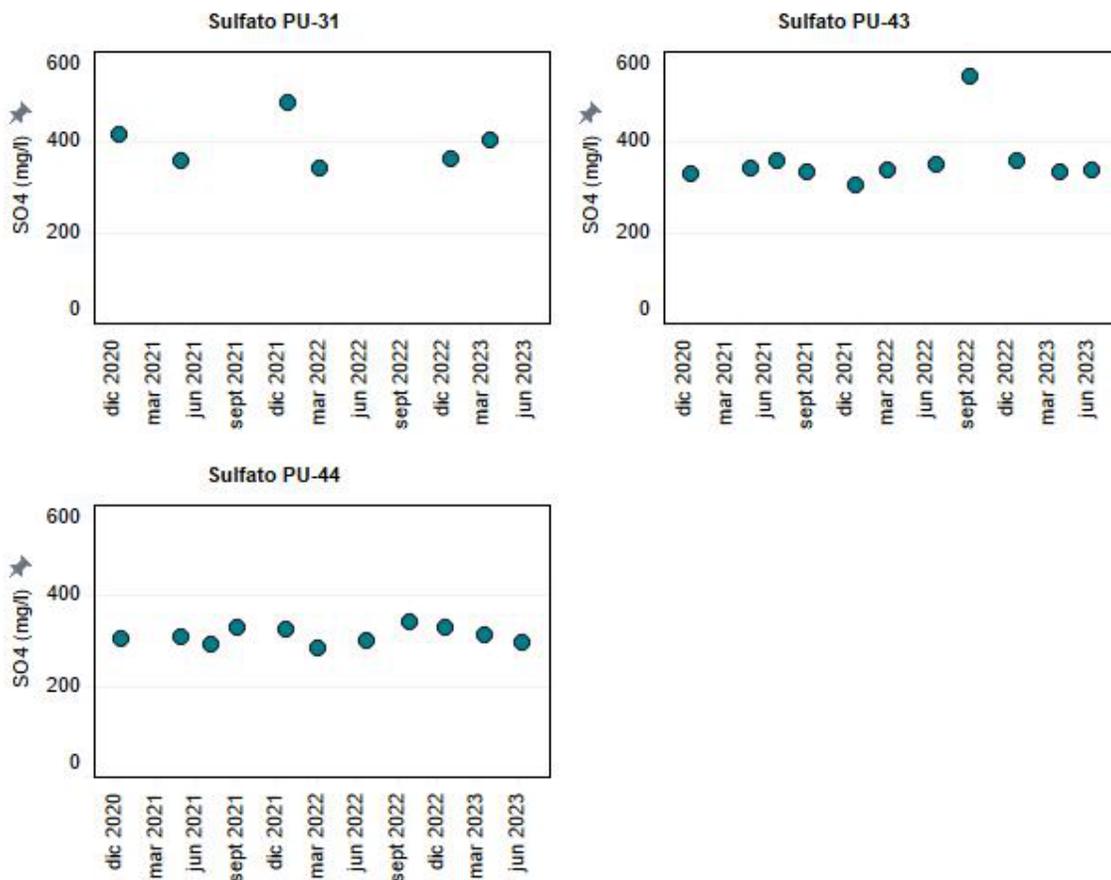


Figura 4-47: Evolución temporal de Sulfato (mg/l).

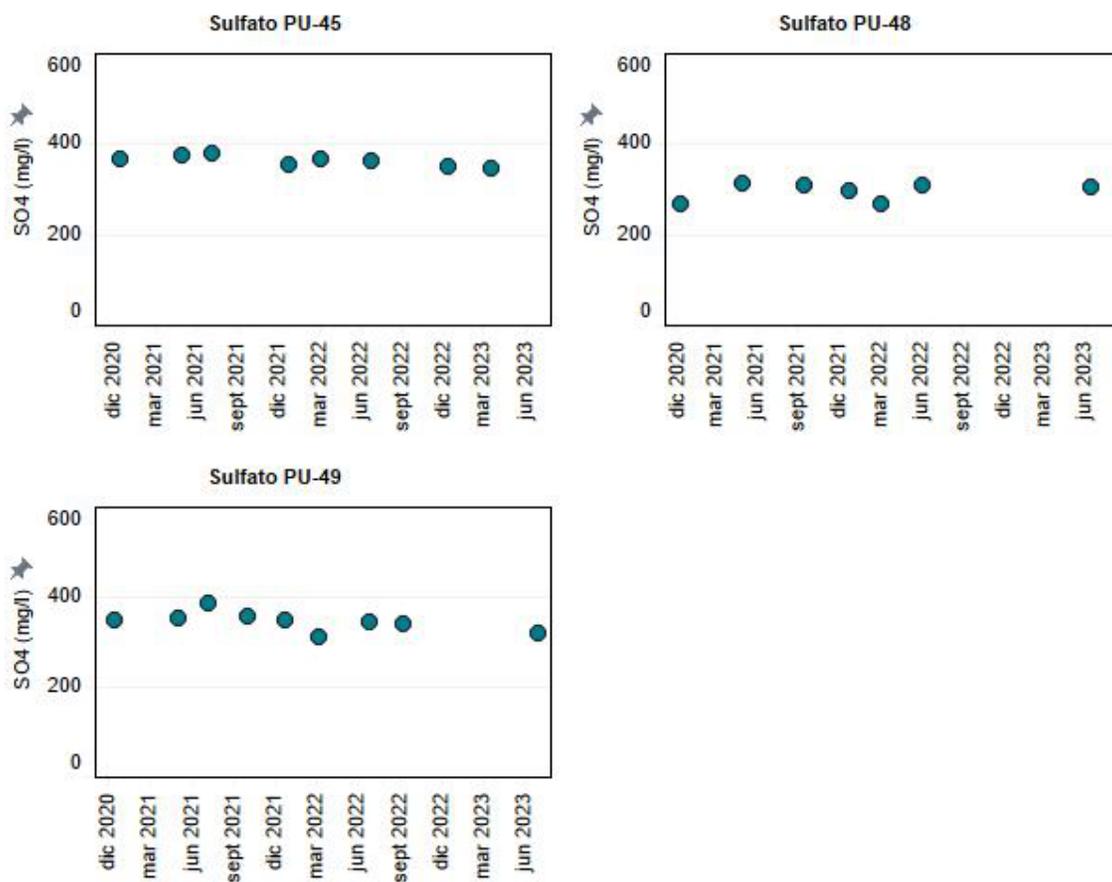


Figura 4-48: Evolución temporal de Sulfato (mg/l).

## 5 Discusión de resultados

### 5.1 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 la de los cationes disueltos.

Considerando lo anterior, se estima la diferencia porcentual entre la suma de cationes y de aniones (ver Tabla 5-1). Al respecto, ninguno de los puntos analizados en el laboratorio supera una diferencia porcentual del 10%, por lo que los análisis químicos realizados por el laboratorio se consideran fidedignos.

**Tabla 5-1:** Error porcentual calculado por el laboratorio.

Nombre punto	Diferencia marzo 2023 (%)	Diferencia junio 2023 (%)
CP-11	5,53	6,49
PB-11	5,57	9,83
PB-12	7,92	3,11
P-19a	3,93	8,67
P-4a	6,35	4,28
PU-31	0,87	(*)
PU-43	0,95	6,36
PU-44	3,81	5,71
PU-45	1,82	(***)
PU-48	(**)	0,80
PU-49	(**)	7,33

(\*): Punto congelado.

(\*\*): Sin Acceso.

(\*\*\*): Suspensión de actividades.

Por otro lado, de los resultados obtenidos de laboratorio y terreno (in situ) de los parámetros fisicoquímicos, se pueden verificar las variaciones entre ambas mediciones, principalmente de los parámetros conductividad eléctrica y pH. En la Tabla 5-2 se presentan las comparaciones por parámetro fisicoquímico.

**Tabla 5-2:** Verificación datos in situ v/s laboratorio – Conductividad eléctrica y pH.

Nombre punto	Fecha	CE In Situ (μS/cm)	CE Lab. (μS/cm)	Diferencia CE In Situ y CE Lab	pH In Situ. (u pH)	pH Lab. (u pH)	Diferencia pH In Situ y pH Lab
CP-11	09-03-2023	4.732	4.482	1,06	7,49	7,95	0,94
CP-11	08-06-2023	4.703	4.535	1,04	6,98	7,93	0,88
P-19a	15-03-2023	4.711	4.494	1,05	7,81	7,91	0,99
P-19a	29-06-2023	4.478	4.251	1,05	7,67	7,83	0,98
P-4a	15-03-2023	4.769	4.510	1,06	7,8	7,91	0,99
P-4a	08-06-2023	4.828	4.718	1,02	6,99	7,94	0,88
PB-11 (*)	08-03-2023	-	3.686	-	7,54	8,28	0,91
PB-11	01-06-2023	3.046	3.120	0,98	7,88	8,48	0,93
PB-12	08-03-2023	4.766	4.540	1,05	7,59	7,93	0,96
PB-12	01-06-2023	4.670	4.523	1,03	6,87	7,83	0,88
PU-31	16-03-2023	10.120	9.086	1,11	6,64	7,46	0,89
PU-43	29-03-2023	6.220	5.970	1,04	6,66	8,02	0,83
PU-43	07-06-2023	13.050	6.536	2,00	7,59	7,72	0,98
PU-44	16-03-2023	7.560	7.279	1,04	7,77	7,87	0,99
PU-44	08-06-2023	7.816	7.135	1,10	7,1	7,91	0,90
PU-45	16-03-2023	8.144	8.063	1,01	7,75	8,02	0,97
PU-48	12-06-2023	4.996	4.429	1,13	7,38	7,9	0,93
PU-49	29-06-2023	5.975	5.497	1,09	7,47	7,84	0,95

(\*): Error de medición en terreno.

En la Figura 5-1 y Figura 5-2 se muestra la comparación entre la conductividad eléctrica medida in situ y en laboratorio para los pozos y punteras respectivamente, mientras que en la Figura 5-3 y Figura 5-4 se ilustra la comparación entre pH medido in situ y en laboratorio para los pozos y punteras respectivamente.



**Figura 5-1:** Comparación entre la conductividad eléctrica medida in situ y laboratorio en los pozos CP-11, P-19a, P-4a, PB-11 y PB-12.



**Figura 5-2:** Comparación entre la conductividad eléctrica medida in situ y laboratorio en las punteras PU-31, PU-43, PU-44, PU-45, PU-48 y PU-49.



**Figura 5-3:** Comparación entre el pH medido in situ y laboratorio en los pozos CP-11, P-19a, P-4a, PB-11 y PB-12.

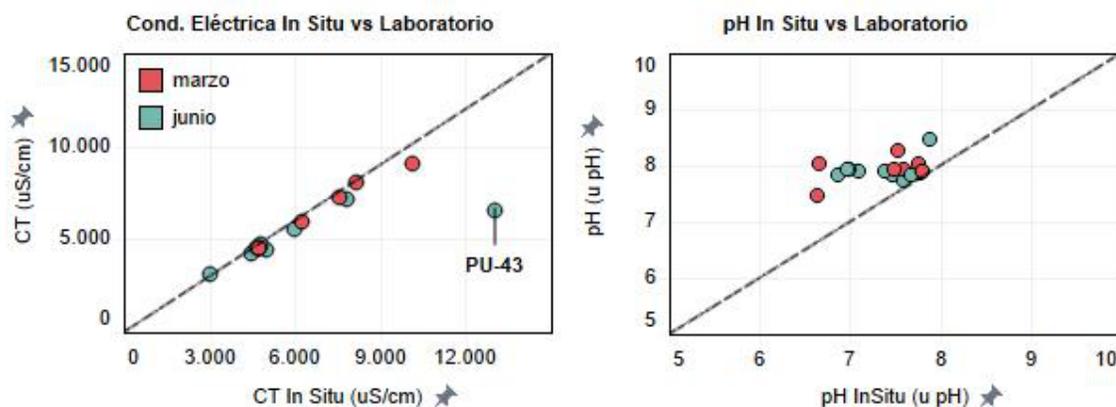


**Figura 5-4:** Comparación entre el pH medido in situ y laboratorio en las punteras PU-31, PU-43, PU-44, PU-45, PU-48 y PU-49.

Con respecto a la comparación entre conductividades y pH resulta que las variaciones son bajas en la mayoría de los puntos analizados, siendo no mayor al 10% entre ellas (entre 0,9 y 1,1), a excepción de la conductividad en el punto PU-31 que, en marzo 2023 presenta una variación del 11%, y de los puntos PU-43 y PU-48, cuya variación en junio 2023 es de 100% y 13% respectivamente. Cabe destacar que en el caso del punto PU-43, se identifica un aumento considerable de la conductividad in situ, lo que no es consistente con el valor de conductividad registrado en laboratorio (valor en tendencia con lo histórico), por lo que podría asociarse a un error en la medición de terreno, lo cual será evaluado en el siguiente reporte.

Por otra parte, respecto al pH medido in situ y en laboratorio, durante marzo la mayoría de los puntos no supera el 10% de diferencia porcentual entre ambos valores, a excepción de los puntos PU-31 y PU-43, cuya diferencia es del 11% y 17% respectivamente. Además, durante junio se identifican diferencias del 12% en las muestras de los puntos CP-11, P-4a y PB-12. Las diferencias estarían asociadas a una disminución en el pH medido in situ, mientras que el pH medido en laboratorio se mantiene con valores similares a aquellos medidos anteriormente (tanto in situ como en el laboratorio). Por tanto, las diferencias detectadas podrían asociarse a errores en las mediciones del pH de terreno (por una mala calibración del equipo) y serán evaluadas con las siguientes mediciones en los reportes posteriores.

A modo de visualización, la Figura 5-5 ilustra la comparación entre las mediciones realizadas in situ y en laboratorio para los parámetros conductividad eléctrica y pH. Adicionalmente, se añade la línea de la identidad para una mejor revisión de los valores.



**Figura 5-5:** Comparación entre las mediciones tomadas in situ y en laboratorio – Conductividad eléctrica y pH.

## 5.2 Evolución temporal parámetros hidroquímicos

A continuación, se describe el comportamiento observado para cada variable.

### 5.2.1 Parámetros fisicoquímicos in situ

Respecto a los parámetros fisicoquímicos medidos in situ durante el primer semestre 2023 se identifica un aumento en junio 2023 de la conductividad y sólidos disueltos totales en el punto PU-43, cuyos valores son 13.050  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 6.529 mg/L respectivamente, mientras que la medición realizada en laboratorio corresponde a 6.536  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para la conductividad y 3.940 mg/L para los sólidos disueltos totales, cuyos valores se encuentran en tendencia con los resultados históricos, por lo tanto los valores registrados in situ se han considerado un error en la medición, asociada probablemente a una mala calibración del equipo en terreno.

En cuanto al pH, se ha identificado una disminución en marzo 2023 en el punto PU-43 (disminuye 0,71 upH respecto a diciembre 2022), mientras que en junio 2023 se identifican ligeras disminuciones en los puntos PU-44, PB-12 y P-4a. Por otro lado, en marzo 2023 se distingue una fuerte disminución del oxígeno disuelto para ambos puntos de control establecidos en el avenimiento (P-4a y P-19a).

### 5.2.2 Parámetros fisicoquímicos laboratorio

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos medidos en laboratorio, durante el primer semestre 2023 se observa un aumento generalizado de los sólidos disueltos totales en los puntos PB-11 y PB-12, mientras que en el punto CP-11, se identifica un aumento en las concentraciones únicamente en marzo 2023.

Respecto a los demás parámetros analizados, estos no presentan variaciones significativas durante el período analizado.

### 5.2.3 Cationes y aniones disueltos

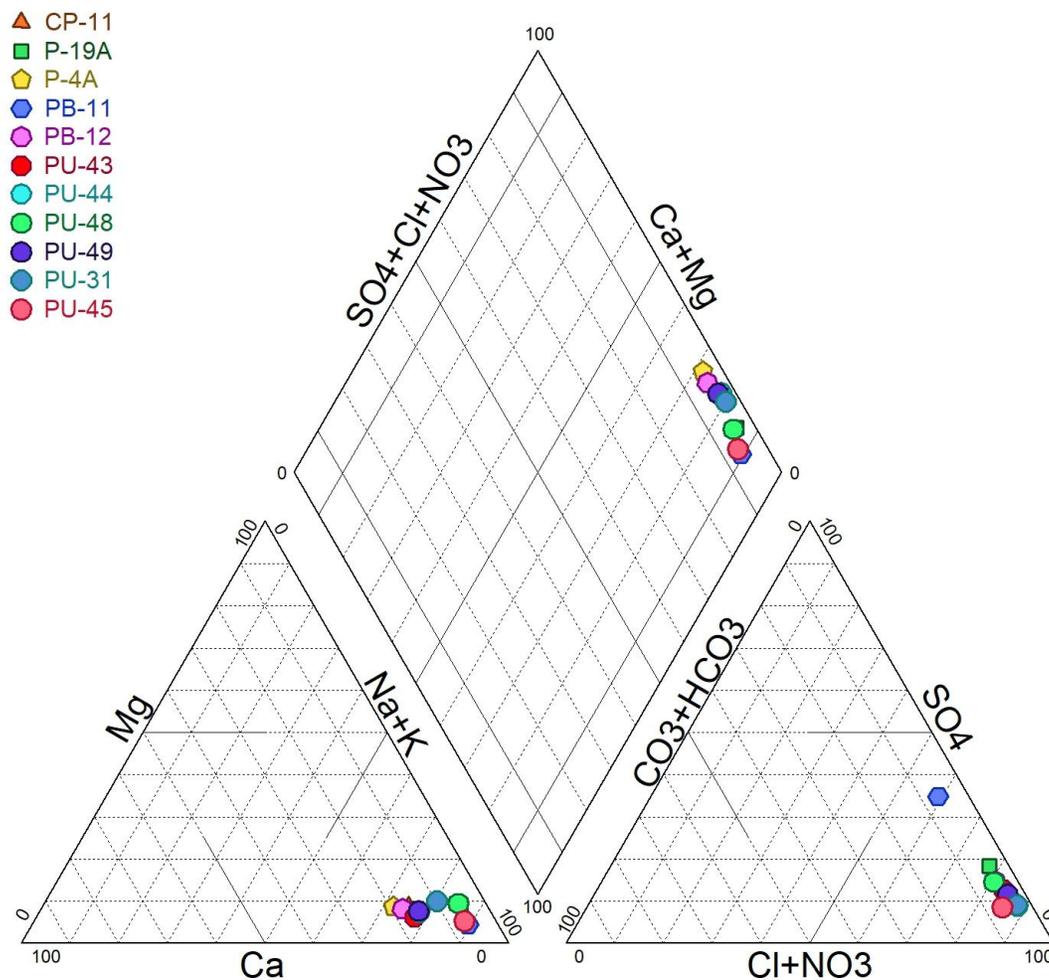
Con respecto a las concentraciones de cationes y aniones disueltos, registrados durante el primer semestre 2023, no se observan variaciones significativas, no obstante, se identifica una disminución en el calcio para los puntos PU-48 y P-19a y en el nitrato en el punto PU-43, durante junio 2023. Adicionalmente, en marzo 2023 se registra una disminución en el sulfato en los puntos CP-11 y PB-12, recuperando su tendencia en junio 2023.

Los demás parámetros de cationes y aniones disueltos se mantienen dentro del rango de valores históricos durante el primer semestre de 2023.

### 5.3 Diagrama Piper

En la Figura 5-6 se presenta el diagrama Piper de la cuenca Salar de Pedernales para los puntos analizados en el primer semestre del 2023. Cabe destacar que en la mayoría de los puntos el dato corresponde con la medición de junio 2023, a excepción de las muestras en los puntos PU-31 y PU-45, cuya medición corresponde a marzo 2023, ya que no presentan muestras durante el período reportado, debido a que el punto PU-31 se encontraba congelado y el punto PU-45 no fue posible tomar muestra por suspensión de actividades en terreno.

Al respecto, la marca de agua de todos los puntos muestreados corresponde a clorurada sódica. En cuanto al contenido de cationes, las aguas cloruradas sódicas contienen entre un 72% y 89% de sodio más potasio, entre un 5% y 19% de calcio y entre un 4% y 10% de magnesio. Del total del contenido de aniones, en general, este grupo contiene entre un 59% y 88% de cloruro y nitrato, entre 8% y 35% de sulfato, y aproximadamente un 6% de bicarbonato. De este grupo, la única muestra que se distingue es la del punto PB-11, con aproximadamente un 59% de cloruro y nitrato, un 35% de sulfato y un 6% de bicarbonato.



**Figura 5-6:** Diagrama Piper de los puntos monitoreados en el primer semestre 2023. Los datos corresponden al último monitoreo realizado en cada punto.

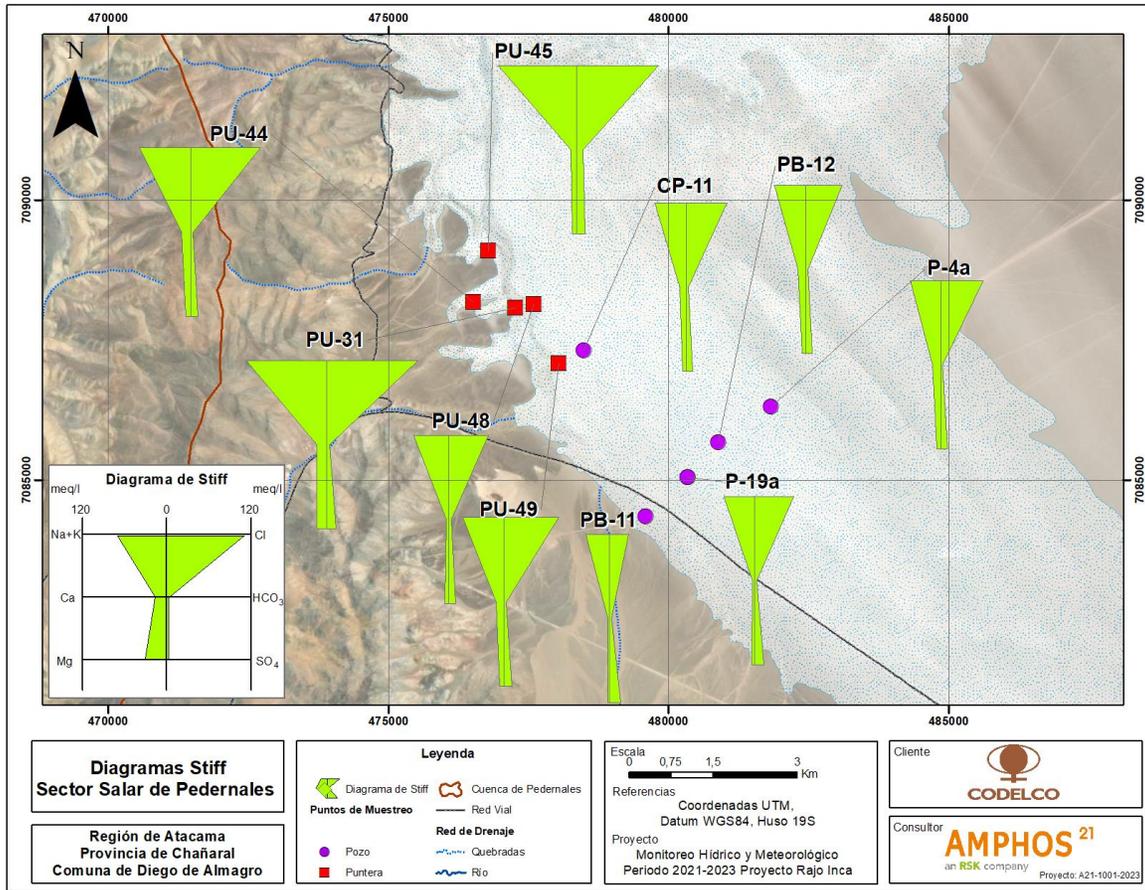
#### 5.4 Diagrama Stiff modificado

En la Figura 5-7 se presentan los diagramas de Stiff modificado de la cuenca Salar de Pedernales para los puntos monitoreados en el primer semestre del 2023. Cabe destacar que en la mayoría de los puntos el dato corresponde con la medición de junio 2023, a excepción de las muestras en los puntos PU-31 y PU-45, cuya medición corresponde a marzo 2023, ya que no presentan muestras durante el período reportado, debido a que el punto PU-31 se encontraba congelado y el punto PU-45 no fue posible tomar muestra por suspensión de actividades en terreno.

De los gráficos se puede mencionar que, con respecto a los aniones, todos los puntos presentan mayoritariamente cloruros en sus aguas y, en menor medida, sulfato y bicarbonato.

En el caso de los cationes, se observa una predominancia del sodio más el potasio (al nivel similar que los cloruros).

De esta forma, se observa que los diagramas de Stiff modificado tienen forma de una "T", representativo de aguas tipo salmuera.



**Figura 5-7:** Diagramas de Stiff modificado de los puntos monitoreados en el primer semestre 2023. Datos correspondientes al último monitoreo realizado en cada punto.

## 6 Conclusiones

La campaña de medición que se incluye en el presente informe semestral fue realizada en los meses de marzo y junio de 2023, cuyas mediciones fueron llevadas a cabo por inspectores ambientales de AGQ, autorizados para los alcances de medición en aguas subterráneas.

Durante las actividades de las campañas llevadas a cabo se considera un programa de mediciones con 11 puntos (5 piezómetros y 6 punteras).

Las tomas de muestra de agua se realizan de manera exitosa en la mayoría de los puntos del programa, salvo en las punteras PU-48 y PU-49 en marzo 2023 debido a que se encontraron sin acceso, y en las punteras PU-31 y PU-45 en junio 2023, por encontrarse congelada y por suspensión de actividades, respectivamente.

En general, los parámetros fisicoquímicos in situ no presentan mayores variaciones dentro del semestre actual de reporte. Sin embargo, se identifican aumentos en la conductividad y sólidos disueltos totales in situ en el punto PU-43, los que no son consistentes con los valores obtenidos en laboratorio, por lo que podría asociarse a un error en la medición de terreno. En cuanto al pH in situ se reconocen disminuciones en los puntos PU-43, PU-44, PB-12 y P-4a.

Respecto a los parámetros fisicoquímicos medidos en laboratorio, durante el primer semestre 2023, se identifica un aumento en los sólidos disueltos totales (PB-11, PB-12 y CP-11).

Por otro lado, respecto de los cationes y aniones analizados durante el primer semestre 2023 se puede indicar que, si bien se reconoce una extendida variación de sus concentraciones, estas fueron acotadas a ciertos pozos y no exhiben comportamientos anómalos. En particular, en marzo 2023, se identifica una disminución de sulfato (CP-11 y PB-12) y, en junio 2023, se observan disminuciones puntuales de calcio (PU-48 y P-19a) y nitrato (PU-43).

La marca de agua de los puntos monitoreados corresponde a clorurada sódica. Además, en los diagramas de Stiff modificado se observa una mayor predominancia de los cloruros frente a los demás aniones, mientras que en los cationes se observa una predominancia en el sodio más potasio.

## 7 Referencias

- Resolución de Calificación Ambiental (RCA) N° 19/2020. Proyecto Rajo Inca.
- Apéndice 1 del Anexo 1-2 Adenda Excepcional EIA Proyecto Rajo Inca. Plan de Seguimiento y Plan de Alerta Temprana Pedernales.
- Craig, H (1961). Isotopic Variations in Meteoric Waters, Science, 133 (3465), 1702-1703.
- Risacher, F., Alonso, H., & Salazar, C. (1999). Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III regiones, Chile.

## Anexos

**Anexo A. Compromisos Ambientales**

**Anexo B. Certificaciones ETFA**

**Anexo C. Química, formato SMA**

**Anexo D. Certificados Mediciones**

**Anexo E. Esquemas de habilitación de pozos**