

CORPORACIÓN NACIONAL DEL COBRE DE CHILE

**SERVICIO DE MONITOREO AMBIENTAL, AGUAS, RILES Y
RESIDUOS SÓLIDOS, DIVISIÓN SALVADOR**

4600024727-093

**ANÁLISIS HIDROQUÍMICO
HIDROQUÍMICA (SEMESTRAL)
SALAR DE PEDERNALES
DICIEMBRE 2024**

0	20-03-25	REVISION CODELCO	PE	MB	CBG	KAG
B	06-03-25	REVISION CODELCO	PE	MB	CBG	KAG
REV N°	FECHA	EMITIDO PARA	POR	REVISADO POR	APROBADO POR	APROBADO POR
			AGQ CHILES.A.			CODELCO
						Pág. 1 de 97
		4600024727-093				Rev.0

Servicio de monitoreo ambiental, aguas, RILES y residuos sólidos

División Salvador

Hidroquímica
Salar de Pedernales

Segundo Semestre 2024

Marzo 2025

1205_AGQ_HQ_SegundoSemestre2024_SPED_v0



Índice

Resumen Ejecutivo	11
1 Introducción.....	12
2 Objetivos.....	12
2.1 Antecedentes.....	13
2.2 Compromisos ambientales.....	13
3 Materiales y métodos	21
3.1 Descripción del área de estudio	21
3.2 Puntos y programa de monitoreo	22
3.3 Metodologías	24
3.3.1 Mediciones parámetros fisicoquímicos in situ.....	24
3.3.2 Toma de muestra	24
3.3.3 Análisis hidroquímico	25
3.3.4 Control de calidad	25
4 Resultados	26
4.1 Toma de muestras	26
4.2 Parámetros fisicoquímicos in situ.....	28
4.3 Parámetros fisicoquímicos laboratorio	37
4.4 Cationes – aniones disueltos	46
5 Discusión de resultados	81
5.1 Control de calidad	81
5.2 Evolución temporal parámetros hidroquímicos.....	88
5.2.1 Parámetros fisicoquímicos in situ	89

5.2.2	Parámetros fisicoquímicos laboratorio.....	89
5.2.3	Cationes y aniones disueltos.....	89
5.3	Diagrama Piper.....	90
5.4	Diagrama Stiff modificado.....	92
6	Conclusiones.....	94
7	Referencias.....	95
Anexo A.	Compromisos Ambientales.....	97
Anexo B.	Certificaciones ETFA.....	97
Anexo C.	Química, formato SMA.....	97
Anexo D.	Certificados Mediciones.....	97
Anexo E.	Esquemas de habilitación de pozos.....	97

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”	14
Tabla 3-1: Puntos de seguimiento correspondientes a 11 pozos/piezómetros y 6 punteras.	22
Tabla 3-2: Parámetros de laboratorio analizados.	25
Tabla 4-1: Puntos monitoreados, fecha de toma de muestra, método de muestreo y profundidad del nivel.	26
Tabla 4-2: Mediciones fisicoquímicas in situ en pozos realizadas en el segundo semestre 2024.	28
Tabla 4-3: Mediciones fisicoquímicas in situ en punteras realizadas en el segundo semestre 2024.	33
Tabla 4-4: Mediciones fisicoquímicas de laboratorio en pozos realizadas en el segundo semestre 2024.	37
Tabla 4-5: Mediciones fisicoquímicas de laboratorio en punteras realizadas en el segundo semestre 2024.	42
Tabla 4-6: Mediciones de cationes y aniones disueltos en pozos realizadas en el segundo semestre 2024.	46
Tabla 4-7: Mediciones de cationes y aniones disueltos en punteras realizadas en el segundo semestre 2024.	64
Tabla 5-1: Error porcentual calculado por el laboratorio.	81
Tabla 5-2: Verificación datos in situ v/s laboratorio – Conductividad eléctrica y pH.	82

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.	21
Figura 3-2: Ubicación de los puntos de monitoreo hidroquímico en la cuenca Salar de Pedernales.	23
Figura 4-1: Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.	29
Figura 4-2: Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en los puntos P-4a y P-19a. ...	29
Figura 4-3: Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en los puntos B-2 y B-4.	30
Figura 4-4: Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.	30
Figura 4-5: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.	31
Figura 4-6: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH) en los puntos P-4a y P-19a.	31
Figura 4-7: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH) en los puntos B-2 y B-4.	32
Figura 4-8: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.	32
Figura 4-9. Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.	33
Figura 4-10. Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.	34
Figura 4-11: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44. ...	35
Figura 4-12: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49. ...	36
Figura 4-13: Evolución temporal de Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.	38
Figura 4-14: Evolución temporal de Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en los puntos P-4a y P-19a.	38
Figura 4-15: Evolución temporal de Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en los puntos B-2 y B-4.	39
Figura 4-16: Evolución temporal de Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.	39

Figura 4-17: Evolución temporal de pH (unidades de pH) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.	40
Figura 4-18: Evolución temporal de pH (unidades de pH) en los puntos P-4a y P-19a.	40
Figura 4-19: Evolución temporal de pH (unidades de pH) en los puntos B-2 y B-4.	41
Figura 4-20: Evolución temporal de pH (unidades de pH) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.	41
Figura 4-21: Evolución temporal de Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.	42
Figura 4-22: Evolución temporal de Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.	43
Figura 4-23: Evolución temporal de pH (unidades de pH) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.	44
Figura 4-24: Evolución temporal de pH (unidades de pH) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.	45
Figura 4-25: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/L) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.	47
Figura 4-26: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/L) en los puntos P-4a y P-19a.	48
Figura 4-27: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/L) en los puntos B-2 y B-4.	48
Figura 4-28: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/L) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.	49
Figura 4-29: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/L) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.	50
Figura 4-30: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/L) en los puntos P-4a y P-19a.	50
Figura 4-31: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/L) en los puntos B-2 y B-4.	51
Figura 4-32: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/L) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.	51
Figura 4-33: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/L) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.	52
Figura 4-34: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/L) en los puntos P-4a y P-19a.	52
Figura 4-35: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/L) en los puntos B-2 y B-4.	53
Figura 4-36: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/L) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.	53
Figura 4-37: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/L) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.	54

Figura 4-38: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/L) en los puntos P-4a y P-19a.	54
Figura 4-39: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/L) en los puntos B-2 y B-4.	55
Figura 4-40: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/L) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.	55
Figura 4-41: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/L) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.....	56
Figura 4-42: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/L) en los puntos P-4a y P-19a.....	56
Figura 4-43: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/L) en los puntos B-2 y B-4.....	57
Figura 4-44: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/L) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.....	57
Figura 4-45: Evolución temporal de Cloruro (mg/L) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.	58
Figura 4-46: Evolución temporal de Cloruro (mg/L) en los puntos P-4a y P-19a.	58
Figura 4-47: Evolución temporal de Cloruro (mg/L) en los puntos B-2 y B-4.	59
Figura 4-48: Evolución temporal de Cloruro (mg/L) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.	59
Figura 4-49: Evolución temporal de Nitrato (mg/L) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.	60
Figura 4-50: Evolución temporal de Nitrato(mg/L) en los puntos P-4a y P-19a.....	60
Figura 4-51: Evolución temporal de Nitrato(mg/L) en los puntos B-2 y B-4.....	61
Figura 4-52: Evolución temporal de Nitrato(mg/L) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.	61
Figura 4-53: Evolución temporal de Sulfato (mg/L) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.....	62
Figura 4-54: Evolución temporal de Sulfato (mg/L) en los puntos P-4a y P-19a.....	62
Figura 4-55: Evolución temporal de Sulfato (mg/L) en los puntos B-2 y B-4.....	63
Figura 4-56: Evolución temporal de Sulfato (mg/L) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.....	63
Figura 4-57: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/L) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.	65
Figura 4-58: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/L) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.	66
Figura 4-59: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/L) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.....	67
Figura 4-60: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/L) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.....	68
Figura 4-61: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/L) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.	69

Figura 4-62: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/L) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.	70
Figura 4-63: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/L) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.	71
Figura 4-64: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/L) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.	72
Figura 4-65: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/L) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.	73
Figura 4-66: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/L) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.	74
Figura 4-67: Evolución temporal de Cloruro (mg/L) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.	75
Figura 4-68: Evolución temporal de Cloruro (mg/L) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.	76
Figura 4-69: Evolución temporal de Nitrato (mg/L) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.	77
Figura 4-70: Evolución temporal de Nitrato disuelto (mg/L) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.	78
Figura 4-71: Evolución temporal de Sulfato (mg/L) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.	79
Figura 4-72: Evolución temporal de Sulfato (mg/L) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.	80
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.	84
Figura 5-2: Comparación entre la conductividad eléctrica medida in situ y laboratorio en los pozos B-2, B-4 y PBT-14.	84
Figura 5-3: Comparación entre la conductividad eléctrica medida in situ y laboratorio en los pozos POD-1, POD-2 y POD-3.	85
Figura 5-4: 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.	85
Figura 5-5: Comparación entre el pH medido in situ y laboratorio en los pozos CP-11, P-19a, P-4a, PB-11 y PB-12.	86
Figura 5-6: Comparación entre el pH medido in situ y laboratorio en los pozos B-2, B-4 y PBT-14.	86
Figura 5-7: Comparación entre el pH medido in situ y laboratorio en los pozos POD-1, POD-2 y POD-3.	87
Figura 5-8: 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.	87
Figura 5-9: Comparación entre las mediciones tomadas in situ y en laboratorio – Conductividad eléctrica y pH.	88

Figura 5-10: Diagrama Piper de los puntos monitoreados en el segundo semestre 2024. 91

Figura 5-11: Diagramas de Stiff modificado de los puntos monitoreados en el segundo semestre 2024. . 93

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 segundo semestre de 2024. 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, a excepción de la puntera PU-31 en septiembre 2024, que se encontraba congelada, y la PU-44 en septiembre y diciembre 2024, que presentó un nivel de agua insuficiente para toma de muestras y la consecuente medición de parámetros hidroquímicos en laboratorio.

En general, los parámetros fisicoquímicos medidos in situ y en laboratorio muestran mayores valores de conductividad y sólidos disueltos totales en el punto POD-1, en comparación con los demás puntos de monitoreo, durante todo el periodo evaluado. En cuanto al pH in situ, en el semestre actual se observa un aumento en los puntos B-2, B-4, POD-2, POD-3 y PB-11, respecto a las mediciones previas, mientras que el pH registrado en laboratorio indica un aumento en el punto PB-11.

Por otro lado, respecto de los cationes y aniones analizados durante todo el periodo evaluado, las concentraciones de calcio, sodio, sulfato y cloruro son más altas en el punto POD-1, en comparación con los otros puntos de monitoreo. Adicionalmente, las concentraciones de manganeso en POD-1 y nitrato en los puntos B-2, B-4, POD-2 y POD-3, registraron aumentos anómalos durante el semestre reportado, los cuales serán verificados con las mediciones posteriores, pudiendo corresponder a errores de muestreo. Los valores anómalos registrados en el primer semestre de 2024, así como en septiembre 2024, retoman su tendencia en diciembre 2024, y los demás parámetros de cationes y aniones no exhiben comportamientos anómalos, manteniéndose estables en comparación con los registros históricos.

Las aguas monitoreadas son del tipo cloruradas sódicas, características de aguas tipo salmueras. Si bien el punto POD-1 tiene la misma marca de agua que los demás puntos, en general, presenta el mayor contenido de cationes y aniones mayoritarios, lo cual se refleja en su elevada conductividad eléctrica.

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 de 2020 hasta diciembre de 2024, 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 de 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 ktCu/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 Salar de Pedernales, el cual compromete el control de la calidad química en 11 pozos y 6 punteras (teniendo en cuenta los pozos asociados al nuevo campo de bombeo).

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 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"> - Disminución del volumen de agua en el acuífero de la cuenca Salar de Pedernales. - 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.
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"> • 29 pozos o piezómetros (ver Tabla 2-1 del Apéndice 1 del Anexo 1 de la Adenda Complementaria Excepcional). • 18 punteras (ver Tabla 2-2 del Apéndice 1 del Anexo 1 de la Adenda Complementaria Excepcional). • 3 estaciones meteorológicas (Tabla 2-3 del Apéndice 1 del Anexo 1 de la Adenda Complementaria Excepcional). <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) niveles piezométricos y variables climáticas, 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

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.

2) **variables climáticas**, 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).

En ellas se medirán, cada 60 minutos, los siguientes parámetros:

- Presión.
- Altura de nieve.
- Radiación solar.
- Velocidad y dirección del viento.
- Temperatura.
- Humedad relativa.
- Precipitación.
- Evaporación desde el suelo en la estación meteorológica Centro Salar.

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.

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.

3) **calidad química de las aguas en el entorno del SVAHT** emplazado al oeste del salar.

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.

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.

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.

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.

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.

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"> • 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. • 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). <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>1) Puntos de Control:</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>2) Variables de Control:</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>3) Valores Umbrales, 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

	<ul style="list-style-type: none"> • 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>Fase 2:</p> <p>a. Si la activación de la fase 2, se debe exclusivamente a la activación del VUM, el Titular deberá:</p> <ul style="list-style-type: none"> 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. 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>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> <ul style="list-style-type: none"> 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. 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. 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. <ul style="list-style-type: none"> • Los 40 lt/s a reducir, se realizarán en 2 etapas de 20 lt/s cada una que se describen a continuación: <ul style="list-style-type: none"> i. Activada la Fase 2 de PSAV, se reducirá automáticamente 20 lt/s. 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>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> <ul style="list-style-type: none"> o Presentar toda la información contenida en los puntos a) y b). <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"> • 29 pozos o piezómetros • 18 punteras • Estaciones meteorológicas <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"> • Profundidad del nivel freático. <p>En las estaciones meteorológicas se medirá:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Presión • Altura de nieve • Radiación solar • Velocidad y dirección del viento • Temperatura • Humedad relativa • Precipitación • Evaporación desde el suelo (estación Centro Salar). <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"> 1. Profundidad nivel freático: mediciones mensuales. 2. Variables climáticas: mediciones horarias con descarga de los datos trimestral 3. Calidad de las aguas: mediciones trimestrales.

Tabla 13.1. Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario en la Cuenca de Pedernales	
	<p>4. Sensores de medición continua: 2 mediciones por día con descarga de los datos trimestral.</p> <p>5. Actualización del modelo. No aplica</p>
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	<p>1. Profundidad nivel freático: informe anual a SMA que incluya la base de datos (en Excel) y el análisis.</p> <p>2. Variables climáticas: reporte semestral a SMA.</p> <p>3. Calidad de las aguas: reporte semestral a SMA.</p> <p>4. Sensores de medición continua: informe anual a SMA que incluya la base de datos (en Excel) y el análisis.</p> <p>5. Actualización del modelo: cada 5 años a SMA.</p>

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 aproximadamente 335 km².

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.

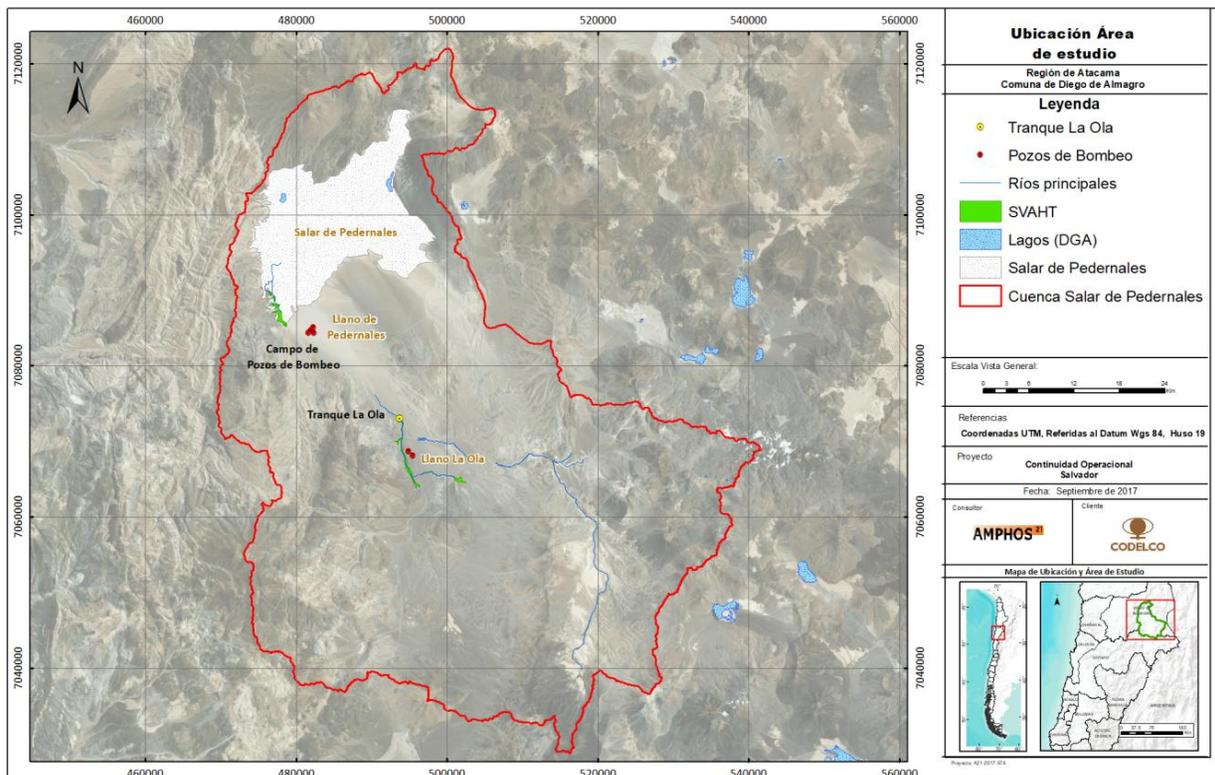


Figura 3-1: Mapa ubicación de la cuenca Salar de Pedernales. Fuente: Programa de Monitoreo cuenca de Salar de Pedernales, Amphos 21.

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). De la misma forma, desde el segundo semestre de 2023, se consideran 6 pozos de control (B-2, B-4, POD-1, POD-2, POD-3 y PBT-14) que forman parte del Compromiso Ambiental Voluntario (CAV), y que se asocian a los nuevos pozos de bombeo que se encontrarán alejados al menos 5 km aguas arriba del campo de pozos de bombeo del Llano Pajaritos.

Los puntos se ubican en el SVAHT, en su entorno y en los sectores de recarga ubicados aguas abajo 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.

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

Tabla 3-1: Puntos de seguimiento correspondientes a 11 pozos/piezómetros y 6 punteras.

Nombre punto	Este WGS84 (m)	Norte WGS84 (m)	Cota (m s.n.m.)
B-2	484.841	7.085.753	3.407
B-4	489.516	7.081.315	3.483
CP-11	478.477	7.087.322	3.360
P-4a	481.828	7.086.312	3.375
P-19a	480.343	7.085.060	3.375
PB-11	479.585	7.084.355	3.382
PB-12	480.889	7.085.683	3.376
PBT-14	488.921	7.078.150	3.514
POD-1	488.115	7.079.481	3.494
POD-2	489.148	7.080.229	3.493
POD-3	490.380	7.078.244	3.517
PU-31	477.255	7.088.087	3.357
PU-43	476.634	7.087.031	3.358
PU-44	476.511	7.088.181	3.357
PU-45	476.775	7.089.102	3.356
PU-48	477.596	7.088.149	3.357
PU-49	478.041	7.087.092	3.483

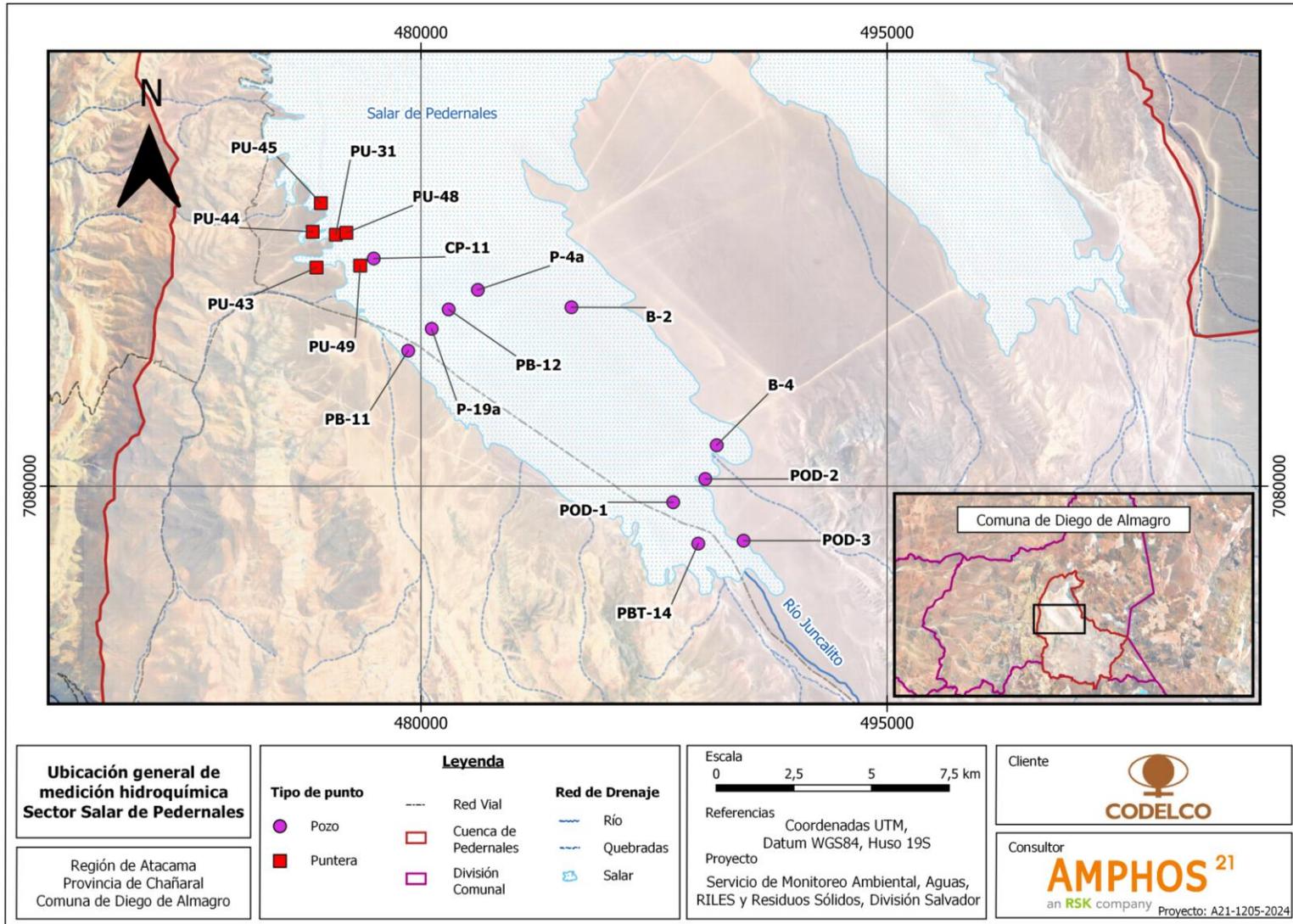


Figura 3-2: Ubicación de los puntos de monitoreo hidroquímico en la cuenca Salar de Pedernales.

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, previo al inicio de la fase de construcción, hasta la actualidad. 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, previo al inicio de la fase de construcción, hasta la actualidad. 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 segundo semestre de 2024, se visitaron en total 17 puntos en la cuenca Salar de Pedernales para la toma de muestras trimestrales de manera manual y la medición de los niveles de agua. Cabe señalar que en el segundo semestre de 2024 se incluyen los 6 pozos de control asociados al nuevo campo de pozos de bombeo comprometido en el PRI (B-2, B-4, POD-1, POD-2, POD-3 y PBT-14).

Adicionalmente, en septiembre de 2024 el punto PU-31 se encontró congelado, por lo que no se midió su nivel de agua ni se tomaron muestras para su análisis hidroquímico y, en septiembre y diciembre de 2024, si bien se efectuó la medición del nivel de agua en la puntera PU-44, el volumen de agua extraído fue insuficiente para el muestreo hidroquímico, por lo que solo se monitorearon los parámetros in situ. 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.)
B-2 (*)	12-09-2024	Bailer	46,123
B-2 (*)	09-12-2024	Bailer	46,093
B-4 (*)	12-09-2024	Bailer	68,930
B-4 (*)	09-12-2024	Bailer	68,580
CP-11	06-09-2024	Bailer	1,077
CP-11	16-12-2024	Bailer	1,087
P-4a	06-09-2024	Bailer	16,162
P-4a	09-12-2024	Bailer	16,142
P-19a	06-09-2024	Bailer	17,095
P-19a	09-12-2024	Bailer	17,065
PB-11	06-09-2024	Bailer	21,536
PB-11	09-12-2024	Bailer	21,516
PB-12	06-09-2024	Bailer	15,232
PB-12	09-12-2024	Bailer	15,212

Nombre punto	Fecha	Método de muestreo	Profundidad de nivel (m b.n.t.)
PBT-14 (*)	12-09-2024	Bailer	44,970
PBT-14 (*)	09-12-2024	Bailer	43,130
POD-1 (*)	12-09-2024	Bailer	49,850
POD-1 (*)	09-12-2024	Bailer	49,860
POD-2 (*)	12-09-2024	Bailer	57,320
POD-2 (*)	09-12-2024	Bailer	56,110
POD-3 (*)	12-09-2024	Bailer	31,100
POD-3 (*)	09-12-2024	Bailer	30,810
PU-31	20-09-2024	Bailer	Congelado
PU-31	23-12-2024	Bailer	0,147
PU-43	20-09-2024	Bailer	0,640
PU-43	23-12-2024	Bailer	0,640
PU-44	20-09-2024	Bailer	0,070
PU-44	23-12-2024	Bailer	0,100
PU-45	20-09-2024	Bailer	0,490
PU-45	23-12-2024	Bailer	0,520
PU-48	20-09-2024	Bailer	0,160
PU-48	16-12-2024	Bailer	0,200
PU-49	20-09-2024	Bailer	0,800
PU-49	16-12-2024	Bailer	0,840

(*): Pozos de control asociados al nuevo campo de pozos de bombeo.

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 4-12 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 segundo semestre 2024.

Parámetros	CP-11		PB-11		PB-12		P-19a		P-4a	
	Sept.24	Dic.24								
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	5.110	4.715	3.516	3.022	5.066	4.654	5.067	4.495	5.237	4.716
pH (u pH)	7,71	7,53	8,94	8,96	7,76	7,69	7,42	7,70	7,76	7,83

Parámetros	B-2		B-4		PBT-14	
	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	4.721	4.843	4.571	4.557	3.862	4.362
pH (u pH)	7,50	7,64	7,15	8,17	7,72	7,50

Parámetros	POD-1		POD-2		POD-3	
	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	18.860	18.700	4.603	4.471	4.540	4.510
pH (u pH)	7,29	7,19	7,74	8,10	7,72	8,13

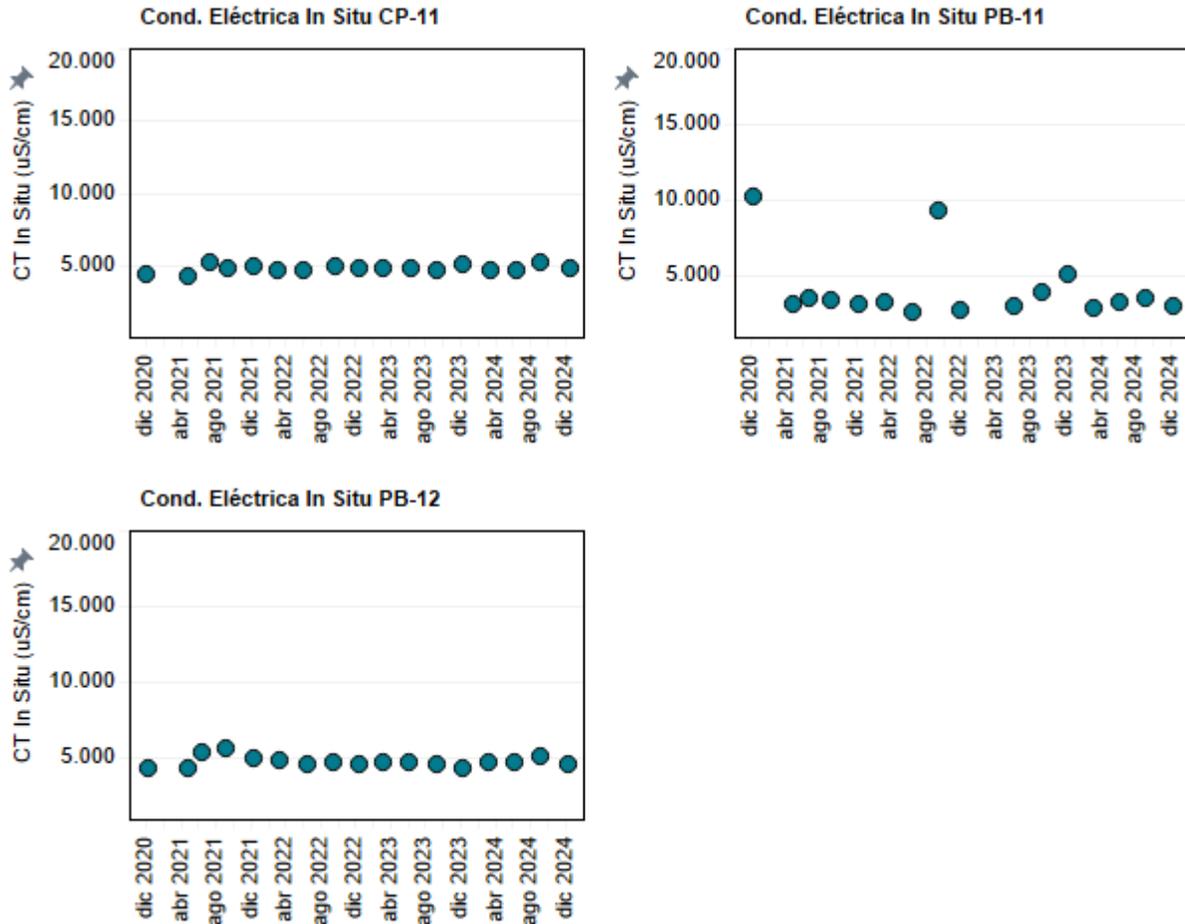


Figura 4-1: Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.

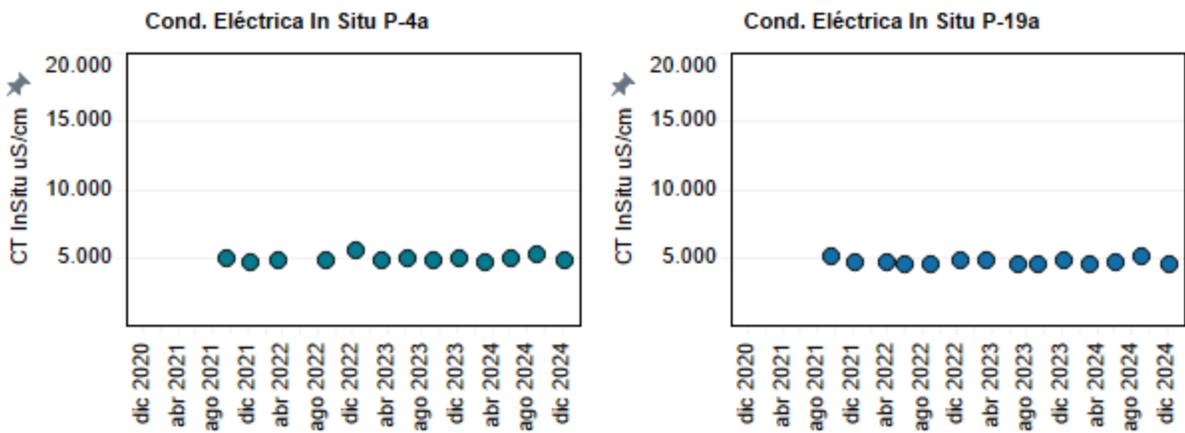


Figura 4-2: Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en los puntos P-4a y P-19a.

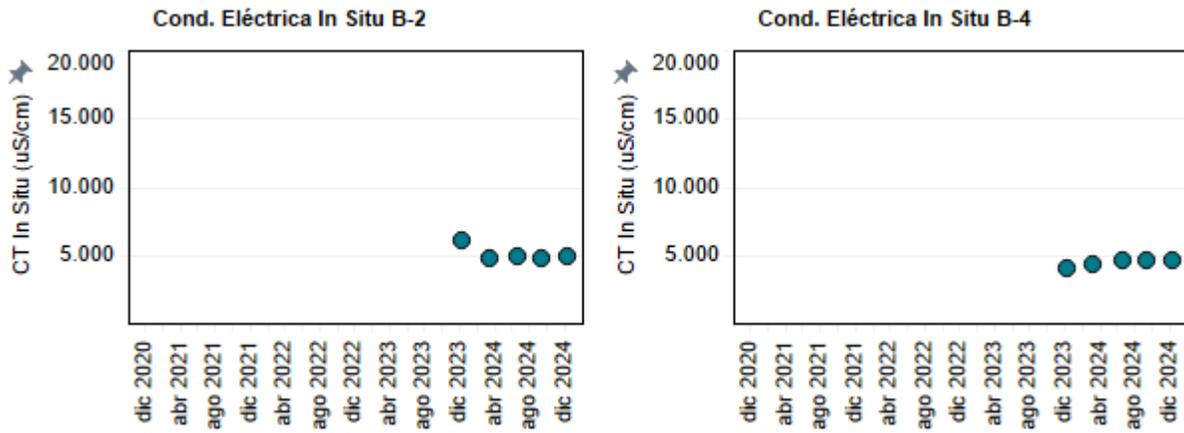


Figura 4-3: Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ (µS/cm) en los puntos B-2 y B-4.

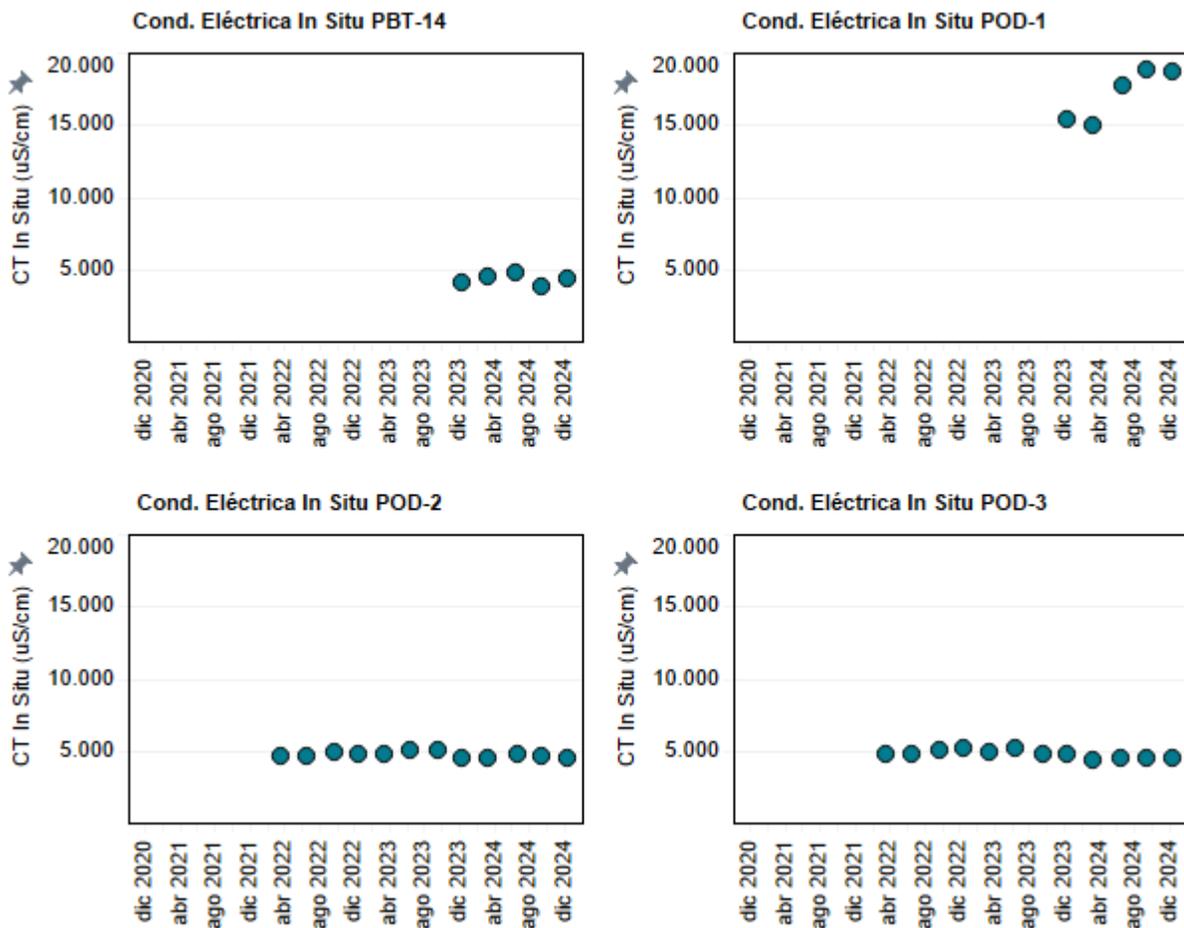


Figura 4-4: Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ (µS/cm) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.

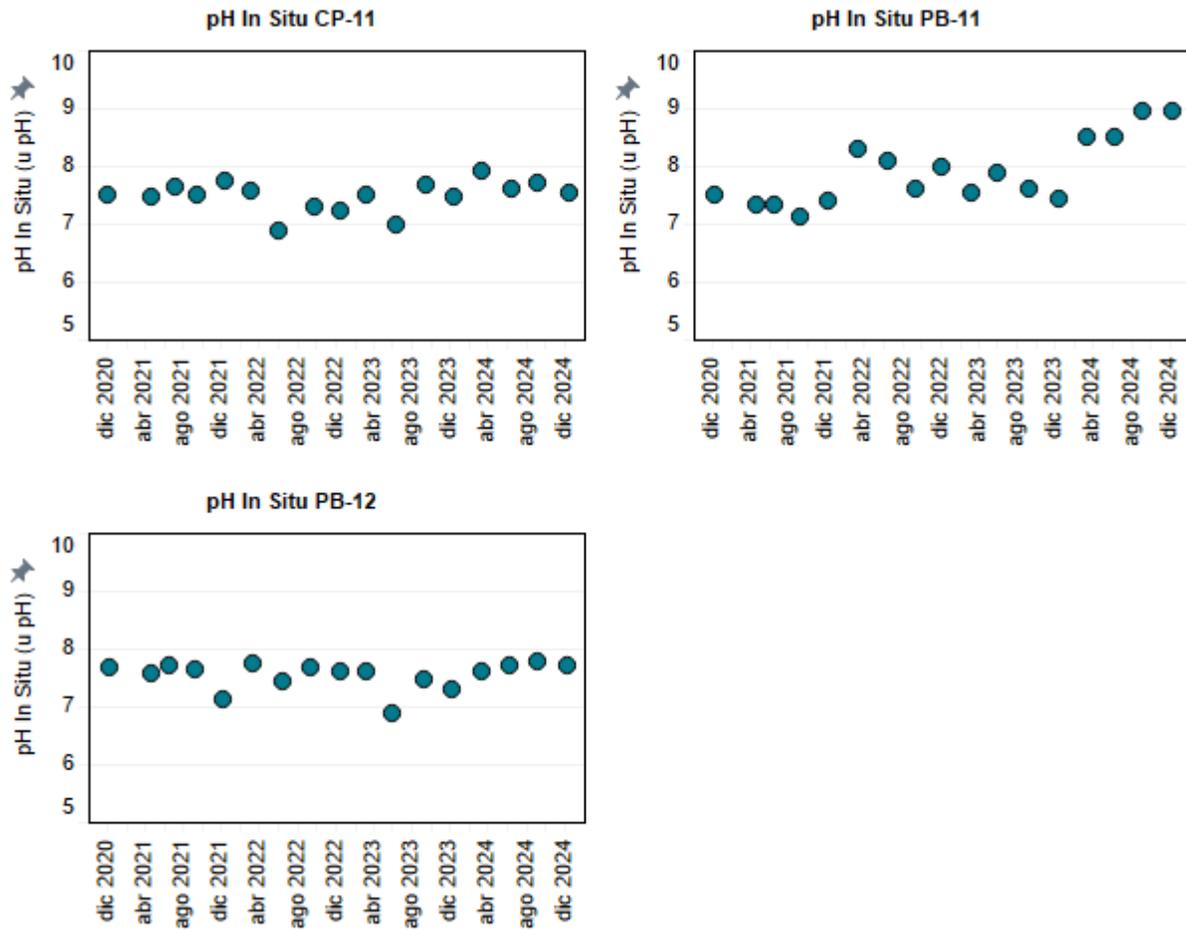


Figura 4-5: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.

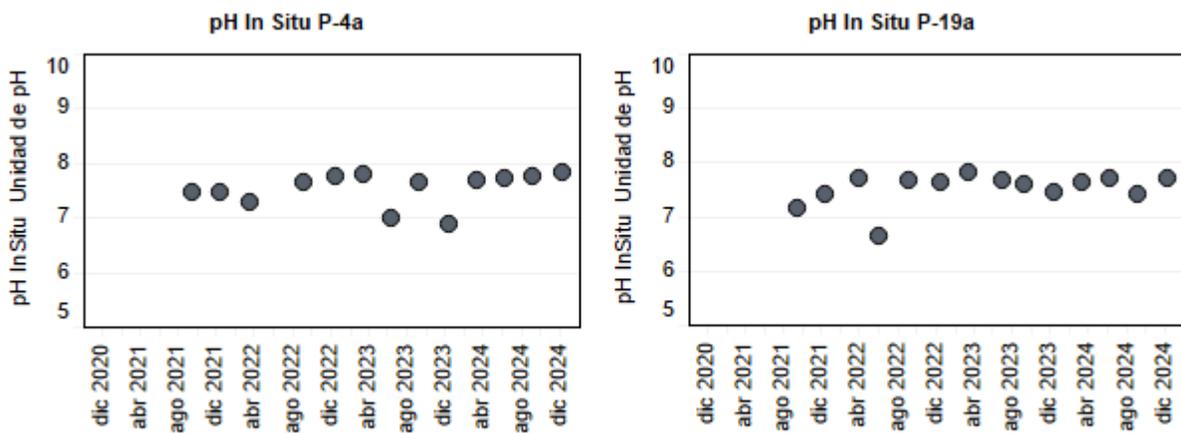


Figura 4-6: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH) en los puntos P-4a y P-19a.

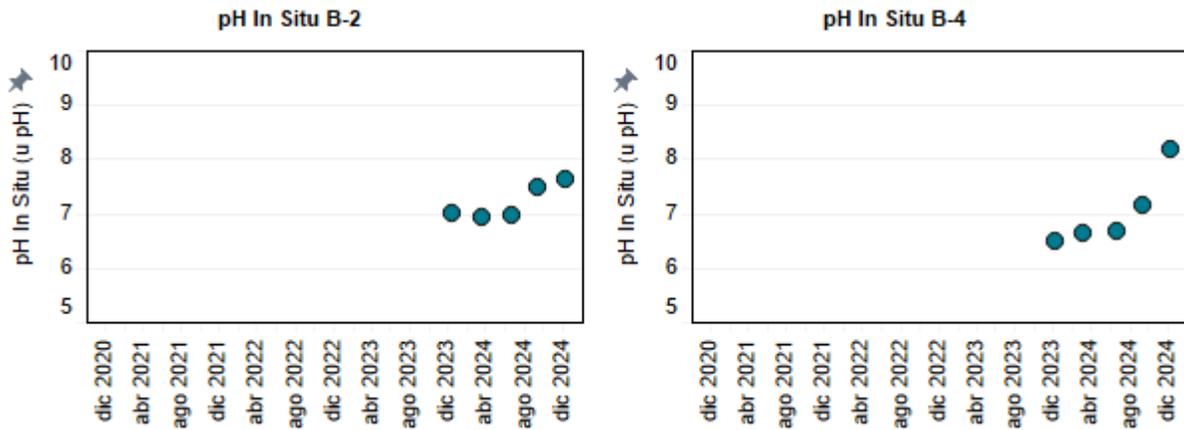


Figura 4-7: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH) en los puntos B-2 y B-4.

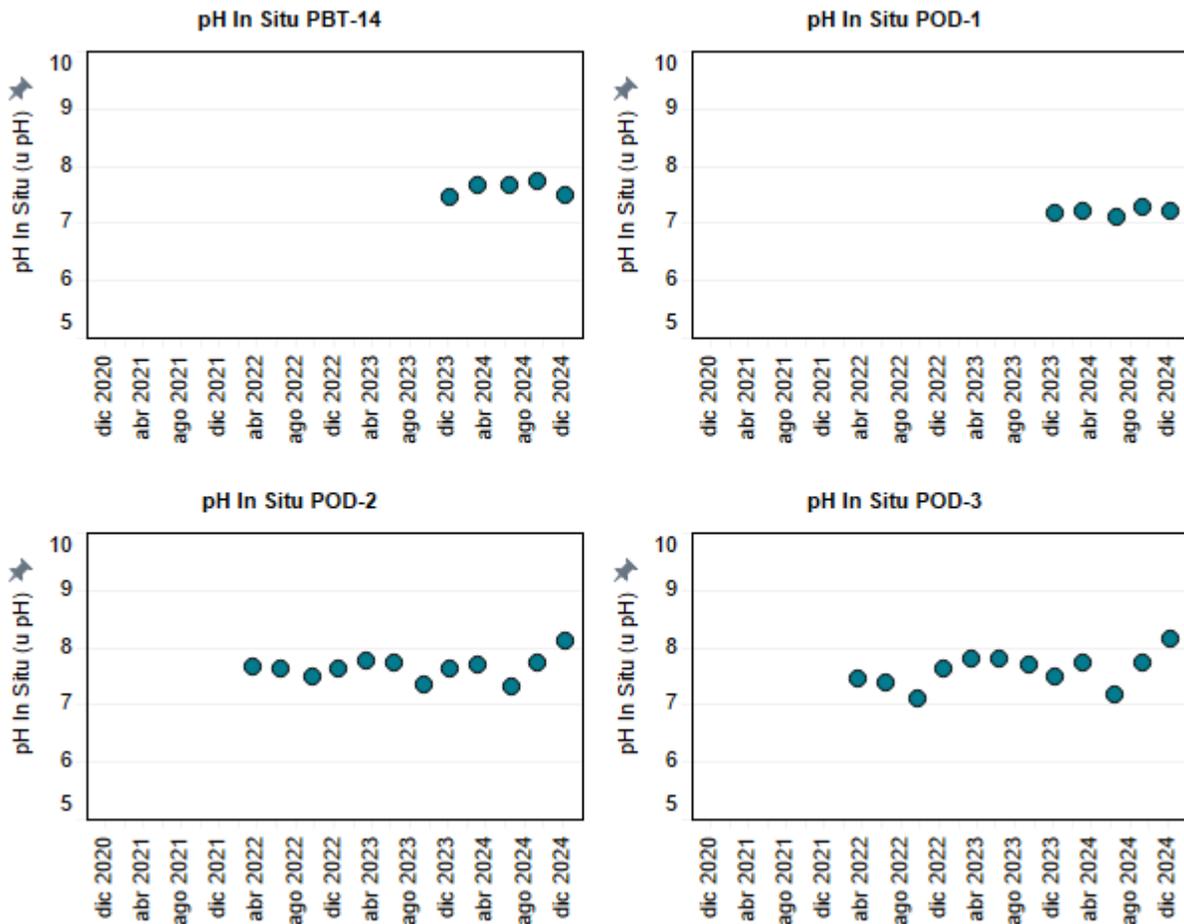


Figura 4-8: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.

Tabla 4-3: Mediciones fisicoquímicas in situ en punteras realizadas en el segundo semestre 2024.

Parámetros	PU-31		PU-43		PU-44	
	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24
CE (μS/cm)	(*)	5.814	5.953	5.660	7.680	7.527
pH (u pH)	(*)	7,17	7,47	7,80	7,39	7,45

Parámetros	PU-45		PU-48		PU-49	
	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24
CE (μS/cm)	8.594	8.045	4.348	5.000	6.248	6.043
pH (u pH)	7,98	7,89	7,75	7,70	7,84	7,49

(*): Puntera congelada.

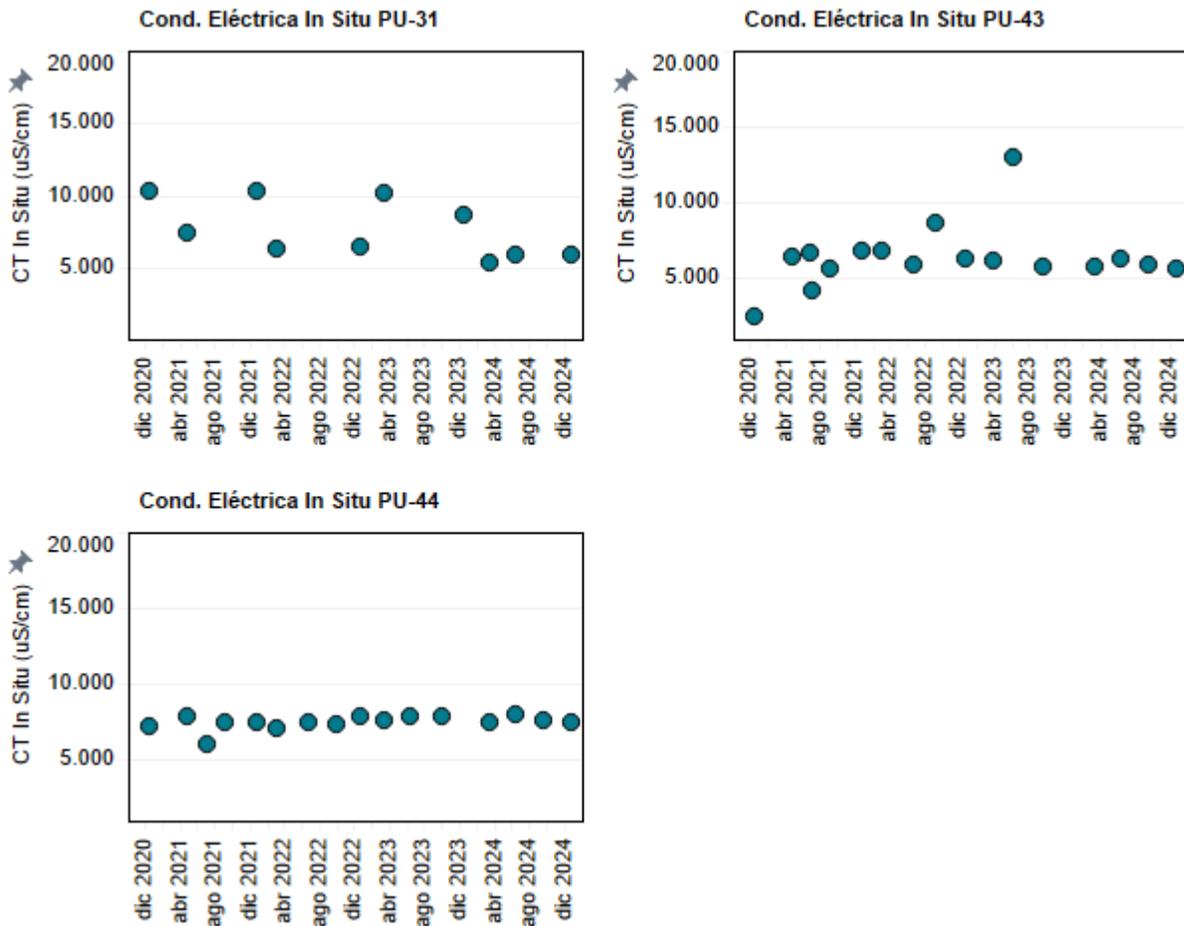


Figura 4-9. Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ (μS/cm) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.

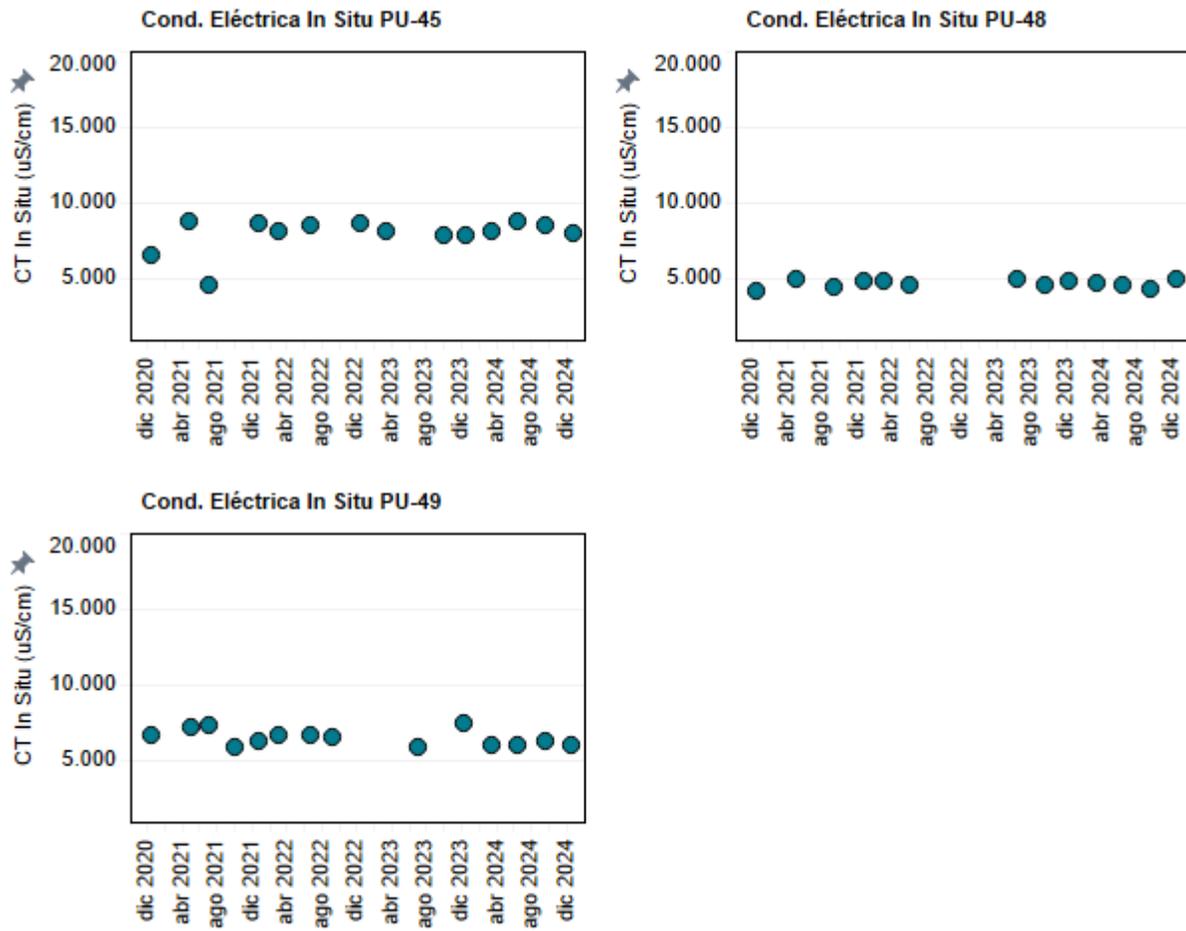


Figura 4-10. Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.

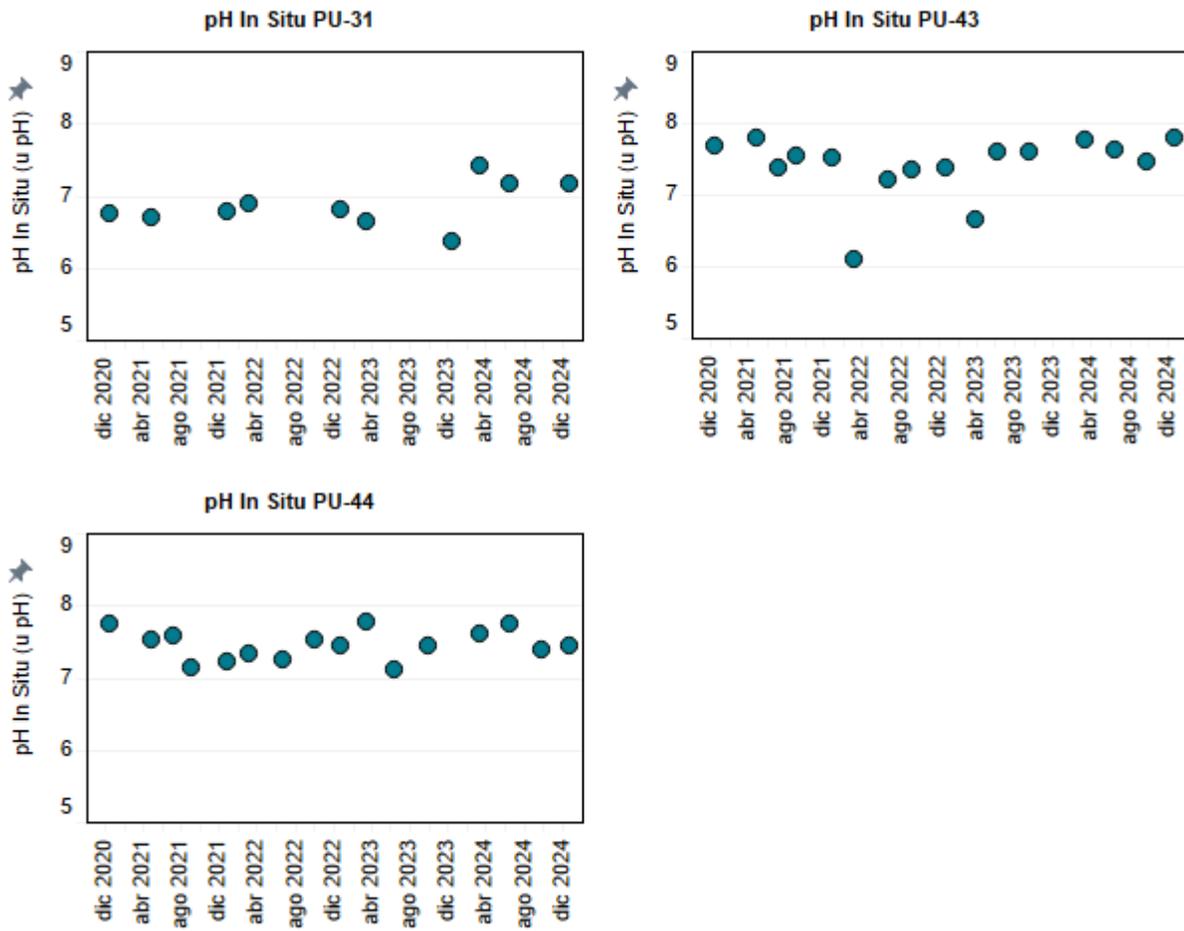


Figura 4-11: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.

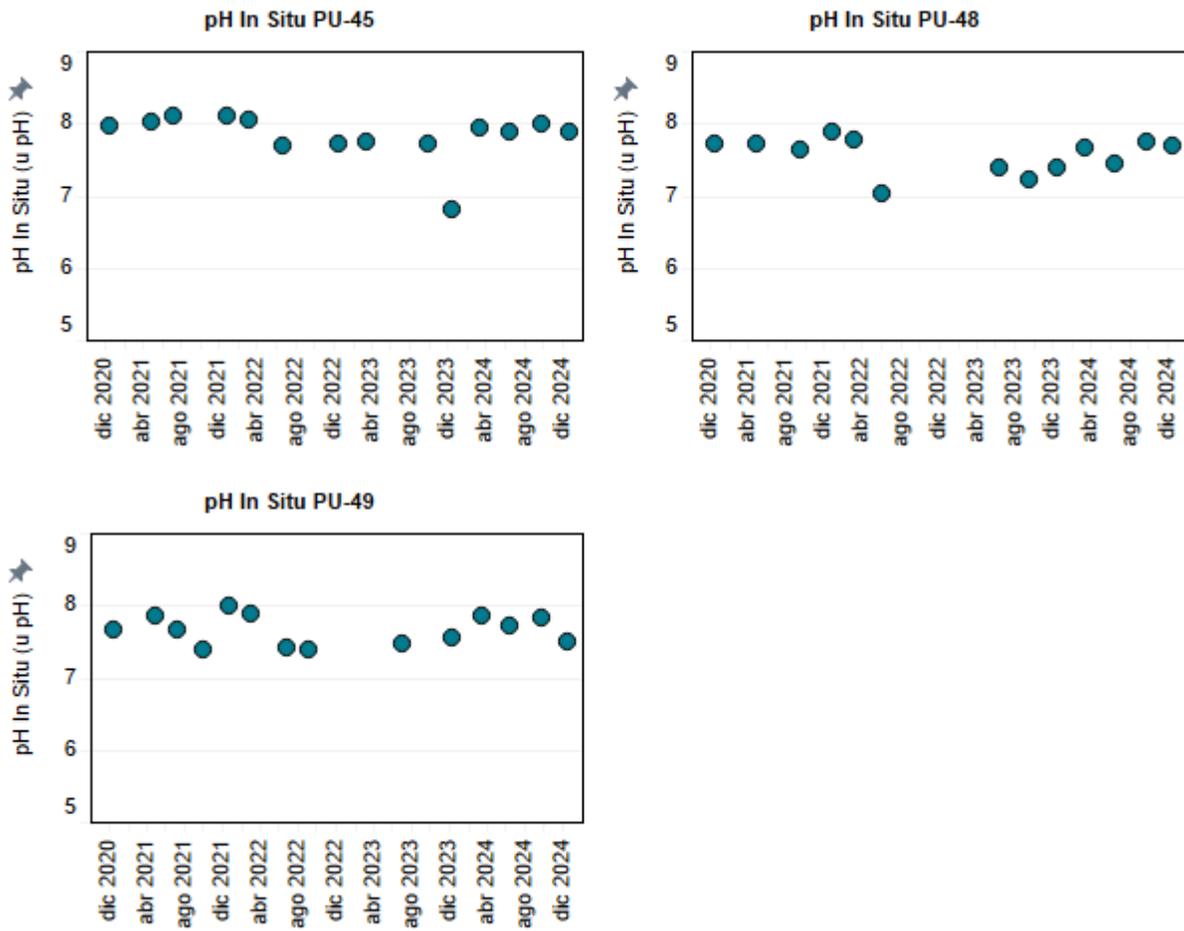


Figura 4-12: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.

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 4-13 a la Figura 4-24 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 segundo semestre 2024.

Parámetros	CP-11		PB-11		PB-12		P-19a		P-4a	
	Sept.24	Dic.24								
CE (μS/cm)	4.476	4.526	3.301	3.073	4.560	4.508	4.406	4.403	4.774	4.637
pH (u pH)	7,67	8,23	8,15	8,86	7,70	8,03	7,68	8,08	7,71	7,89

Parámetros	B-2		B-4		PBT-14	
	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24
CE (μS/cm)	4.683	4.656	4.481	4.442	4.297	4.307
pH (u pH)	7,73	8,18	7,02	7,34	7,82	8,03

Parámetros	POD-1		POD-2		POD-3	
	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24
CE (μS/cm)	17.694	17.646	4.394	4.395	4.488	4.421
pH (u pH)	7,70	8,27	7,83	8,09	7,91	8,12

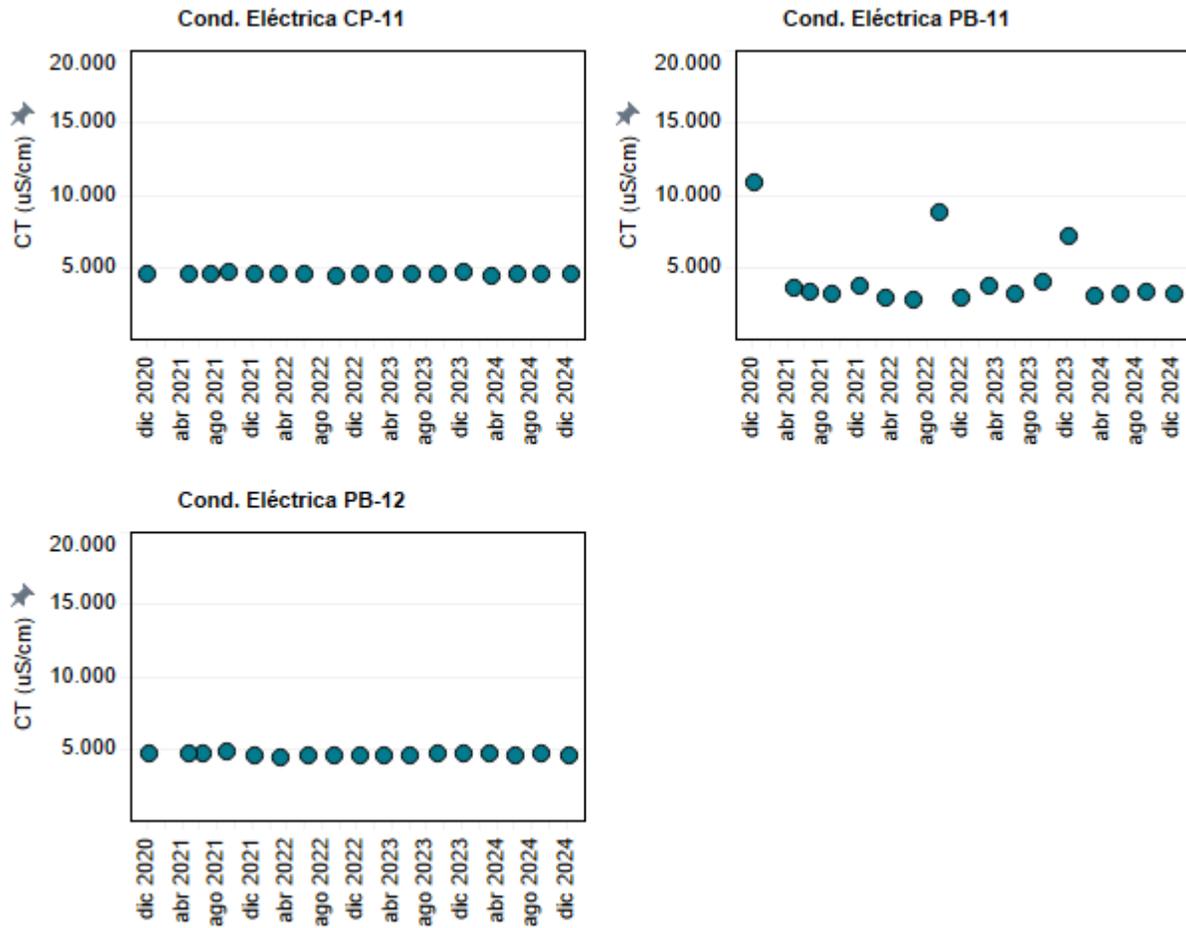


Figura 4-13: Evolución temporal de Conductividad eléctrica (μS/cm) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.

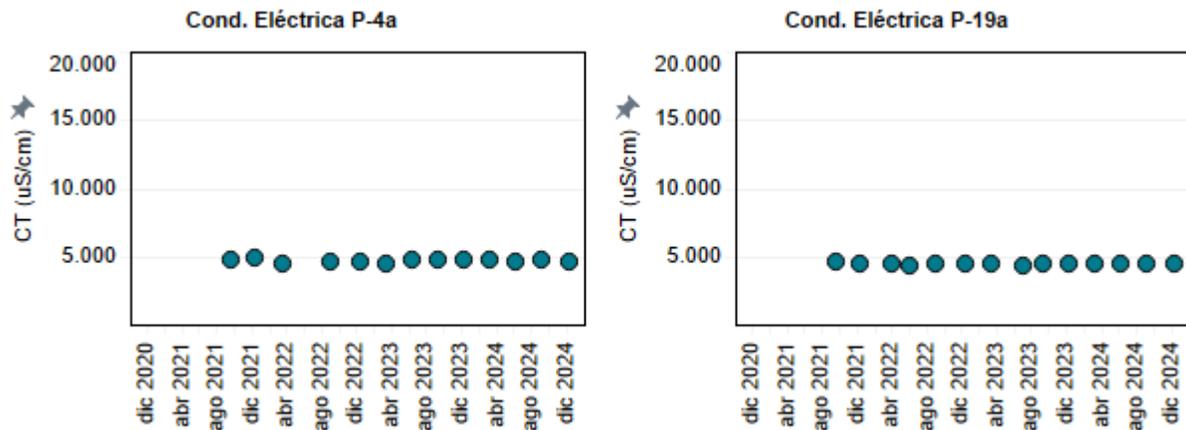


Figura 4-14: Evolución temporal de Conductividad eléctrica (μS/cm) en los puntos P-4a y P-19a.

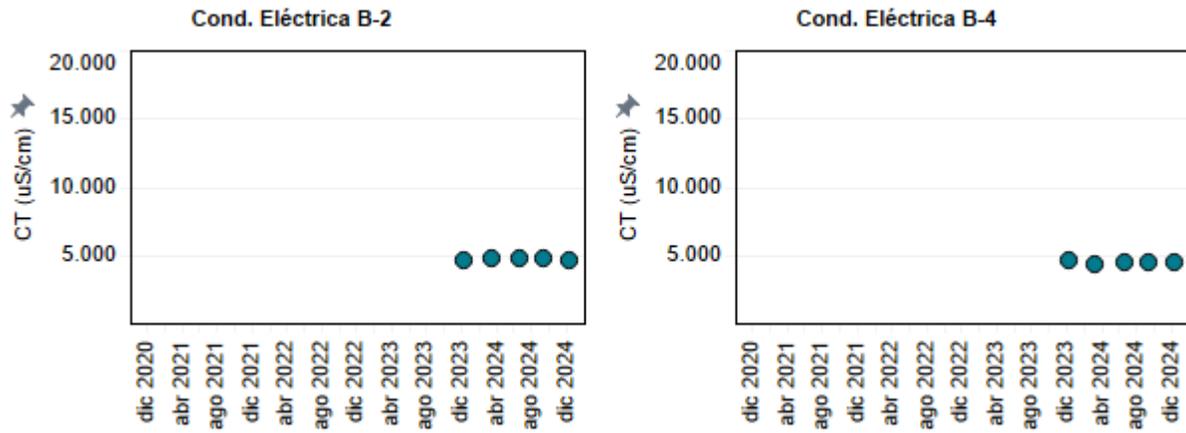


Figura 4-15: Evolución temporal de Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en los puntos B-2 y B-4.

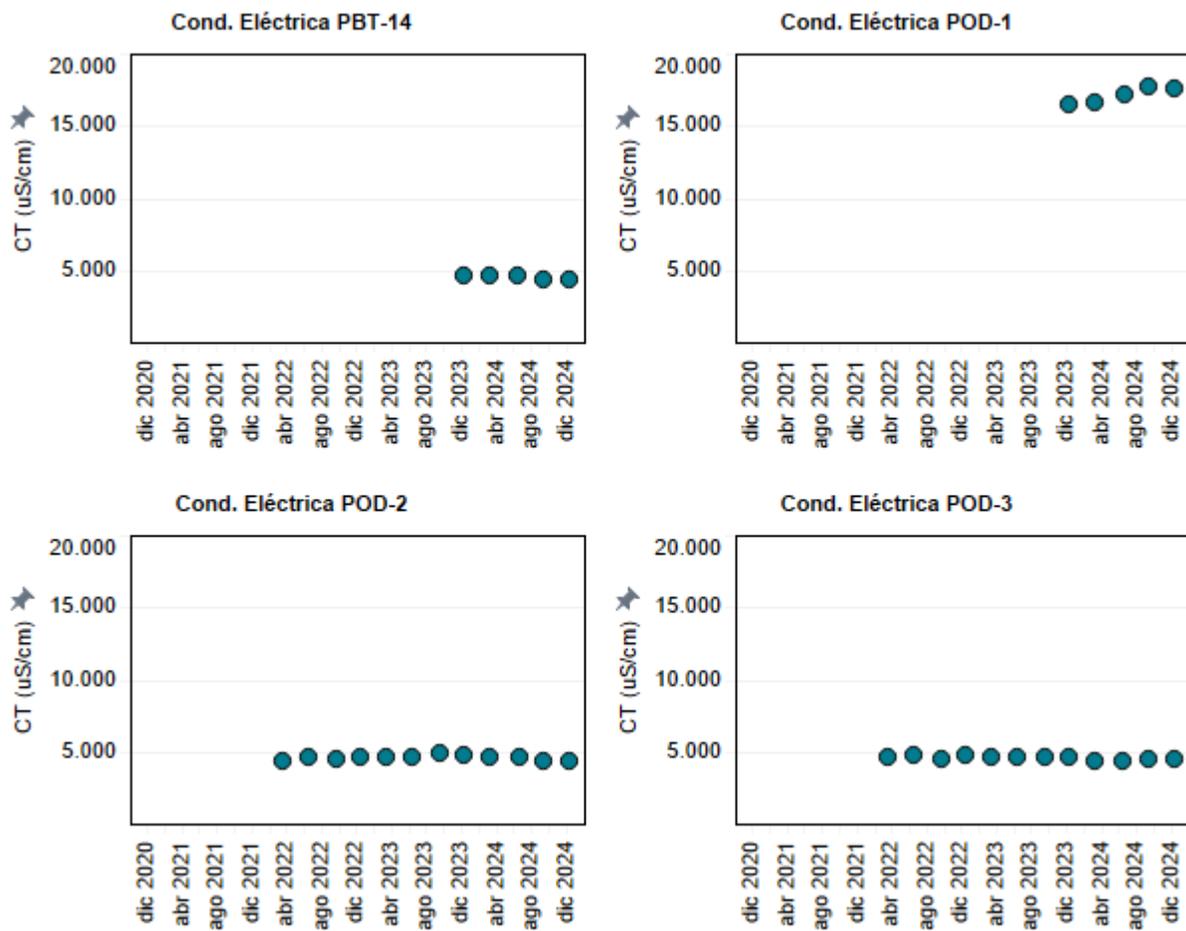


Figura 4-16: Evolución temporal de Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.

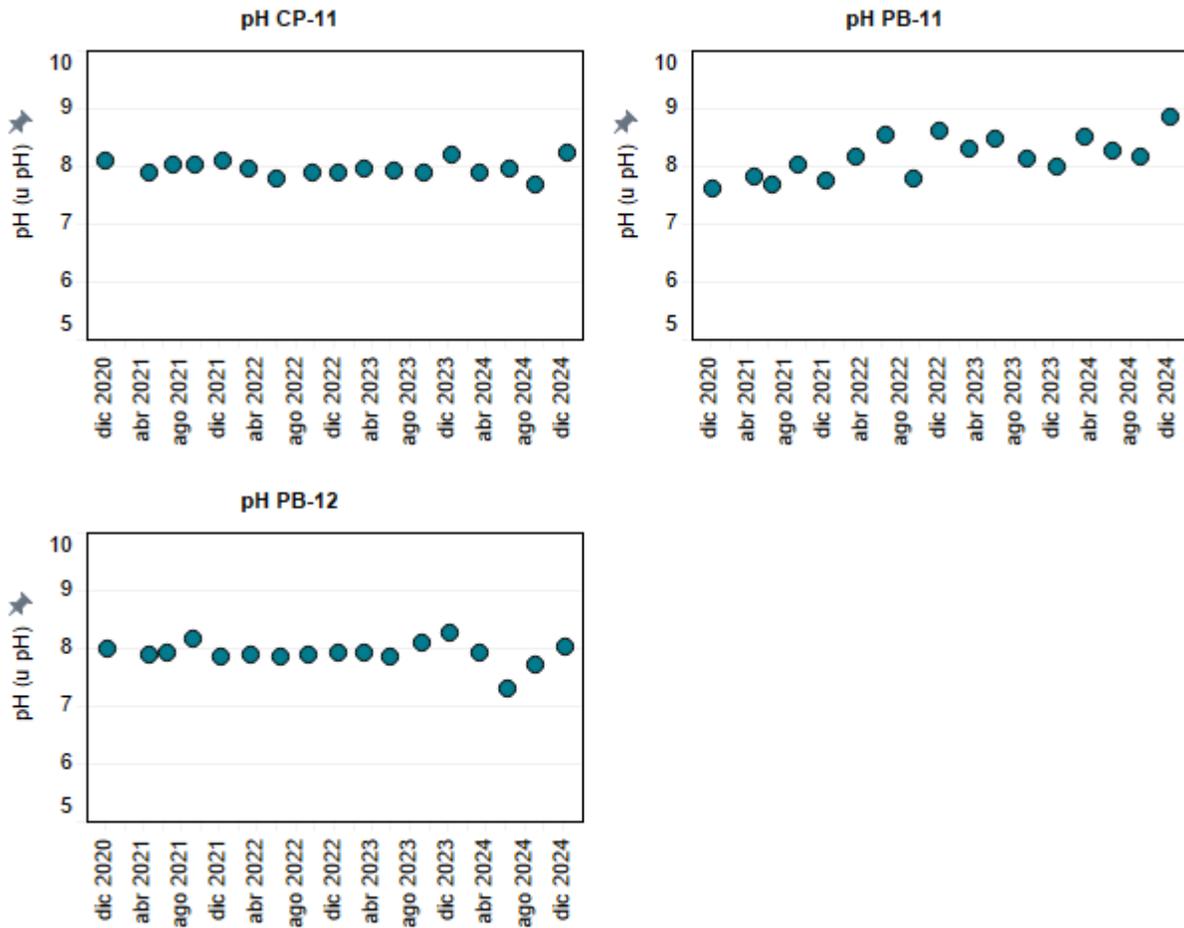


Figura 4-17: Evolución temporal de pH (unidades de pH) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.

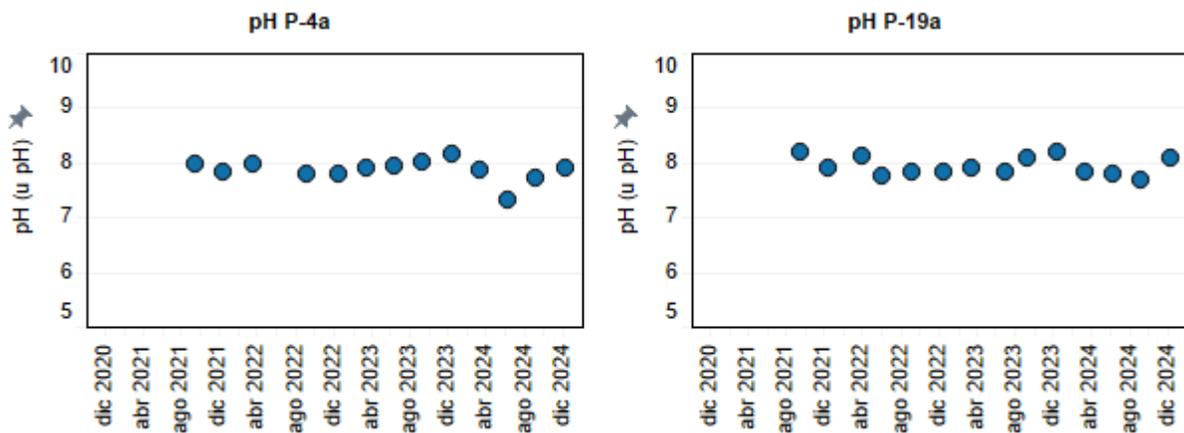


Figura 4-18: Evolución temporal de pH (unidades de pH) en los puntos P-4a y P-19a.

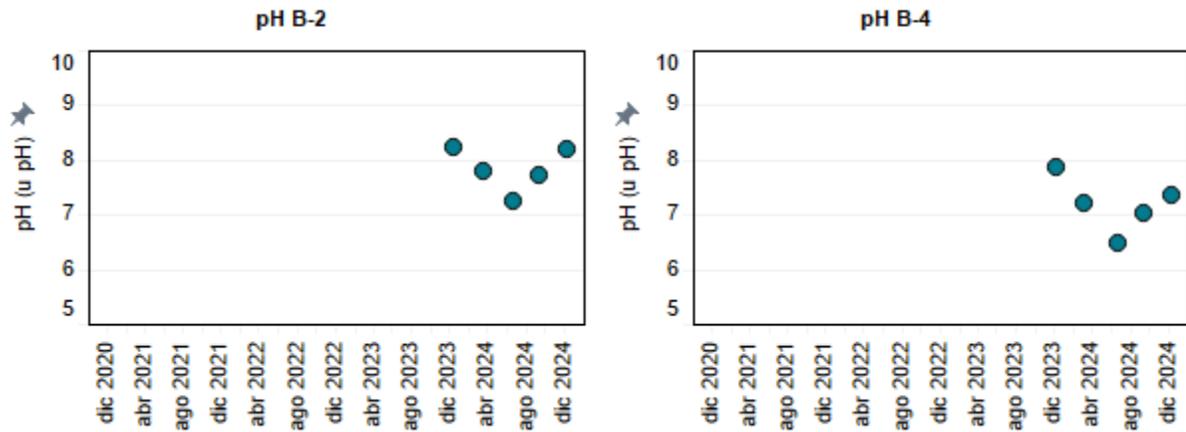


Figura 4-19: Evolución temporal de pH (unidades de pH) en los puntos B-2 y B-4.

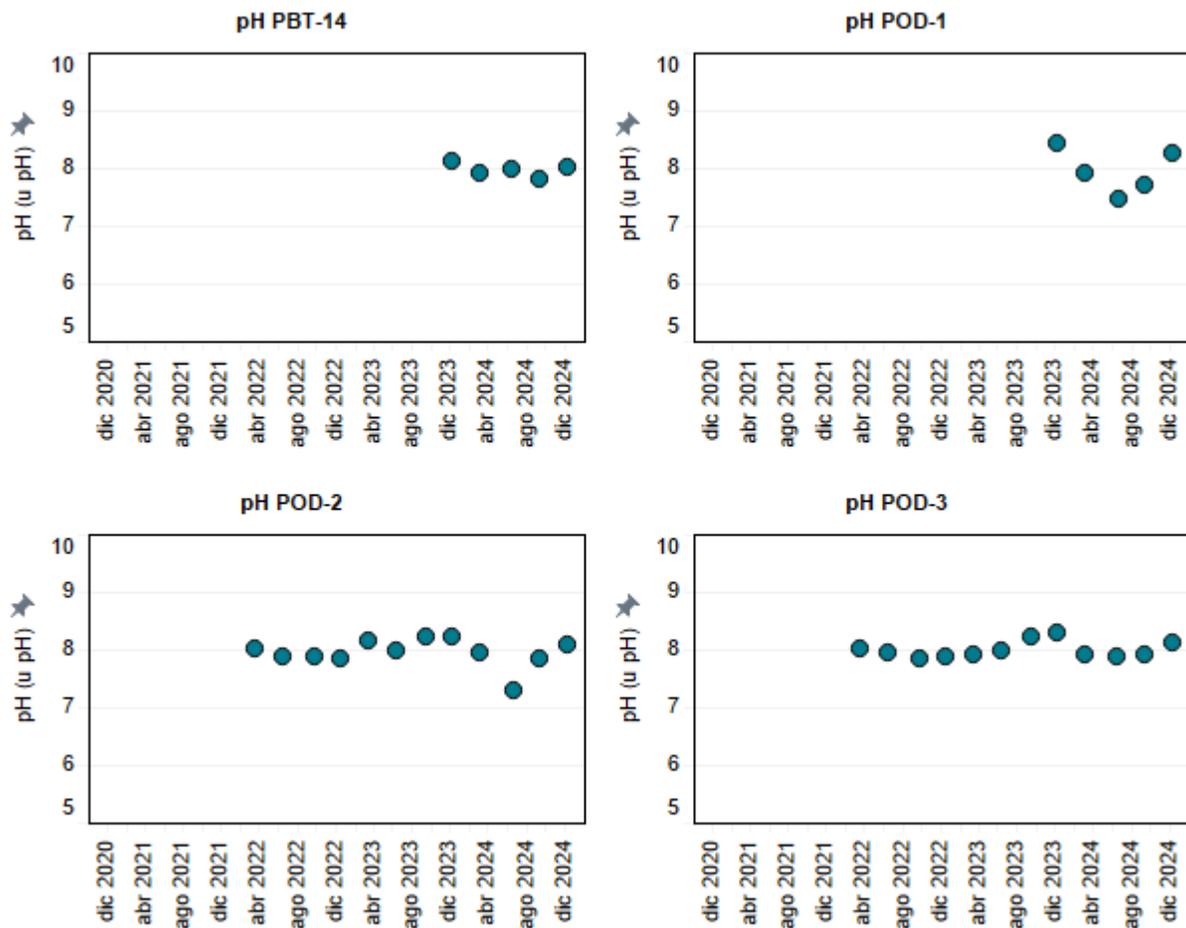


Figura 4-20: Evolución temporal de pH (unidades de pH) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.

Tabla 4-5: Mediciones fisicoquímicas de laboratorio en punteras realizadas en el segundo semestre 2024.

Parámetros	PU-31		PU-43		PU-44	
	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24
CE (µS/cm)	(*)	5.971	5.695	5.707	(**)	(**)
pH (u pH)	(*)	8,15	7,08	8,03	(**)	(**)

Parámetros	PU-45		PU-48		PU-49	
	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24
CE (µS/cm)	8.345	8.058	4.316	4.591	5.788	5.847
pH (u pH)	7,78	8,15	7,51	8,24	7,64	8,18

(*): Puntera congelada.

(**): Nivel de agua insuficiente para toma de muestras y análisis de parámetros hidroquímicos.

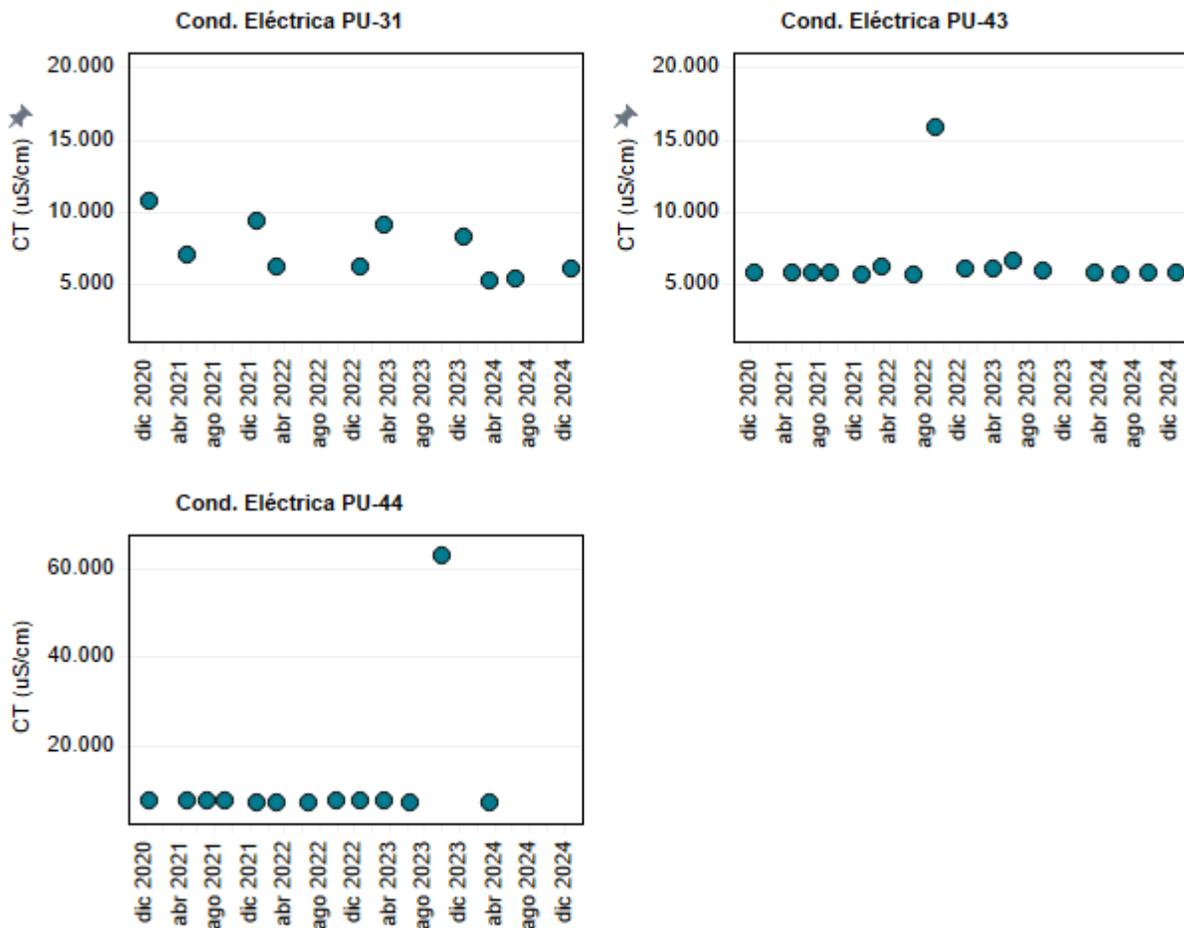


Figura 4-21: Evolución temporal de Conductividad eléctrica (µS/cm) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.

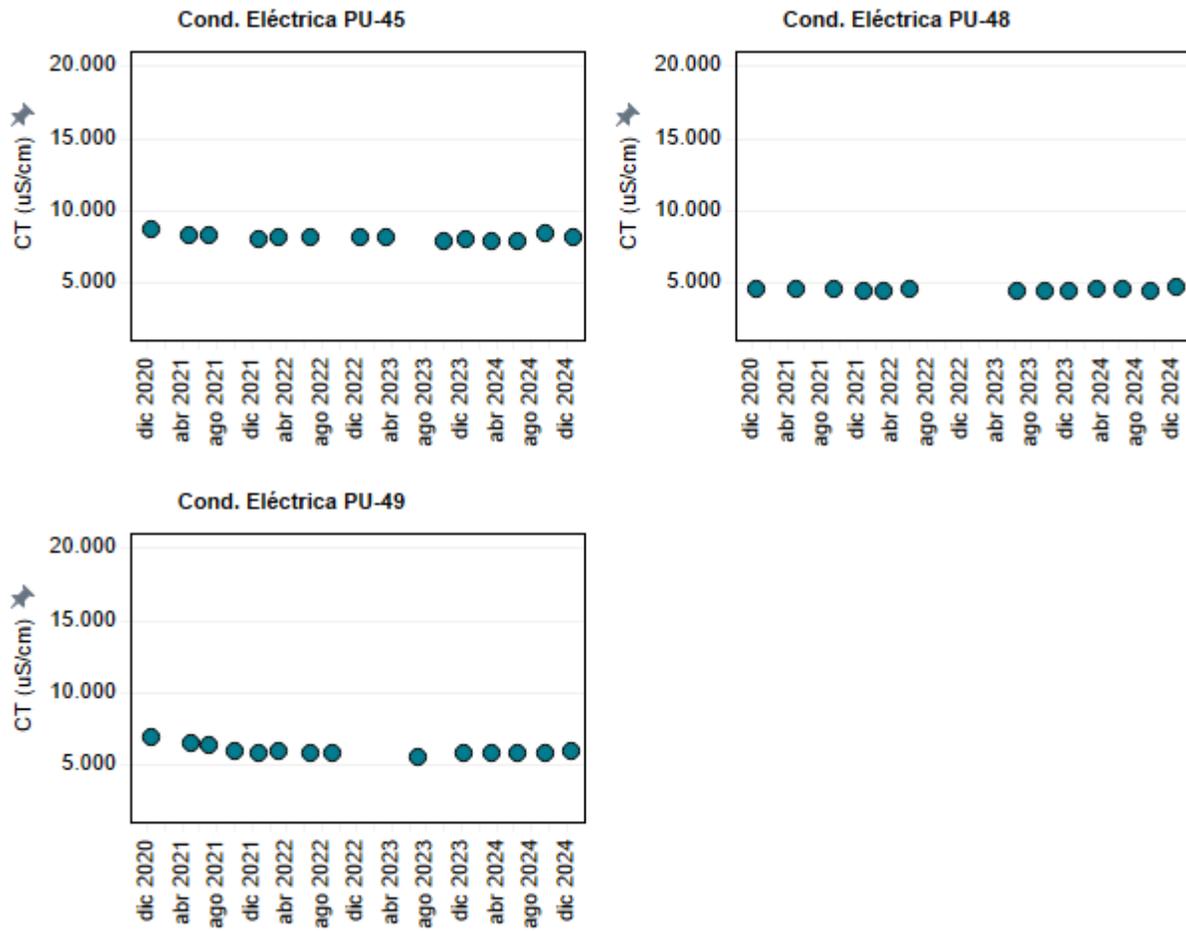


Figura 4-22: Evolución temporal de Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.

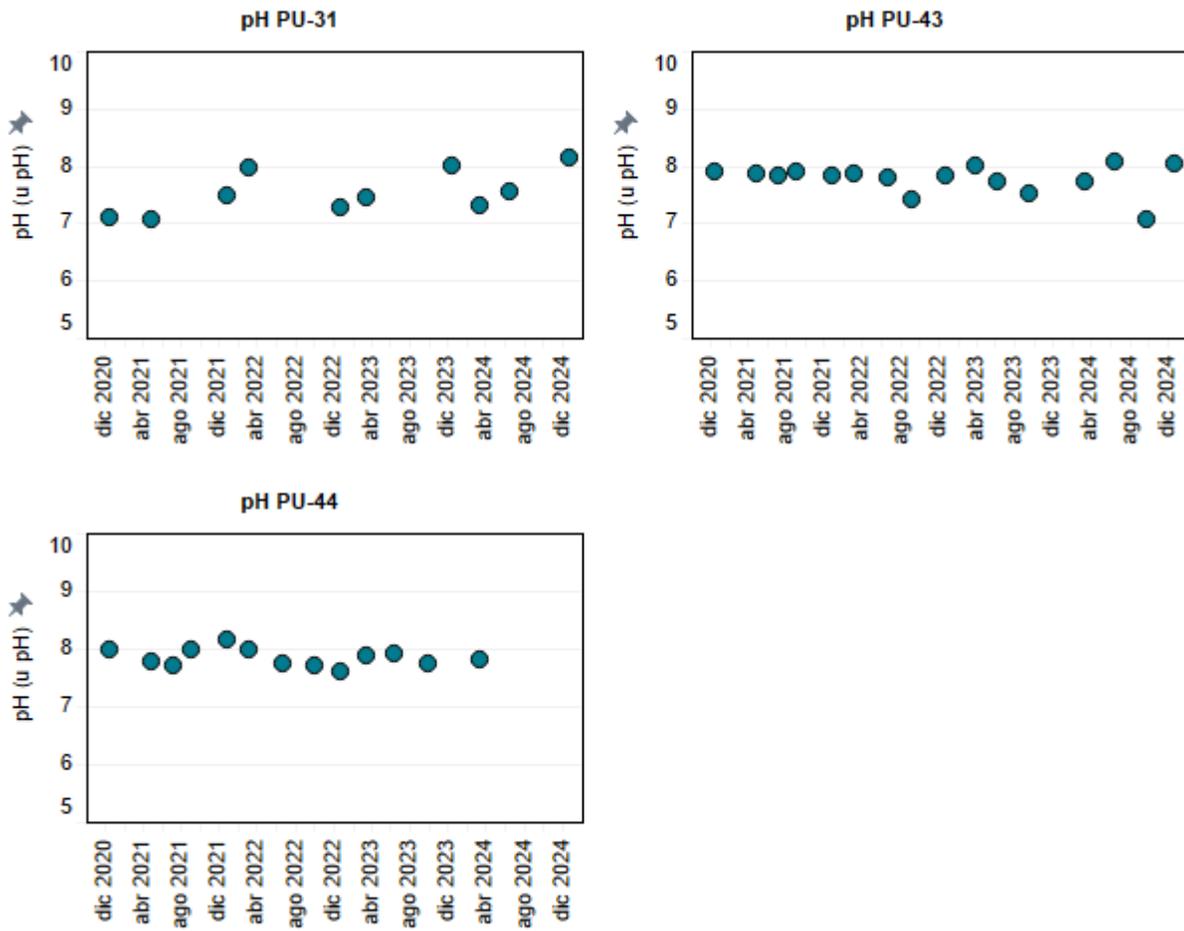


Figura 4-23: Evolución temporal de pH (unidades de pH) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.

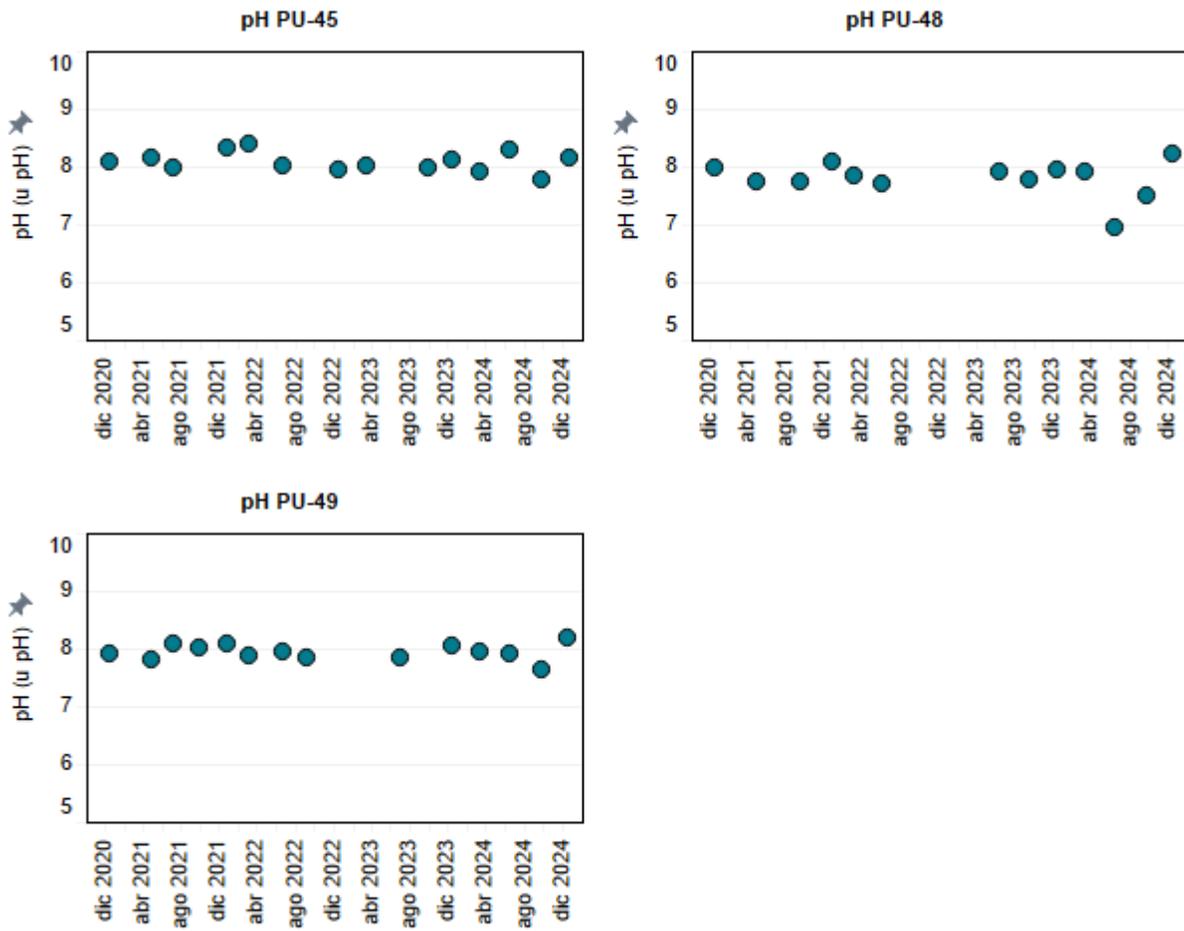


Figura 4-24: Evolución temporal de pH (unidades de pH) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.

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 4-25 a la Figura 4-72 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 segundo semestre 2024.

Parámetros	CP-11		PB-11		PB-12		P-19a		P-4a	
	Sept.24	Dic.24								
Calcio (mg/L)	178	138	42	31	53	135	143	143	194	169
Magnesio (mg/L)	45,30	39,10	19,00	20,70	42,30	45,40	39,00	43,90	47,40	53,30
Potasio (mg/L)	46,10	41,80	31,30	36,40	42,40	45,30	38,90	43,80	46,50	50,30
Sodio (mg/L)	778	724	638	646	681	751	644	742	701	776
Bicarbonato (mg/L)	126	127	111	76	124	135	126	126	118	131
Cloruro (mg/L)	1.702	1.249	1.072	674	956	1.258	972	1.245	1.004	1.294
Nitrato (mg/L)	5,53	1,56	4,84	1,41	5,01	9,50	5,71	8,88	8,63	10,90
Sulfato (mg/L)	317	305	233	385	321	308	342	303	444	273

Parámetros	B-2		B-4		PBT-14	
	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24
Calcio (mg/L)	118	143	146	125	71	122
Magnesio (mg/L)	62,80	43,60	38,20	38,40	38,00	36,80
Potasio (mg/L)	31,60	44,60	67,50	46,40	29,40	43,50
Sodio (mg/L)	1.005	723	471	770	800	734
Bicarbonato (mg/L)	128	131	72	63	122	130
Cloruro (mg/L)	1.323	1.270	974	1.235	1.179	1.211
Nitrato (mg/L)	5,19	101,00	0,88	76,20	8,33	9,03
Sulfato (mg/L)	357	370	412	340	338	334

Parámetros	POD-1		POD-2		POD-3	
	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24
Calcio (mg/L)	610	747	108	132	85	140
Magnesio (mg/L)	92,30	123,00	53,70	39,60	39,50	42,80
Potasio (mg/L)	62,90	71,00	29,00	43,80	28,80	50,20
Sodio (mg/L)	2.522	3.534	1.008	708	789	757
Bicarbonato (mg/L)	419	411	138	132	131	140
Cloruro (mg/L)	5.278	6.011	1.211	1.183	1.190	1.203
Nitrato (mg/L)	0,40	2,64	4,69	81,20	4,86	84,00
Sulfato (mg/L)	831	847	379	378	428	389

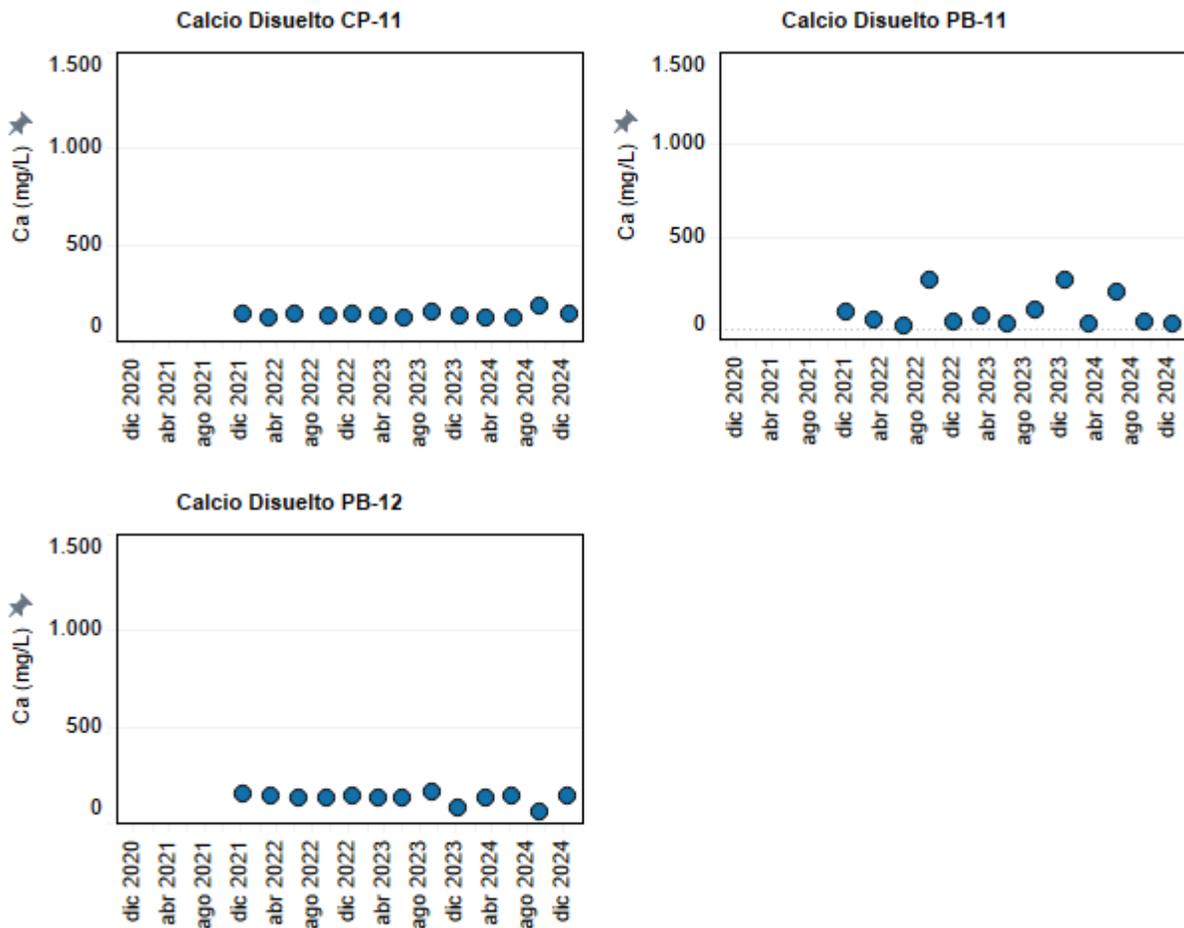


Figura 4-25: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/L) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.

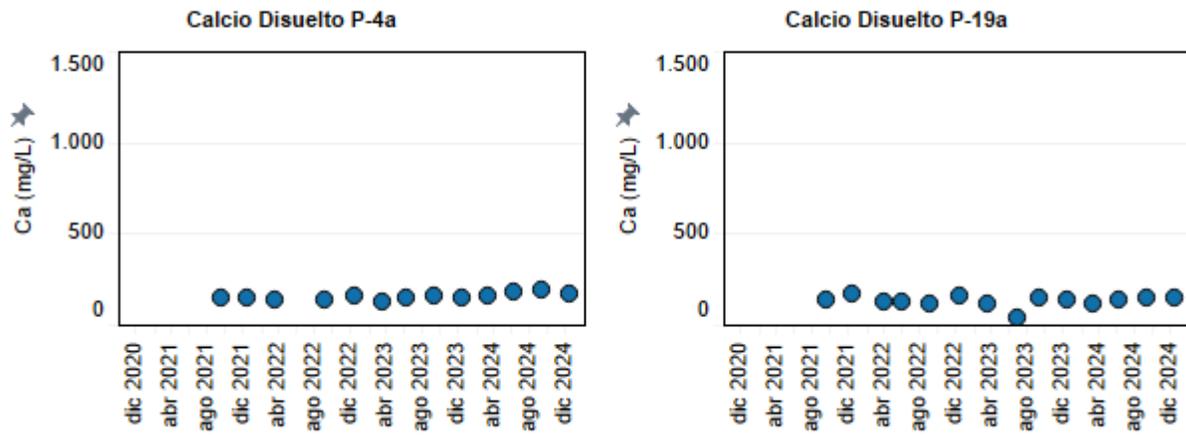


Figura 4-26: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/L) en los puntos P-4a y P-19a.

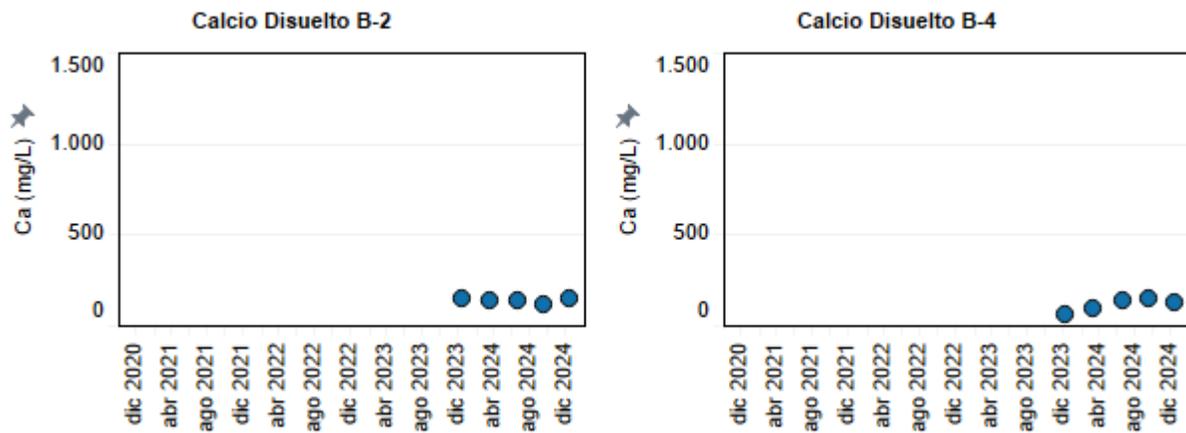


Figura 4-27: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/L) en los puntos B-2 y B-4.

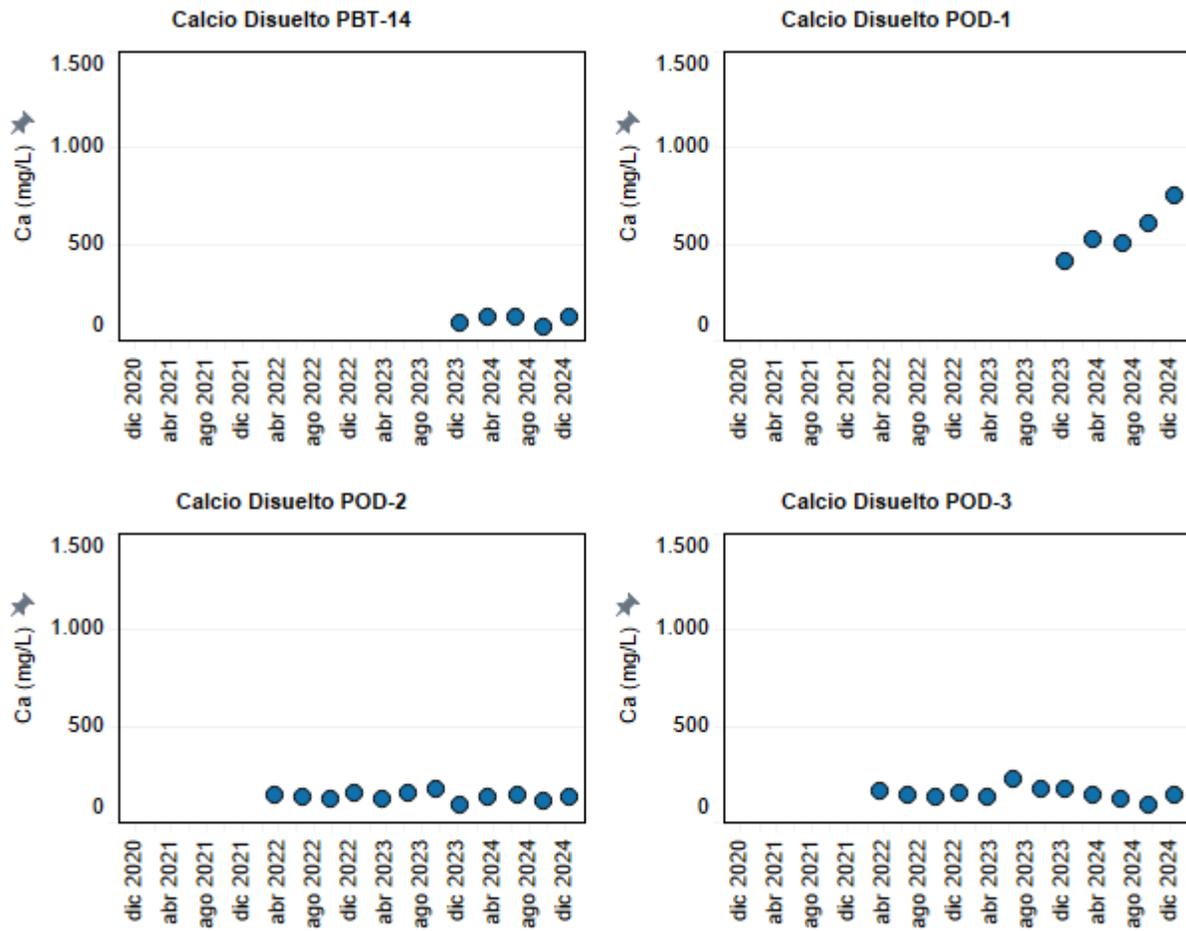


Figura 4-28: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/L) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.

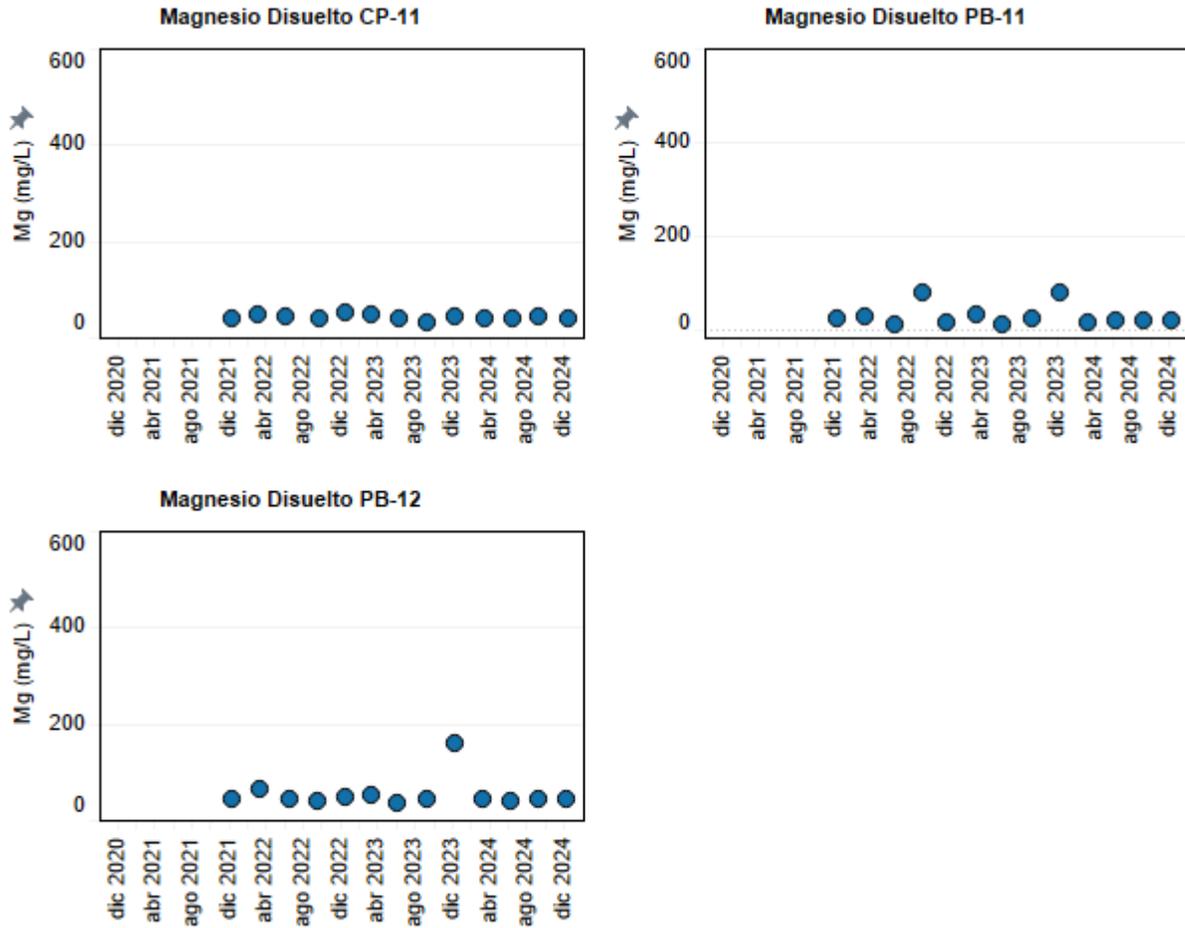


Figura 4-29: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/L) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.

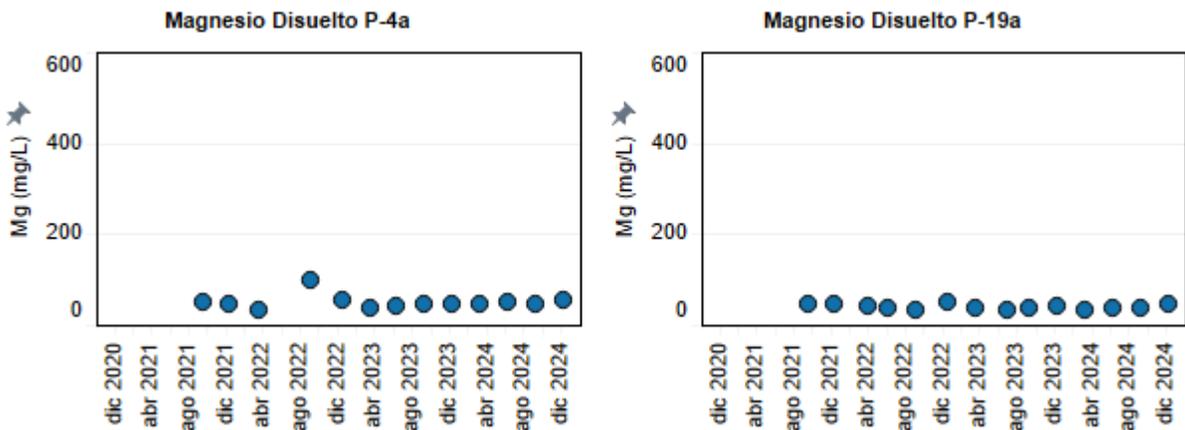


Figura 4-30: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/L) en los puntos P-4a y P-19a.

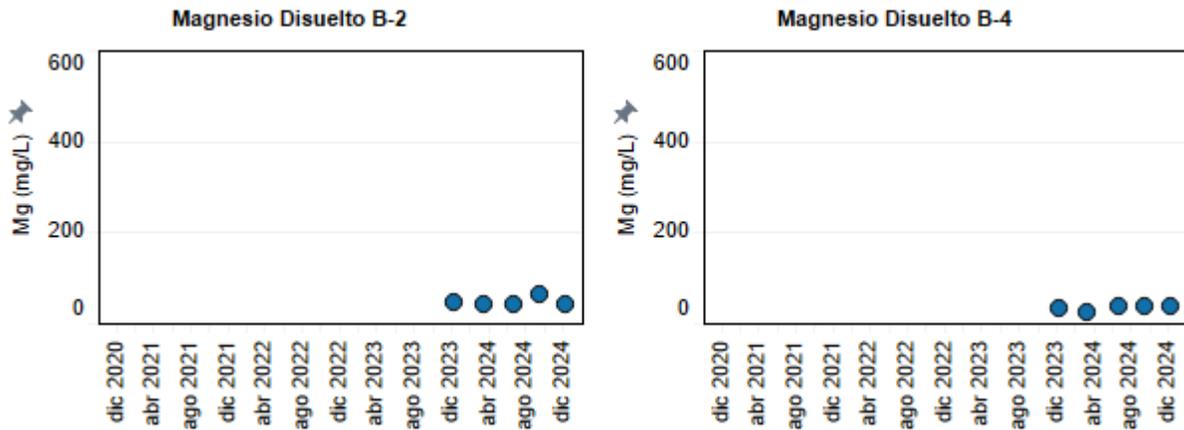


Figura 4-31: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/L) en los puntos B-2 y B-4.

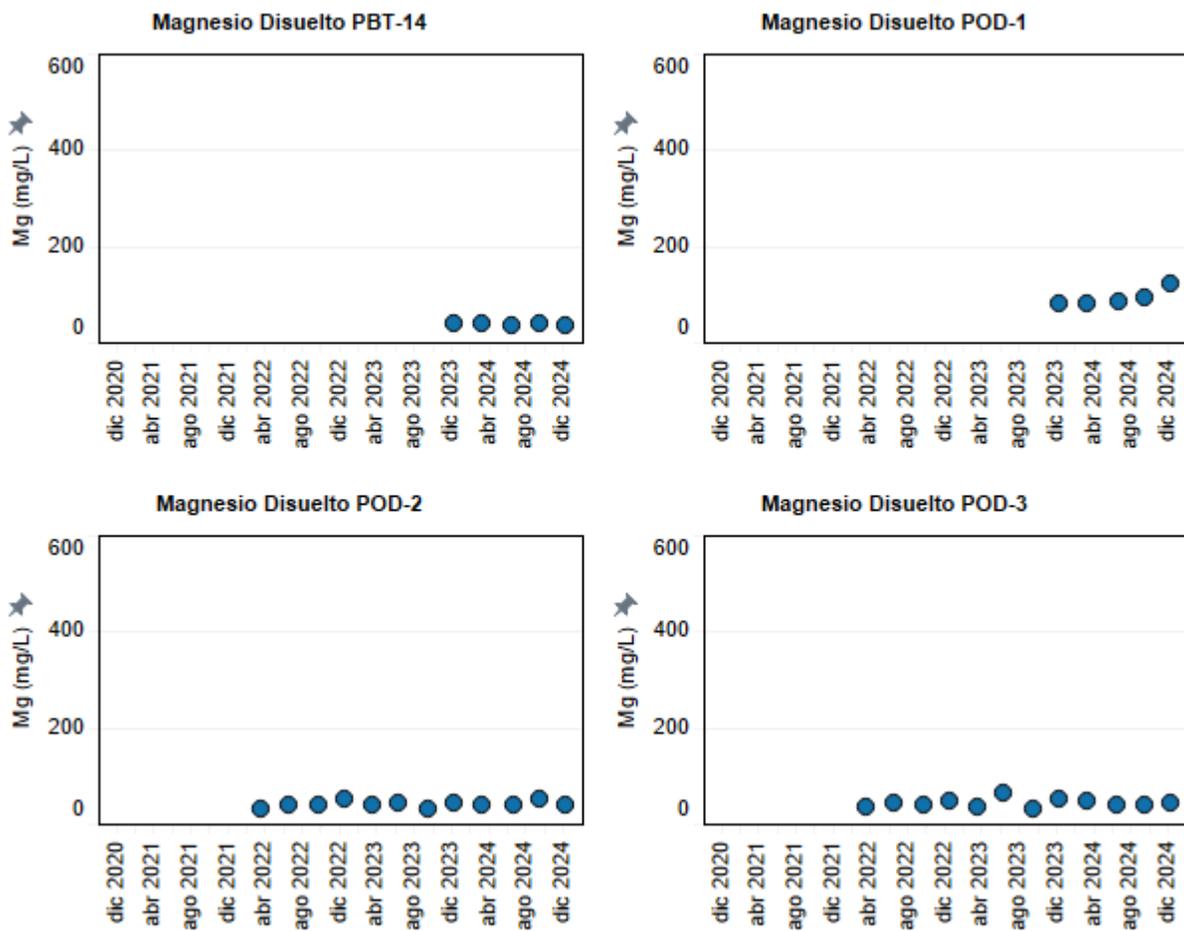


Figura 4-32: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/L) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.

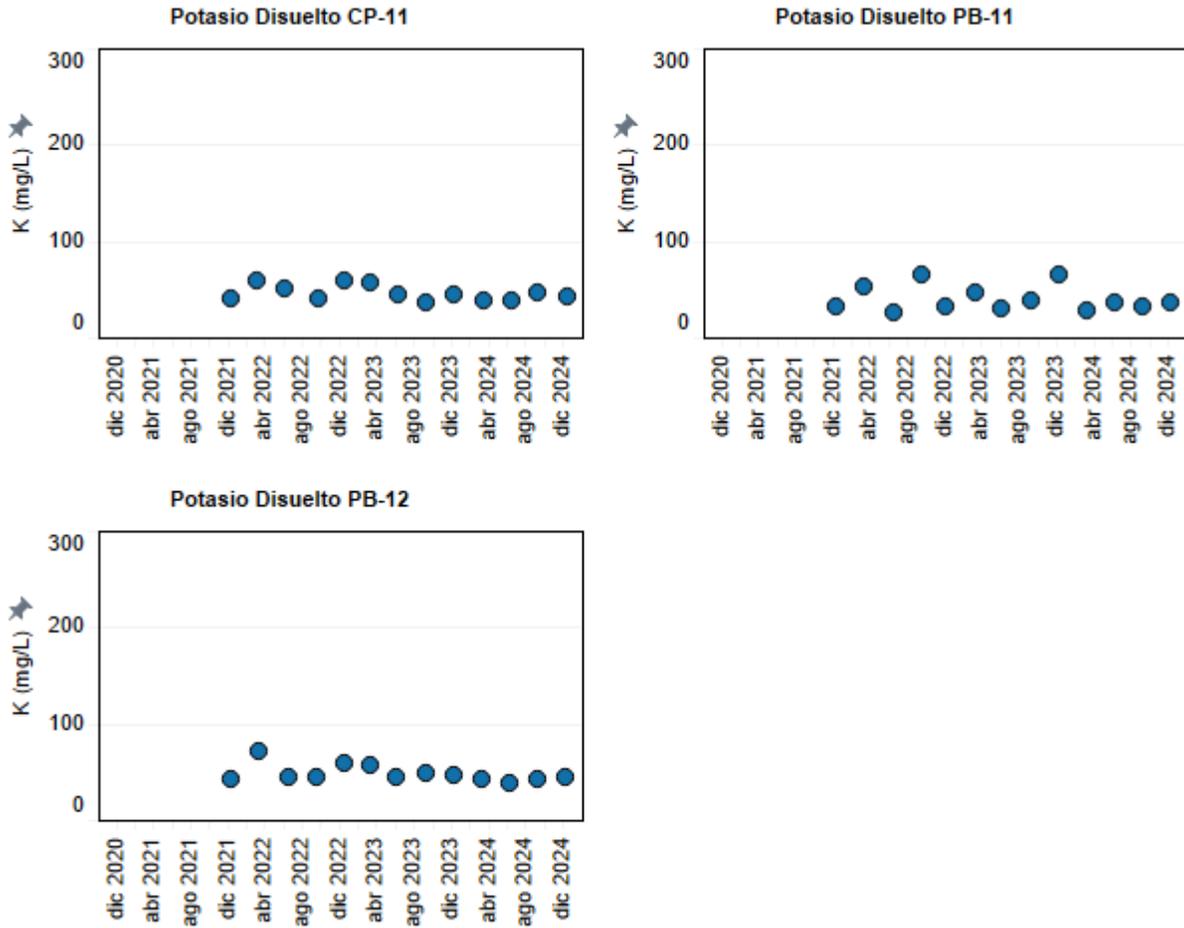


Figura 4-33: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/L) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.

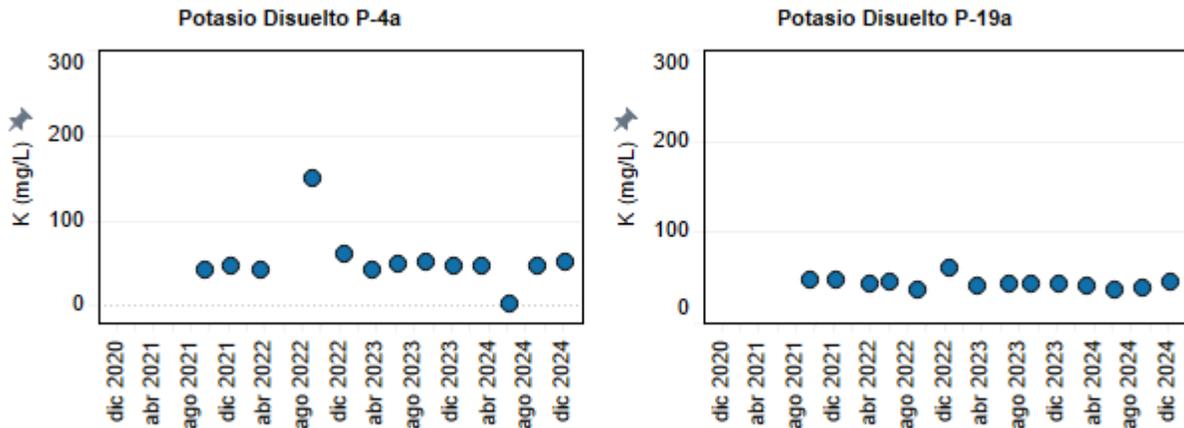


Figura 4-34: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/L) en los puntos P-4a y P-19a.

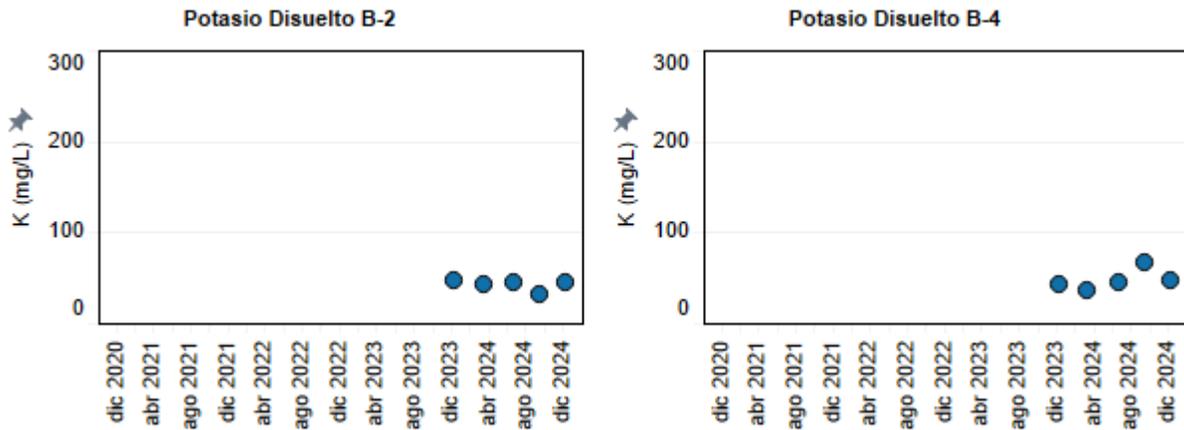


Figura 4-35: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/L) en los puntos B-2 y B-4.

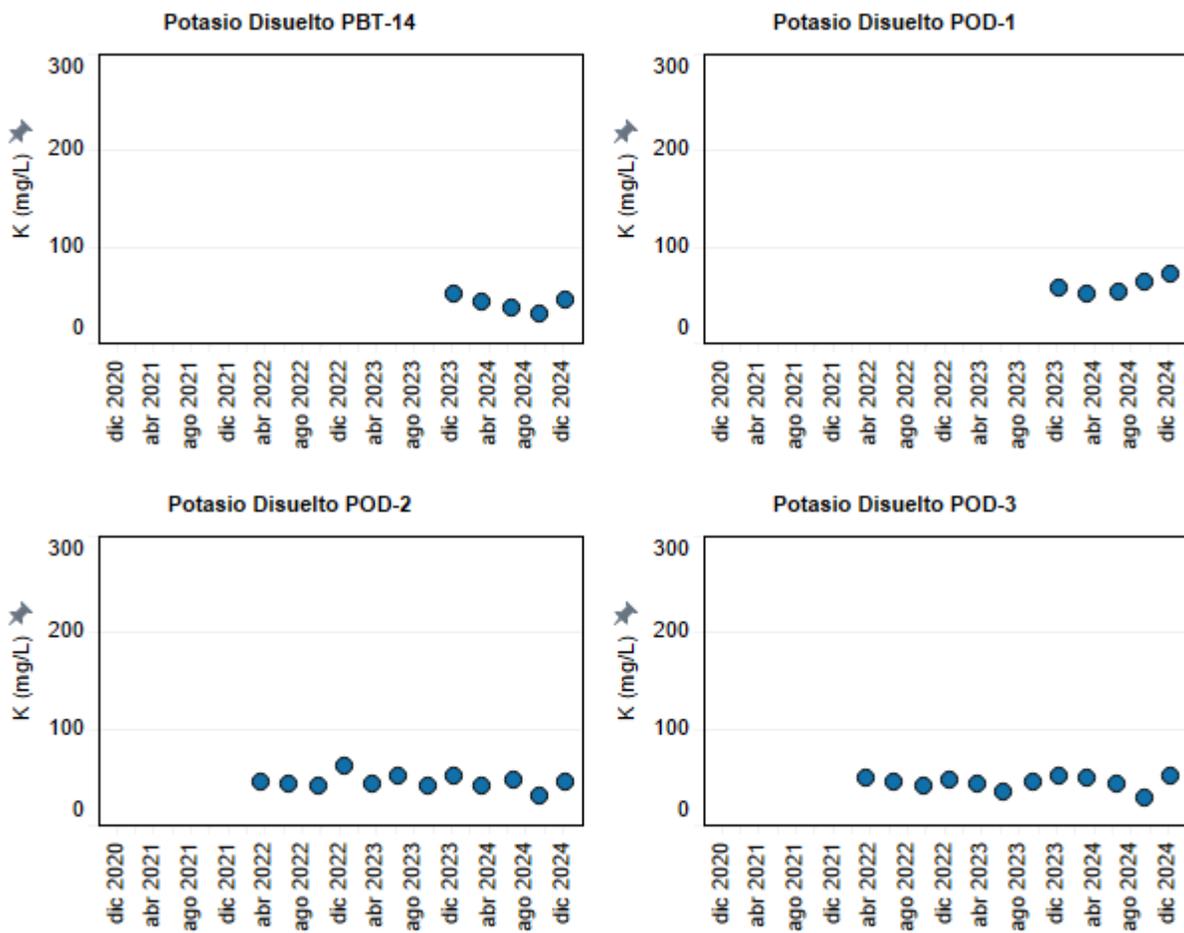


Figura 4-36: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/L) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.

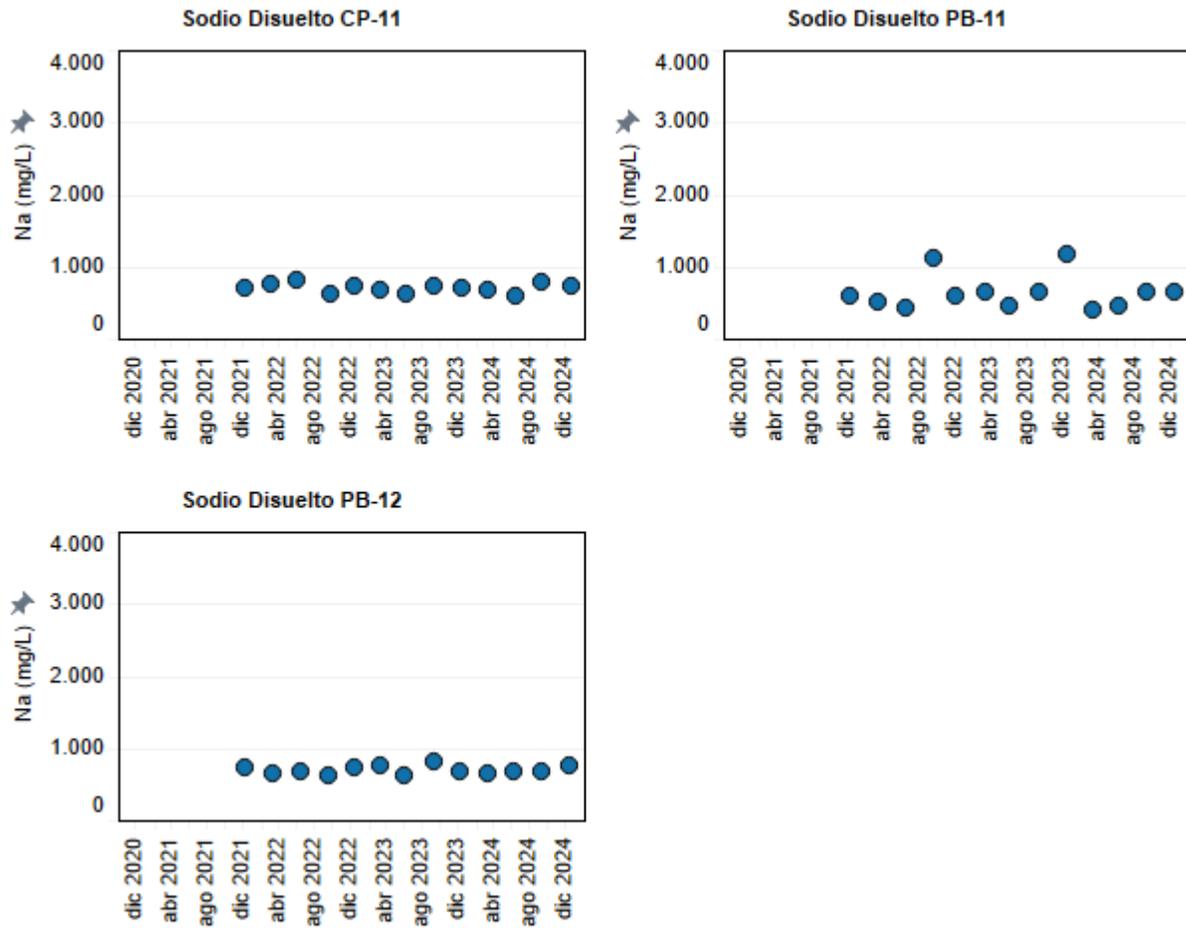


Figura 4-37: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/L) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.

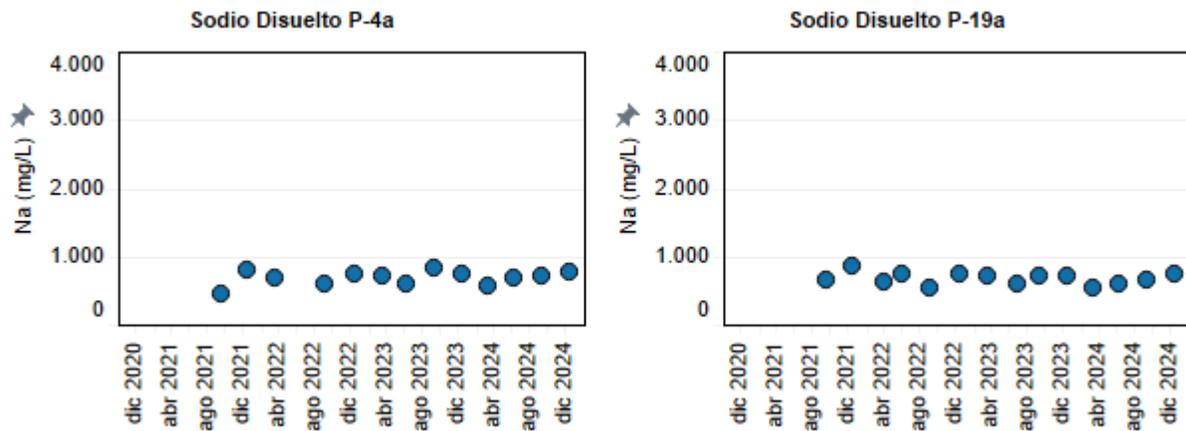


Figura 4-38: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/L) en los puntos P-4a y P-19a.

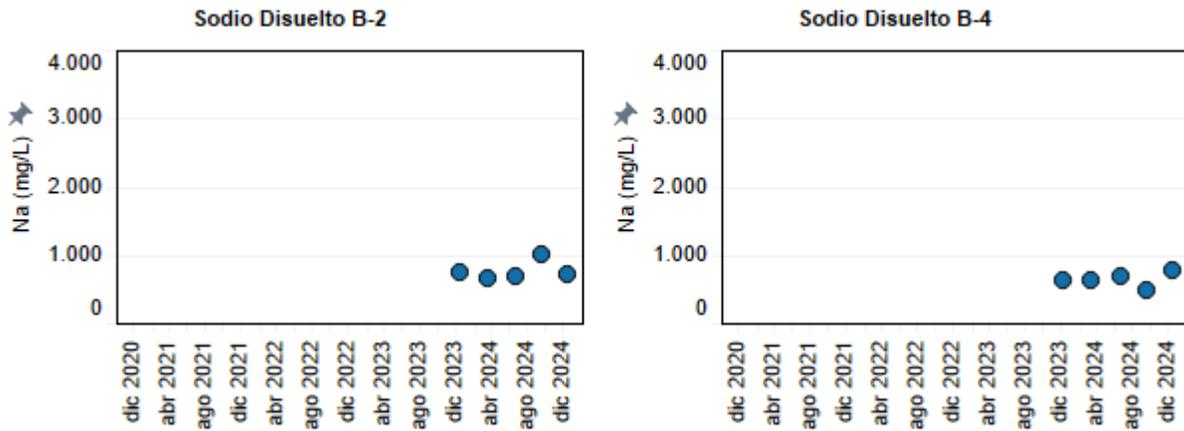


Figura 4-39: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/L) en los puntos B-2 y B-4.

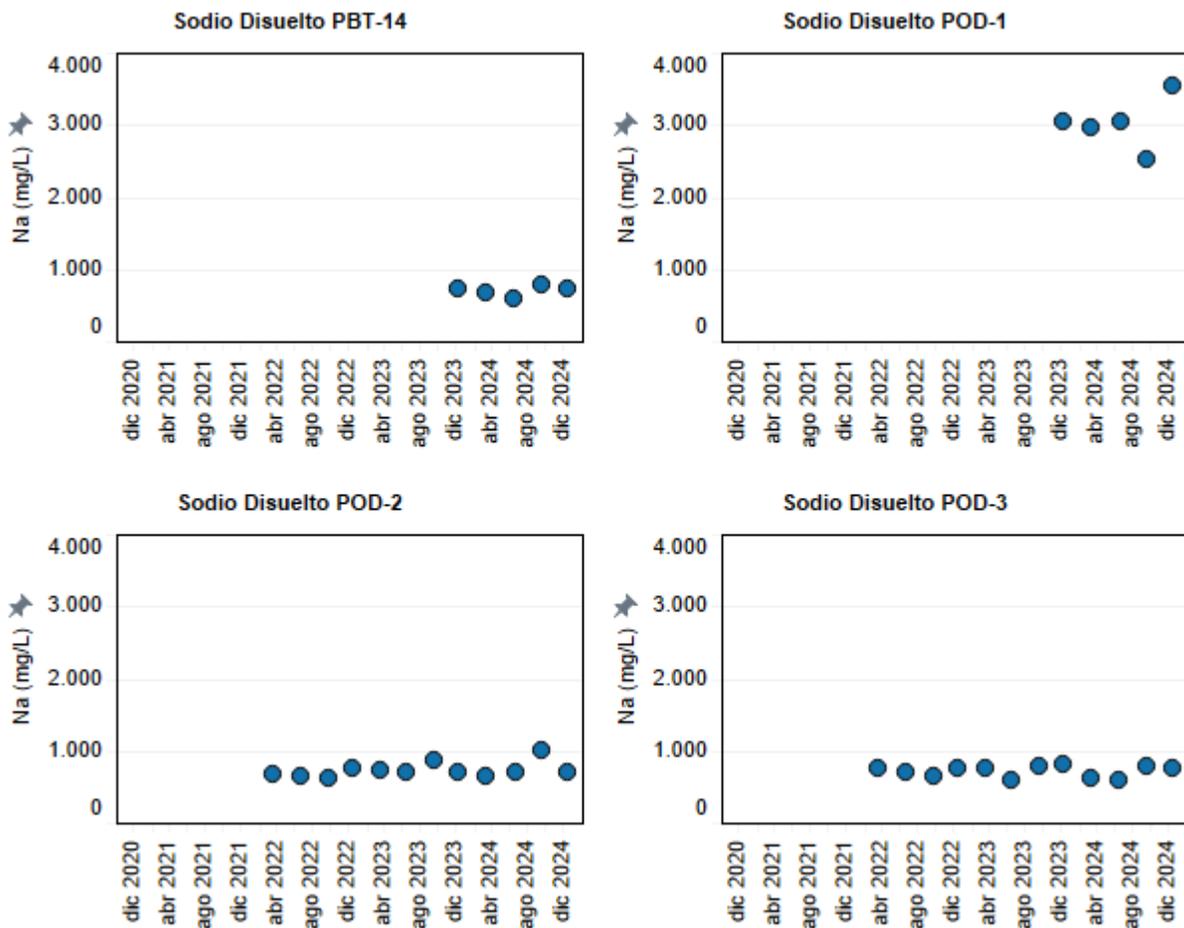


Figura 4-40: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/L) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.

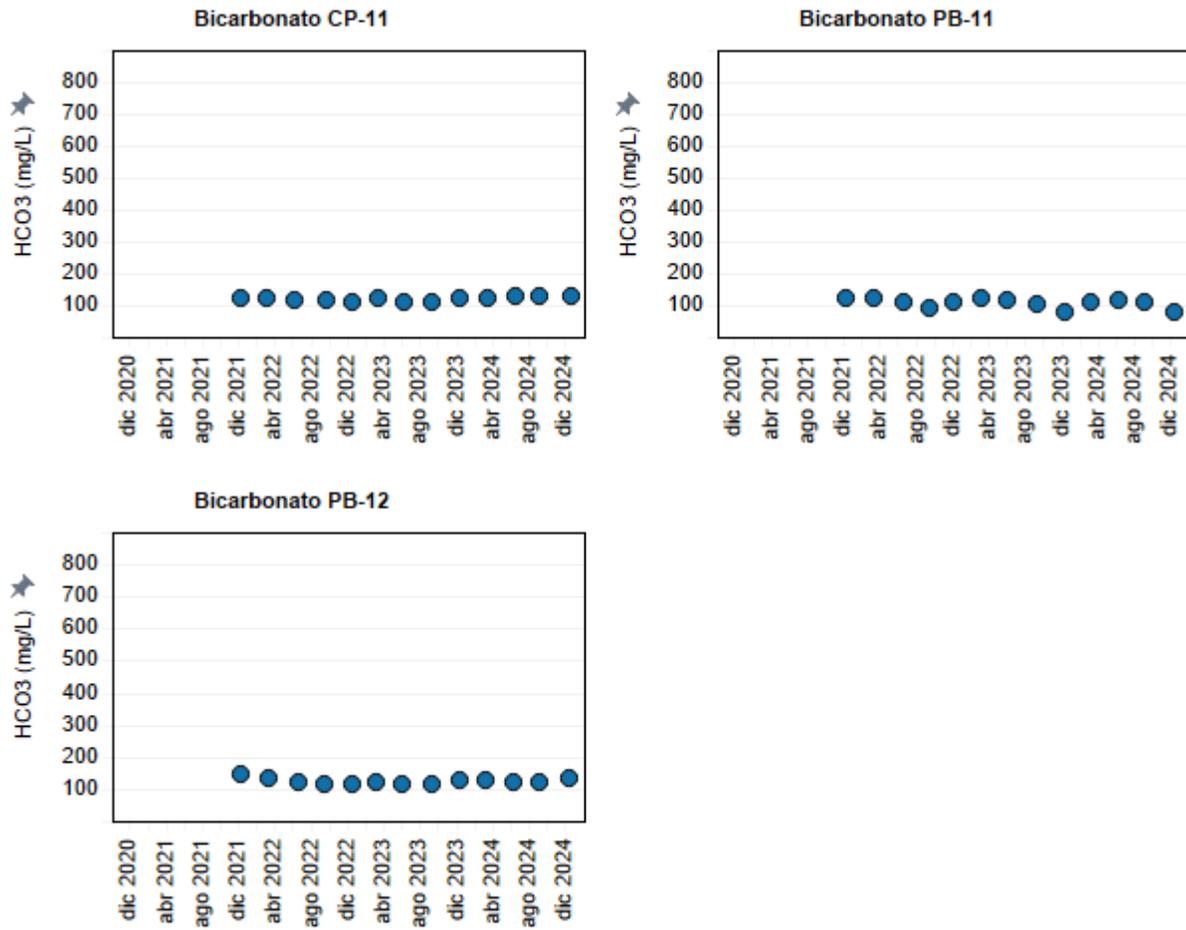


Figura 4-41: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/L) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.

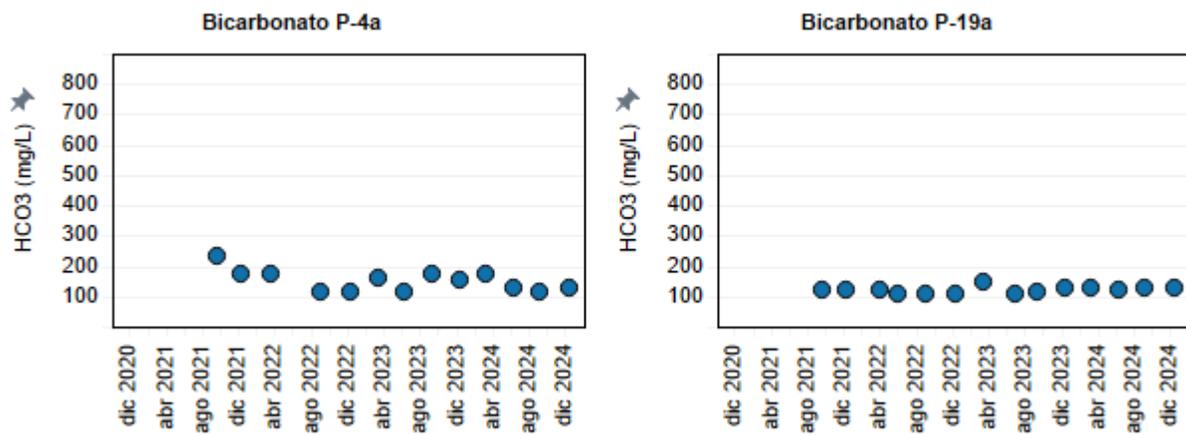


Figura 4-42: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/L) en los puntos P-4a y P-19a.

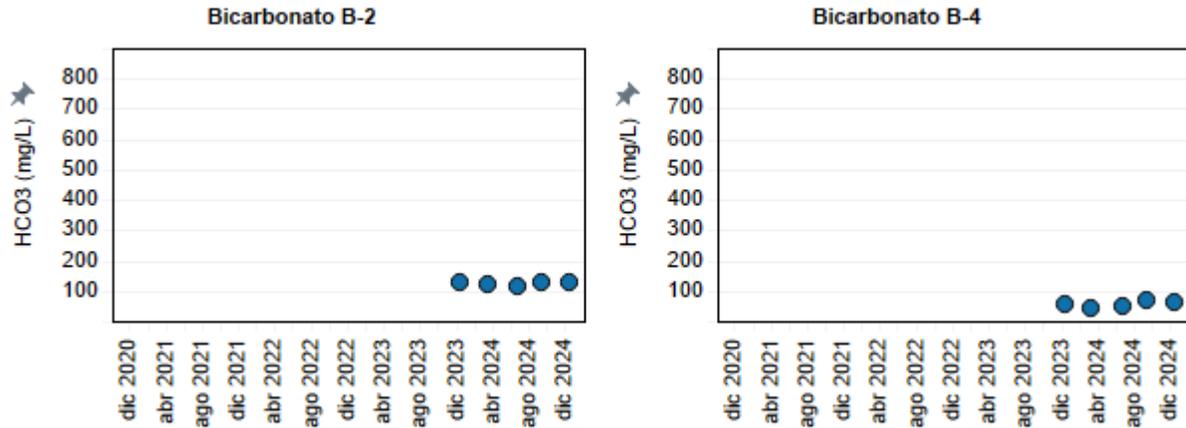


Figura 4-43: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/L) en los puntos B-2 y B-4.

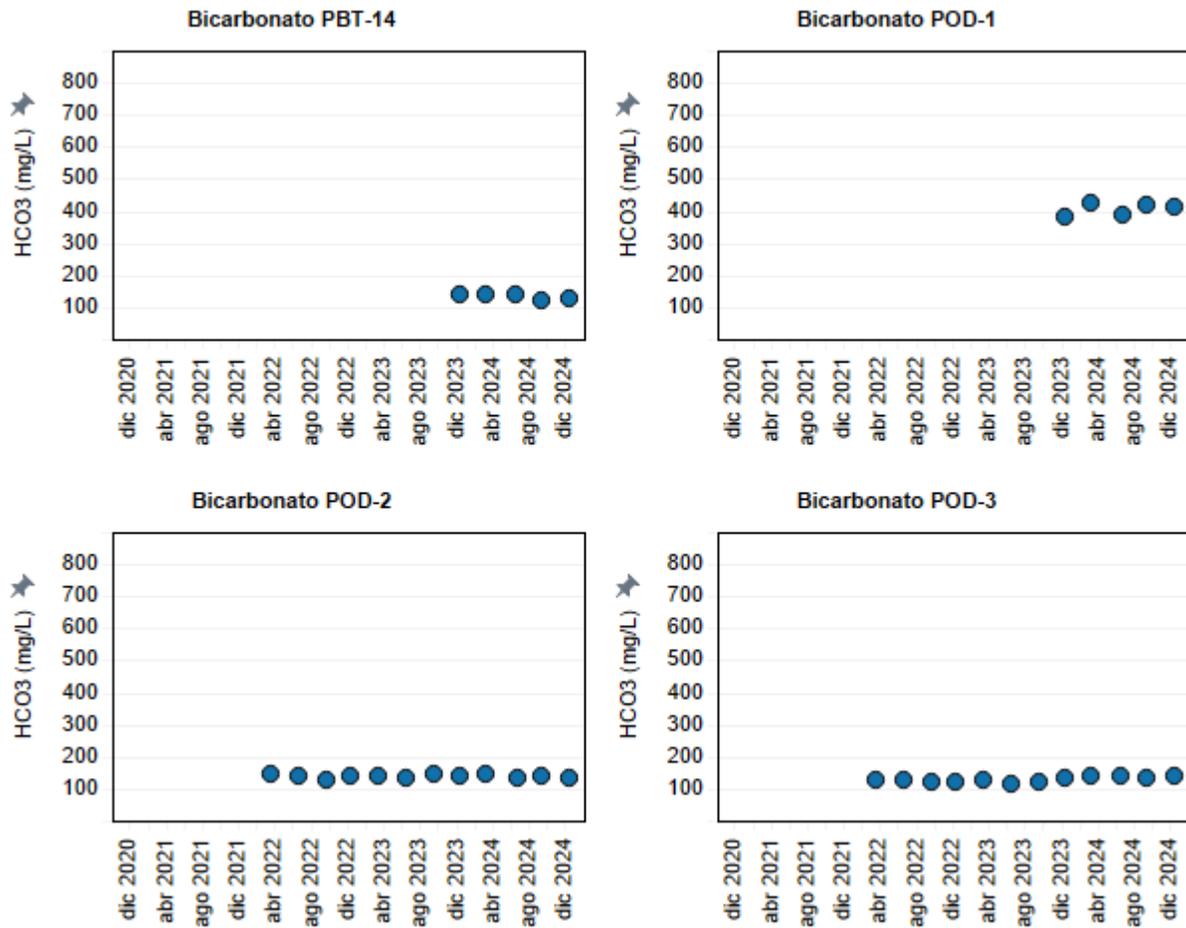


Figura 4-44: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/L) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.

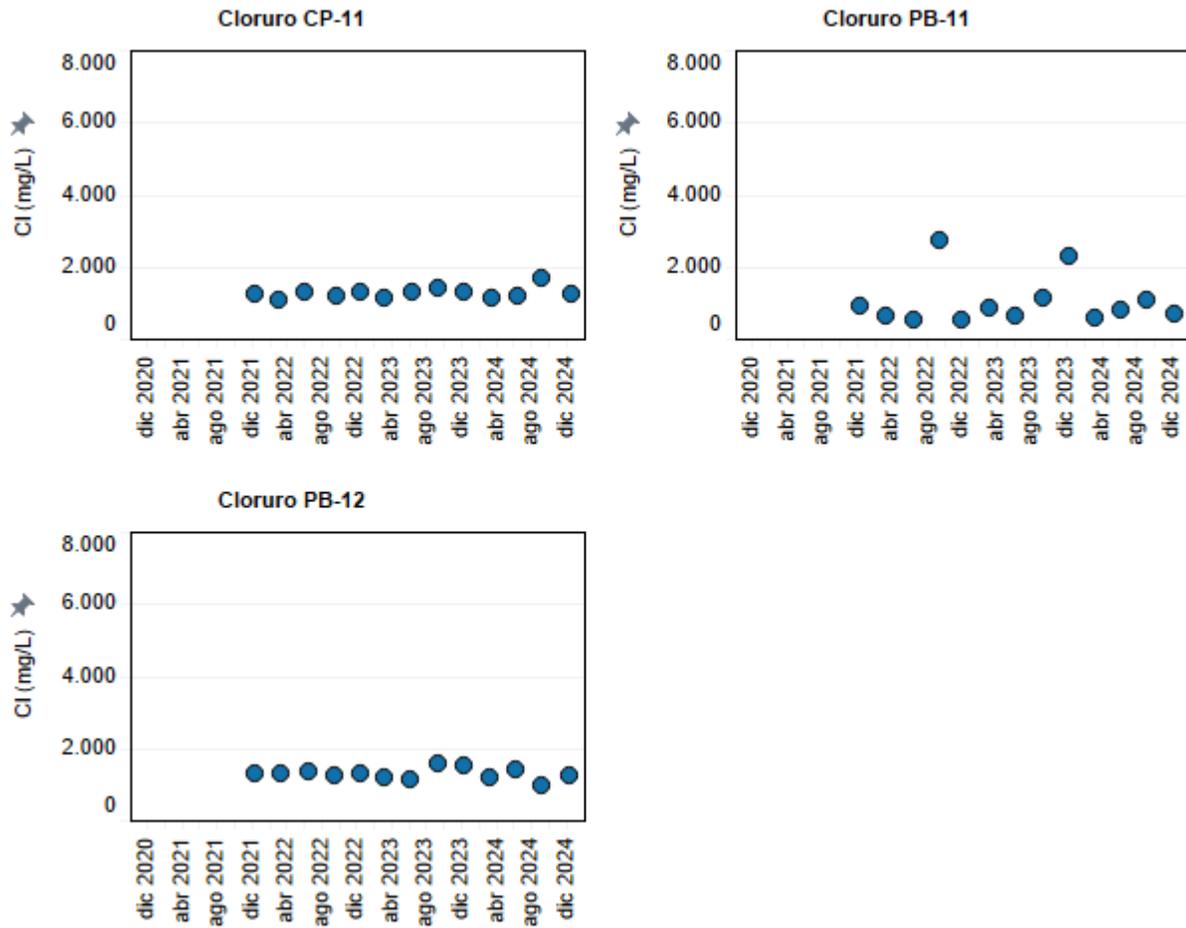


Figura 4-45: Evolución temporal de Cloruro (mg/L) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.

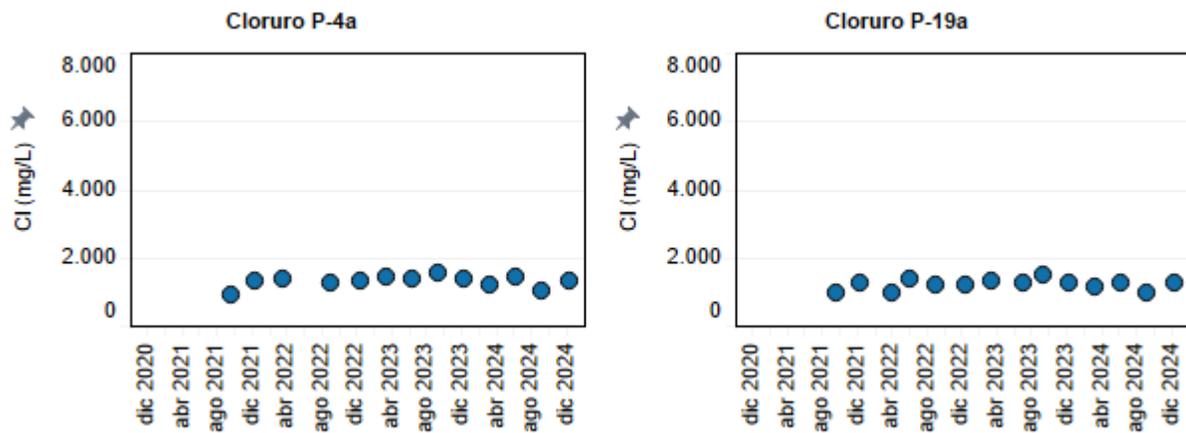


Figura 4-46: Evolución temporal de Cloruro (mg/L) en los puntos P-4a y P-19a.

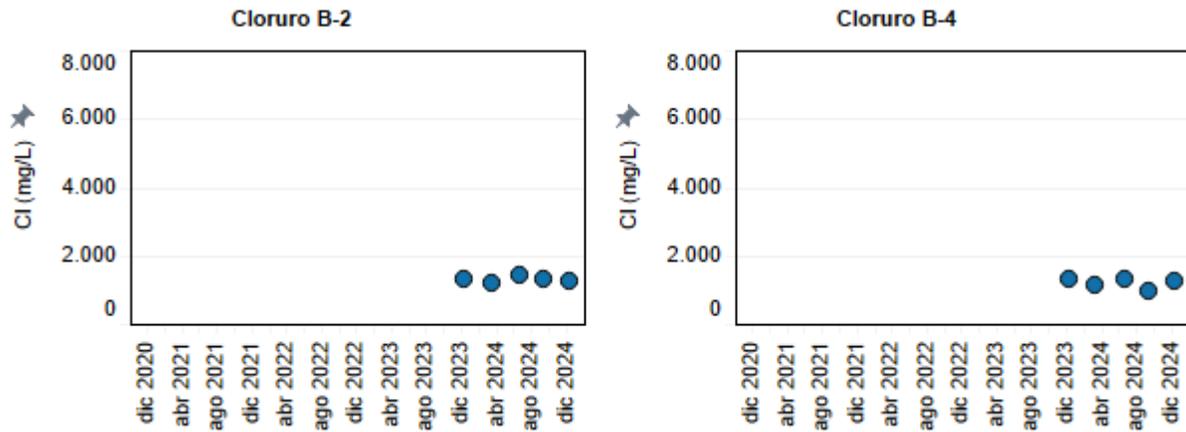


Figura 4-47: Evolución temporal de Cloruro (mg/L) en los puntos B-2 y B-4.

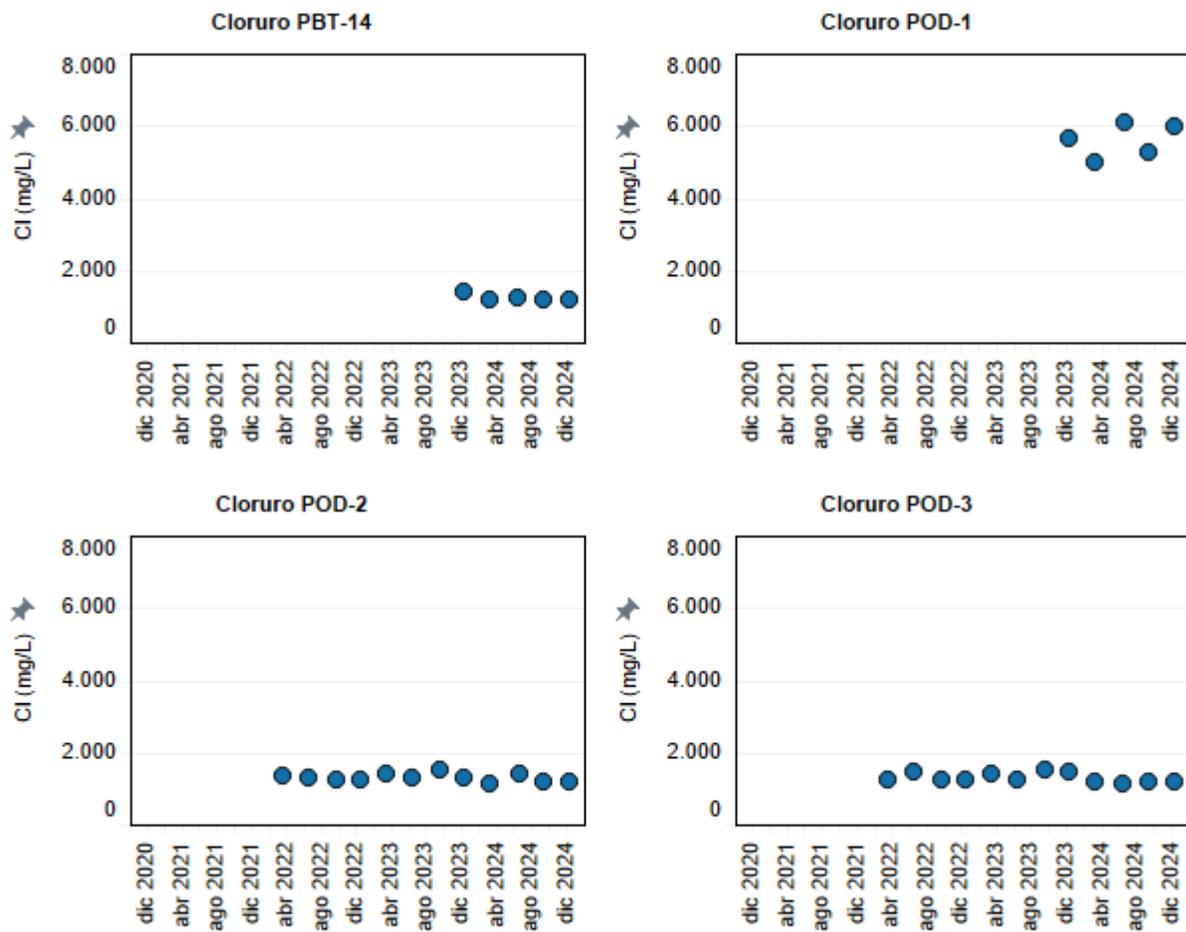


Figura 4-48: Evolución temporal de Cloruro (mg/L) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.

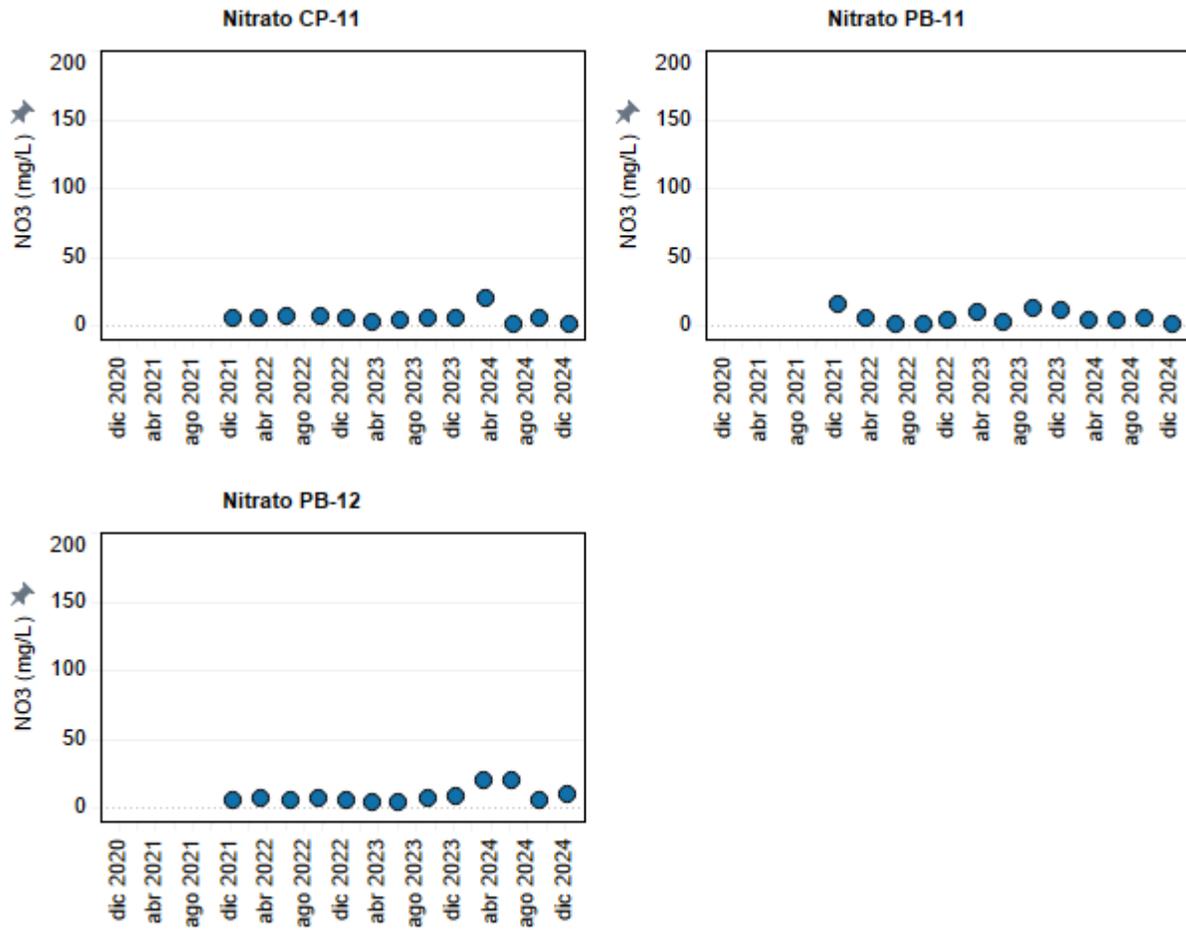


Figura 4-49: Evolución temporal de Nitrato (mg/L) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.

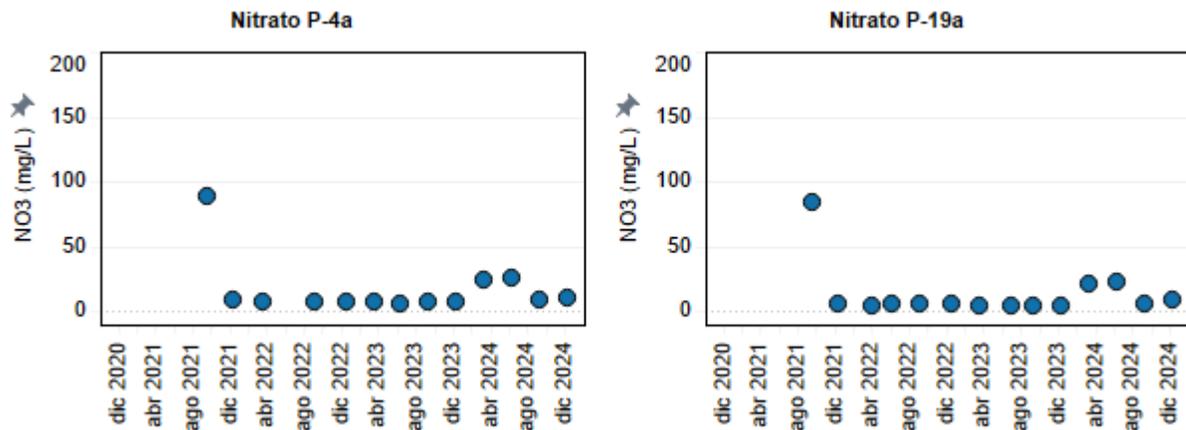


Figura 4-50: Evolución temporal de Nitrato(mg/L) en los puntos P-4a y P-19a.

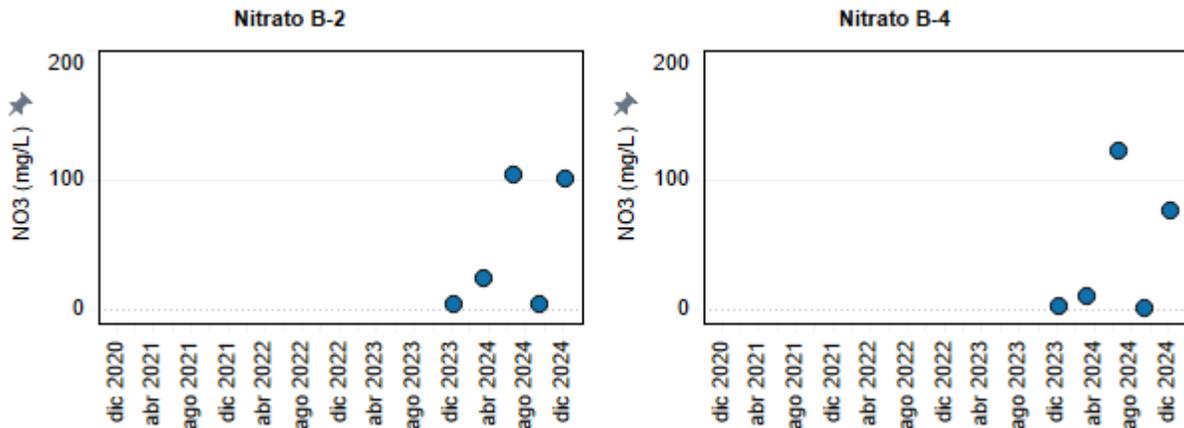


Figura 4-51: Evolución temporal de Nitrato(mg/L) en los puntos B-2 y B-4.

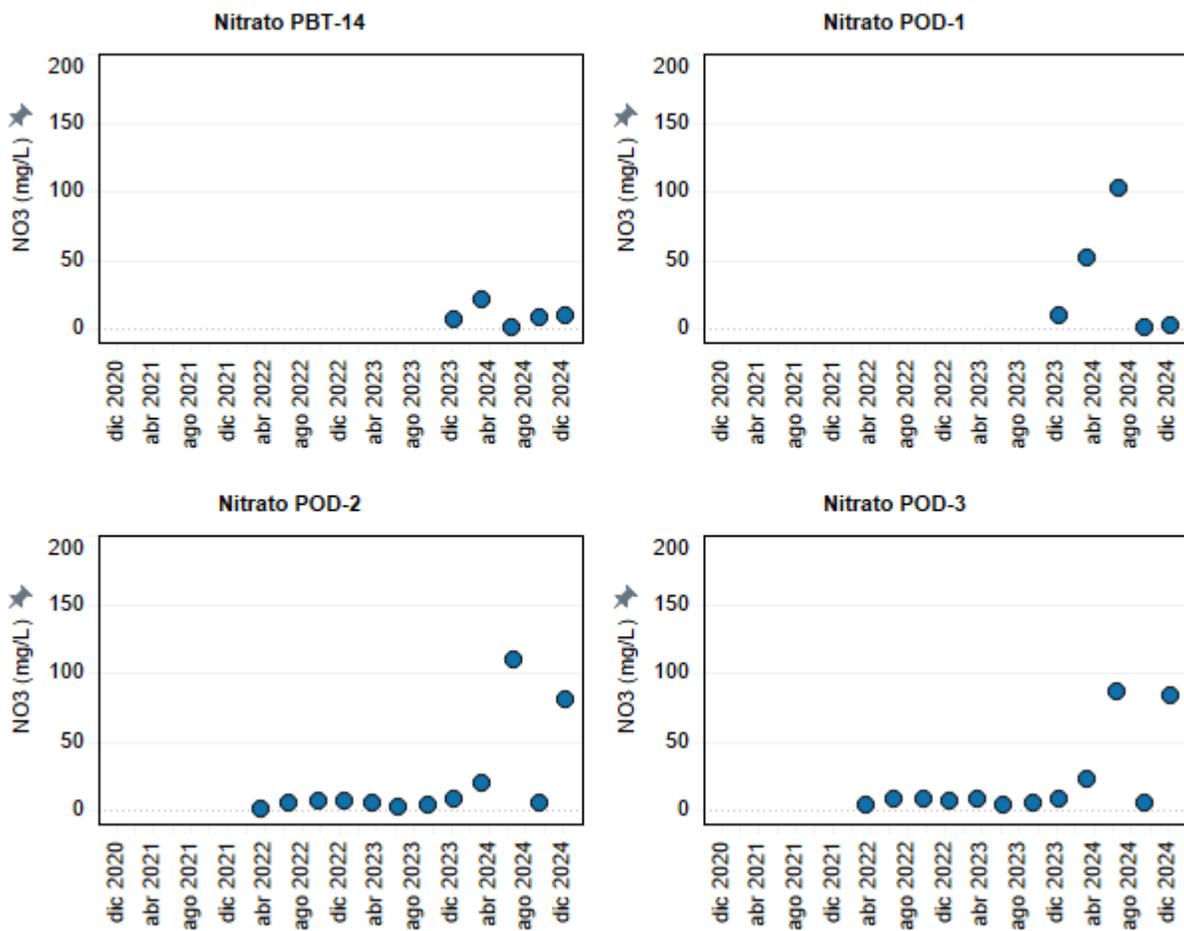


Figura 4-52: Evolución temporal de Nitrato(mg/L) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.

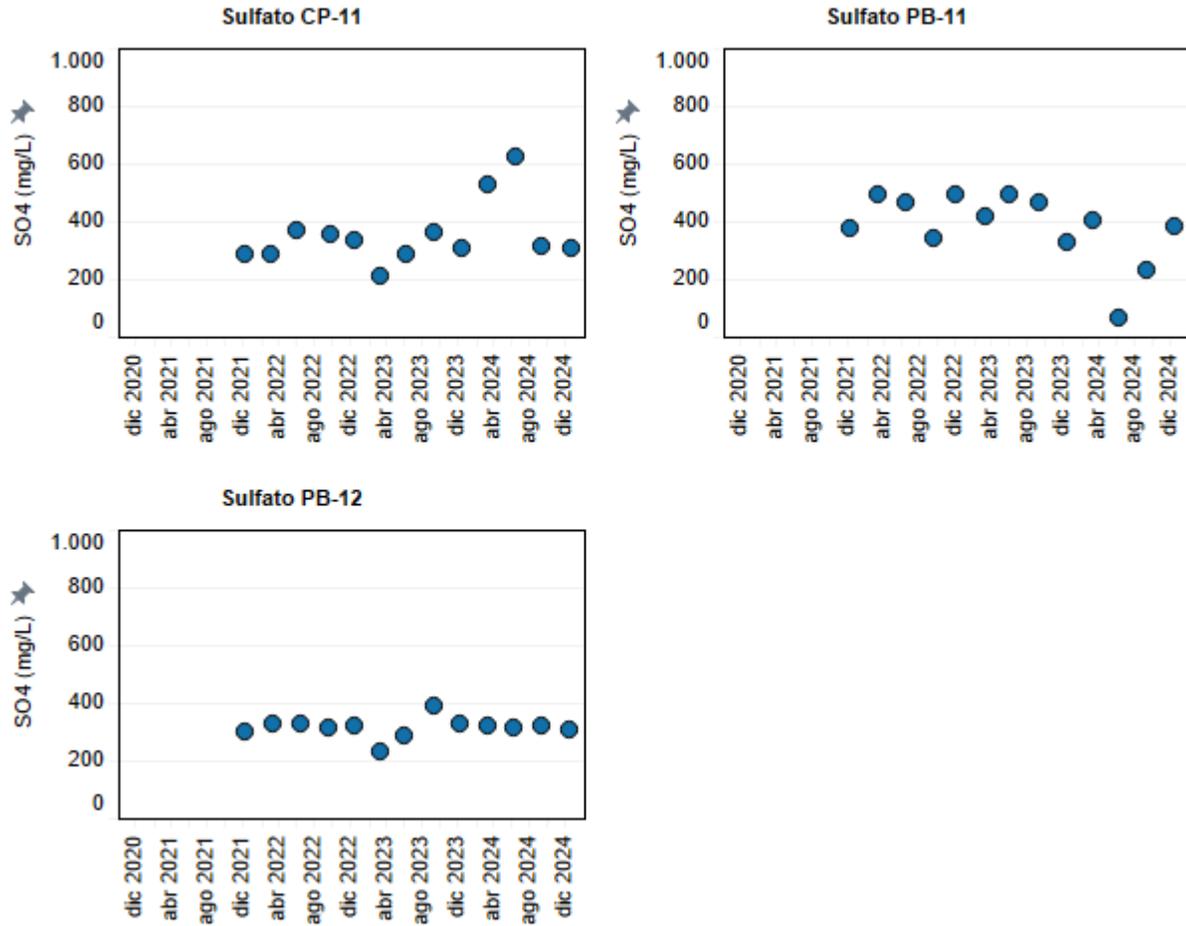


Figura 4-53: Evolución temporal de Sulfato (mg/L) en los puntos CP-11, PB-11 y PB-12.

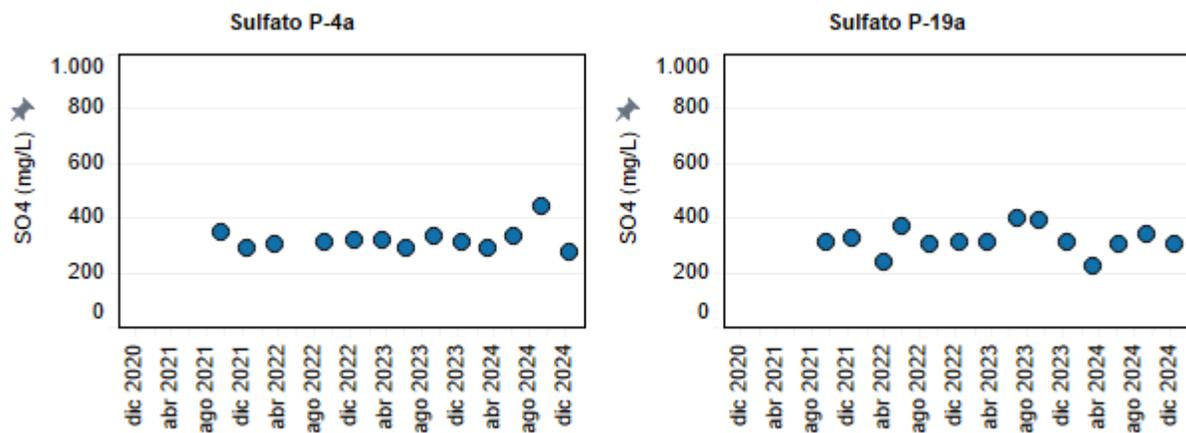


Figura 4-54: Evolución temporal de Sulfato (mg/L) en los puntos P-4a y P-19a.

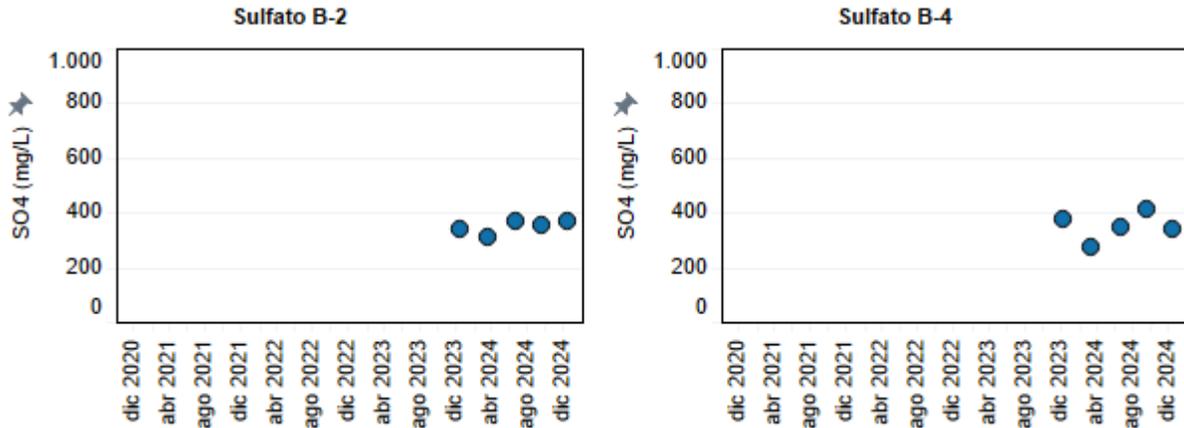


Figura 4-55: Evolución temporal de Sulfato (mg/L) en los puntos B-2 y B-4.

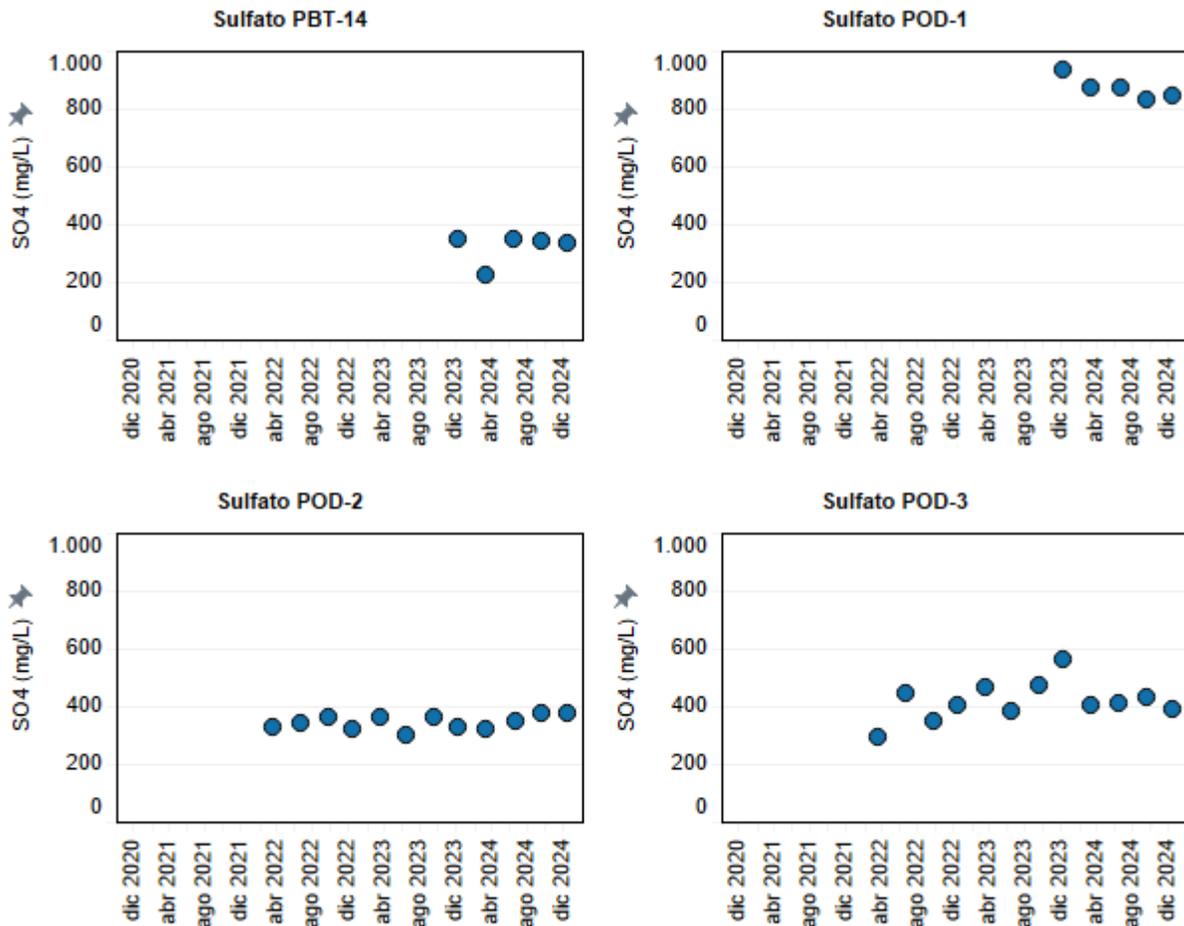


Figura 4-56: Evolución temporal de Sulfato (mg/L) en los puntos PBT-14, POD-1, POD-2 y POD-3.

Tabla 4-7: Mediciones de cationes y aniones disueltos en punteras realizadas en el segundo semestre 2024.

Parámetros	PU-31		PU-43		PU-44	
	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24
Calcio (mg/L)	(*)	121	210	137	(**)	(**)
Magnesio (mg/L)	(*)	65,20	59,50	42,40	(**)	(**)
Potasio (mg/L)	(*)	78,40	82,00	58,50	(**)	(**)
Sodio (mg/L)	(*)	884	865	781	(**)	(**)
Bicarbonato (mg/L)	(*)	141	115	118	(**)	(**)
Cloruro (mg/L)	(*)	1.741	1.669	1.685	(**)	(**)
Nitrato (mg/L)	(*)	<0,5	4,30	3,60	(**)	(**)
Sulfato (mg/L)	(*)	417	349	342	(**)	(**)

Parámetros	PU-45		PU-48		PU-49	
	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24	Sept.24	Dic.24
Calcio (mg/L)	121	101	156	171	175	170
Magnesio (mg/L)	79,70	93,20	42,40	52,10	56,70	73,80
Potasio (mg/L)	119,00	95,00	40,60	51,60	57,60	72,40
Sodio (mg/L)	1.405	1.334	653	870	876	1.127
Bicarbonato (mg/L)	181	144	135	143	115	121
Cloruro (mg/L)	2.520	2.481	1.282	1.215	1.761	1.713
Nitrato (mg/L)	1,90	1,20	0,90	4,30	1,60	10,00
Sulfato (mg/L)	288	444	43	305	323	340

(*) : Puntera congelada.

(**) : Nivel de agua insuficiente para toma de muestras y análisis de parámetros hidroquímicos.

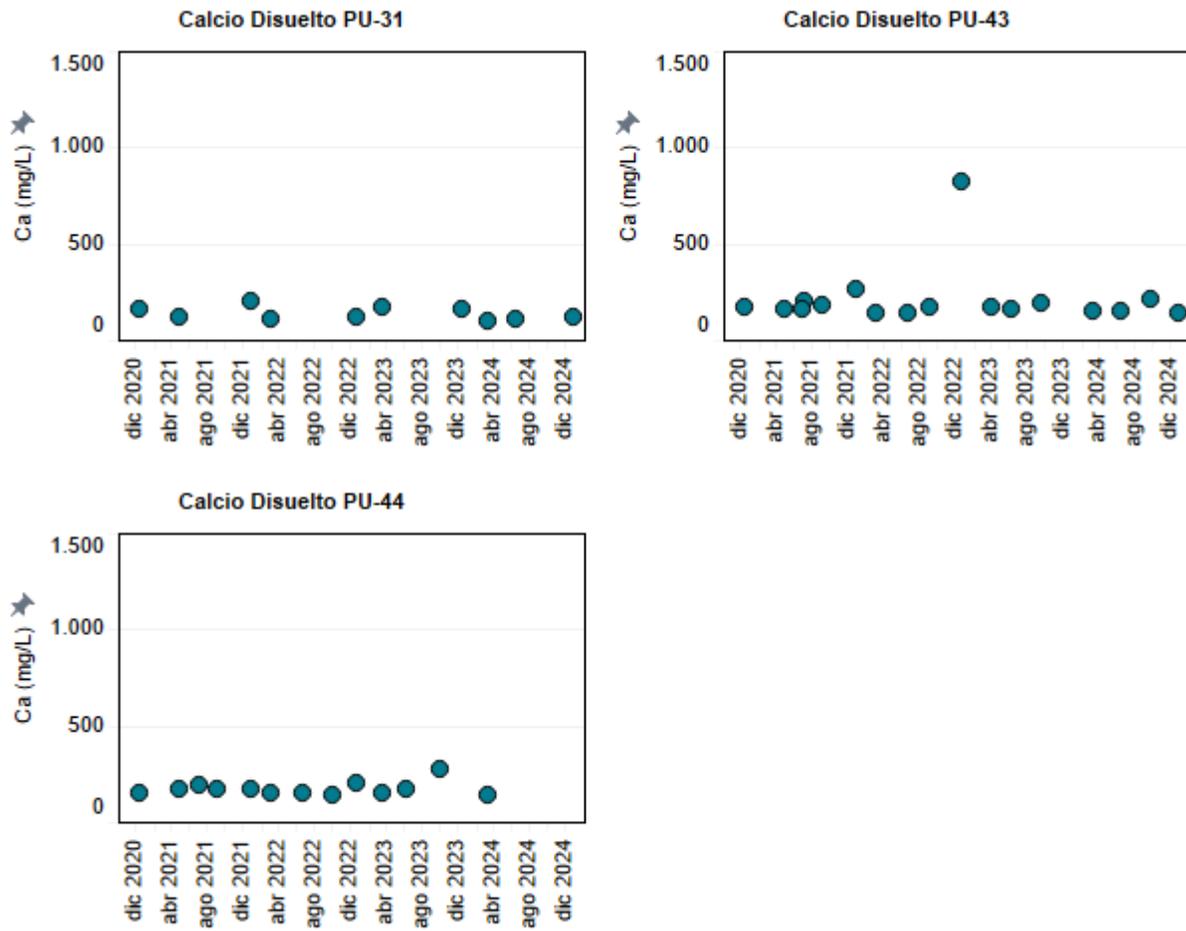


Figura 4-57: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/L) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.

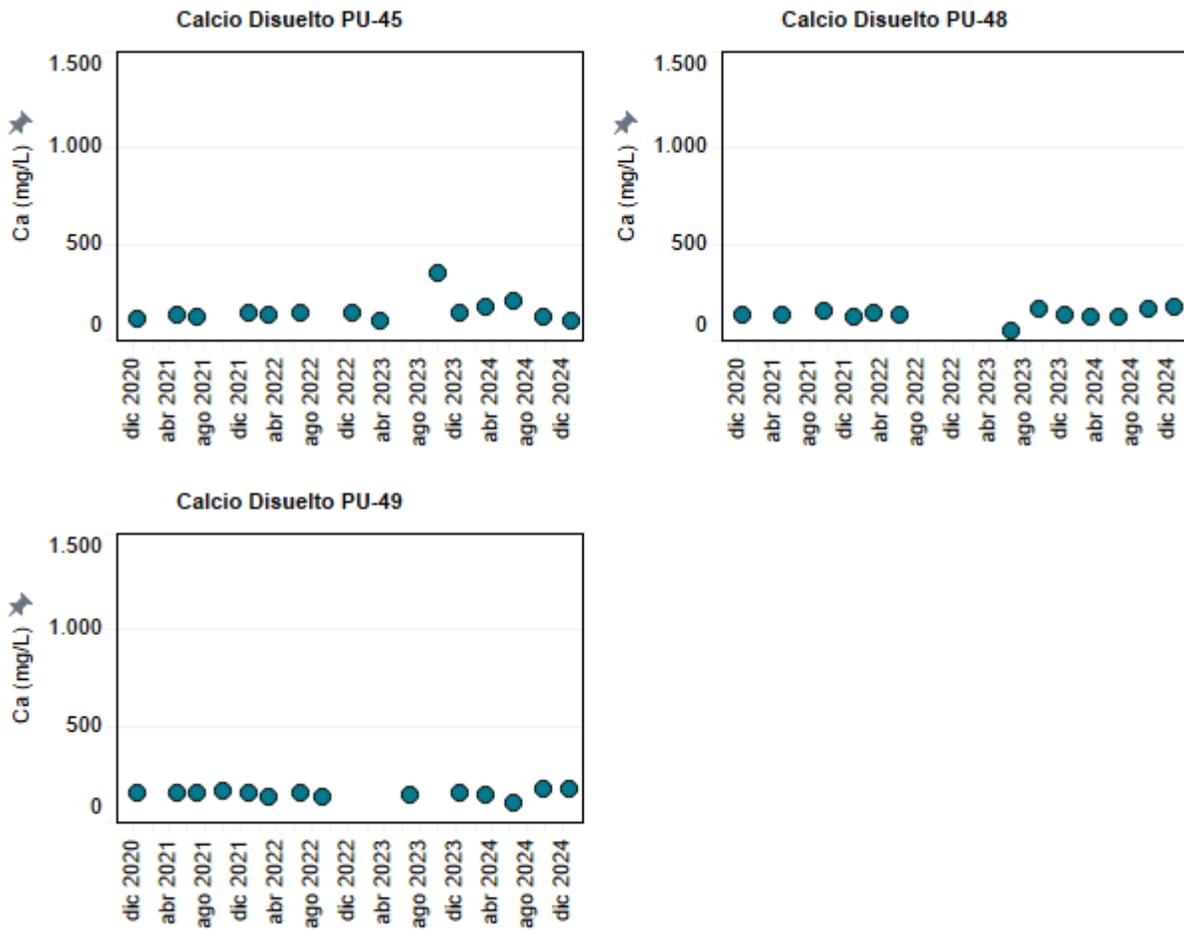


Figura 4-58: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/L) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.

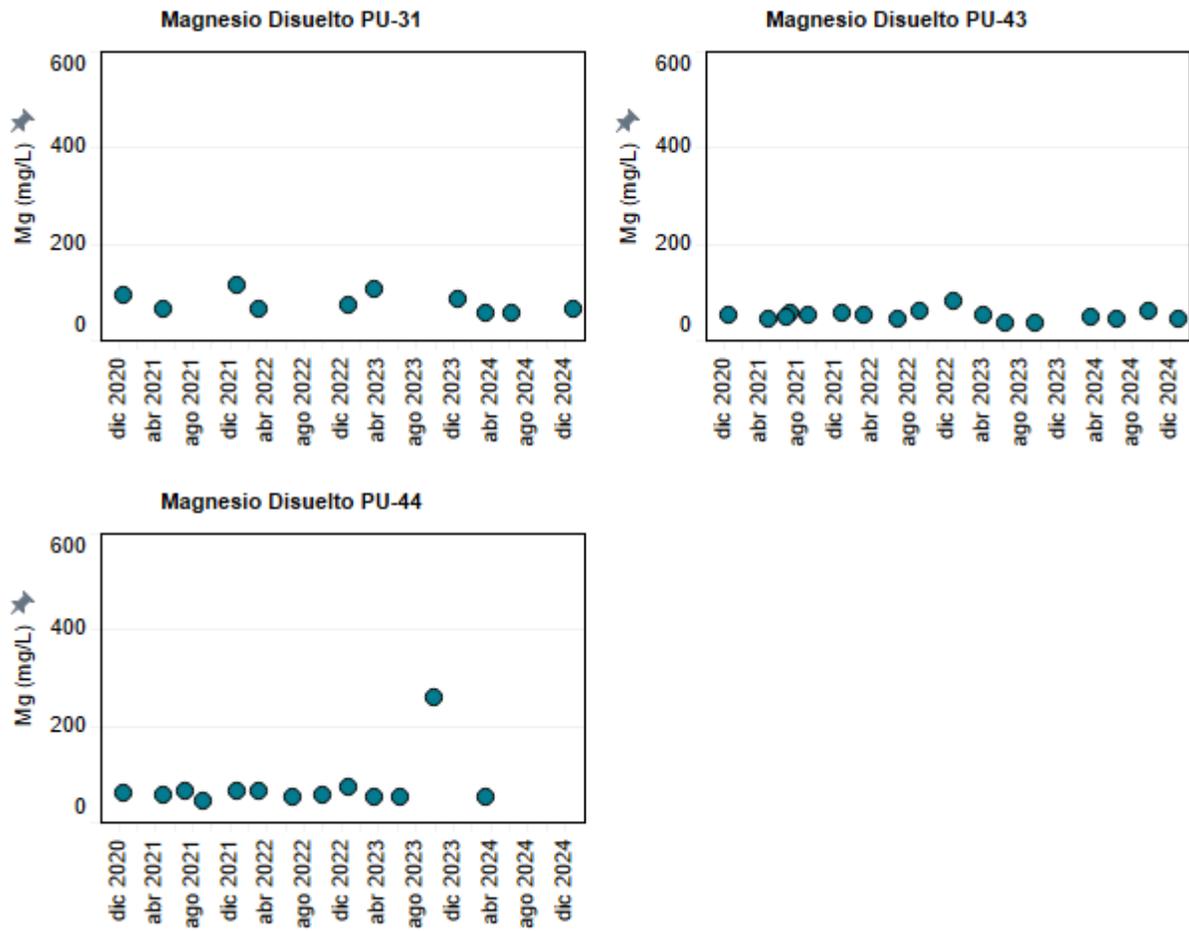


Figura 4-59: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/L) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.

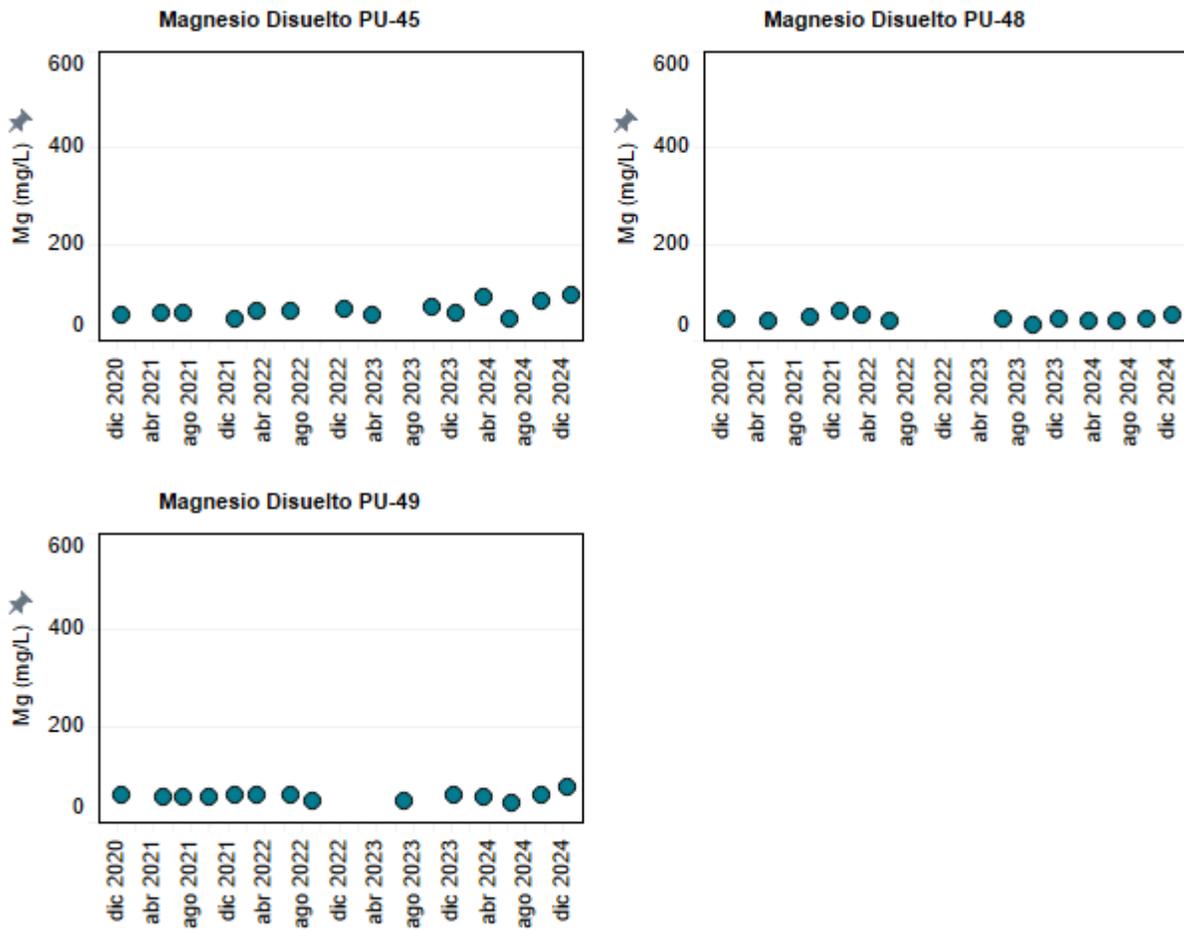


Figura 4-60: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/L) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.

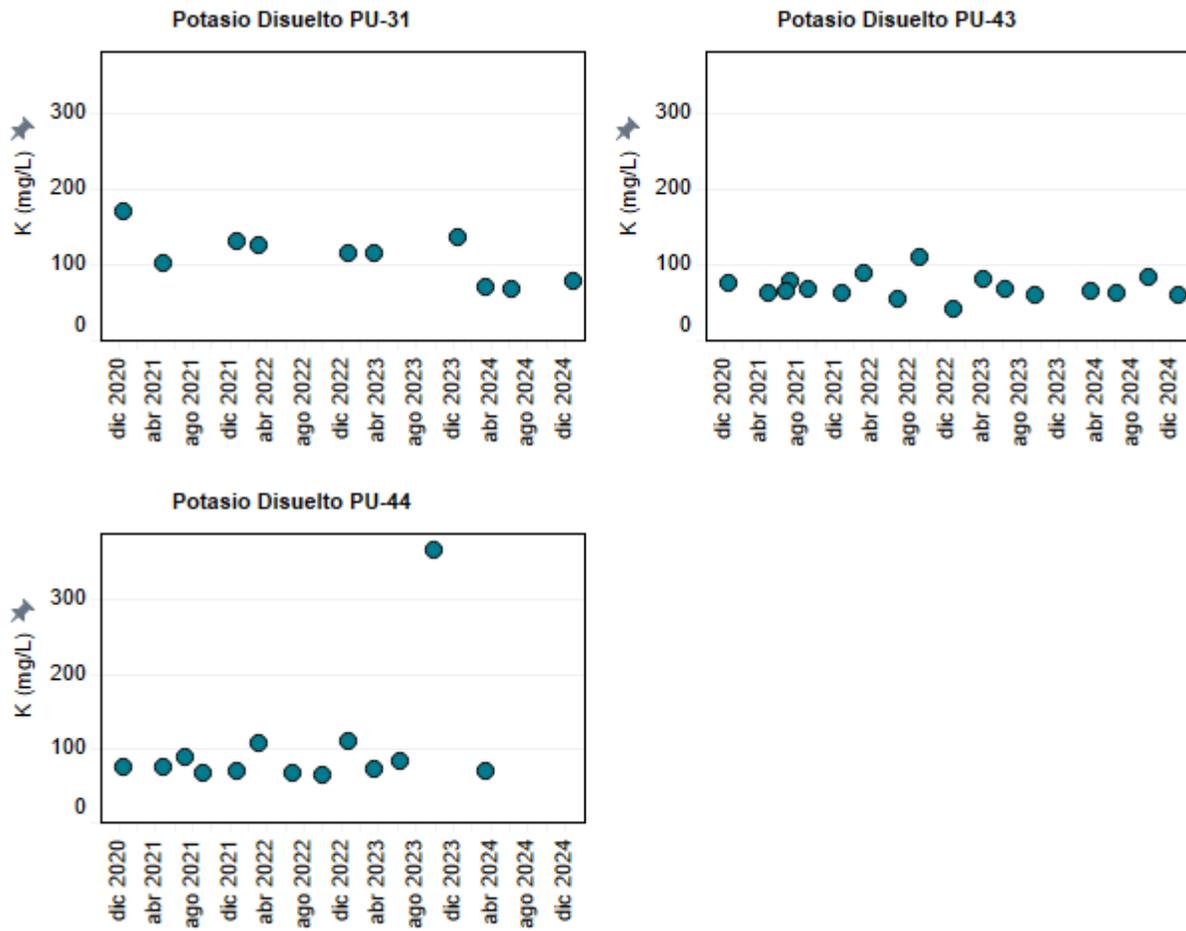


Figura 4-61: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/L) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.

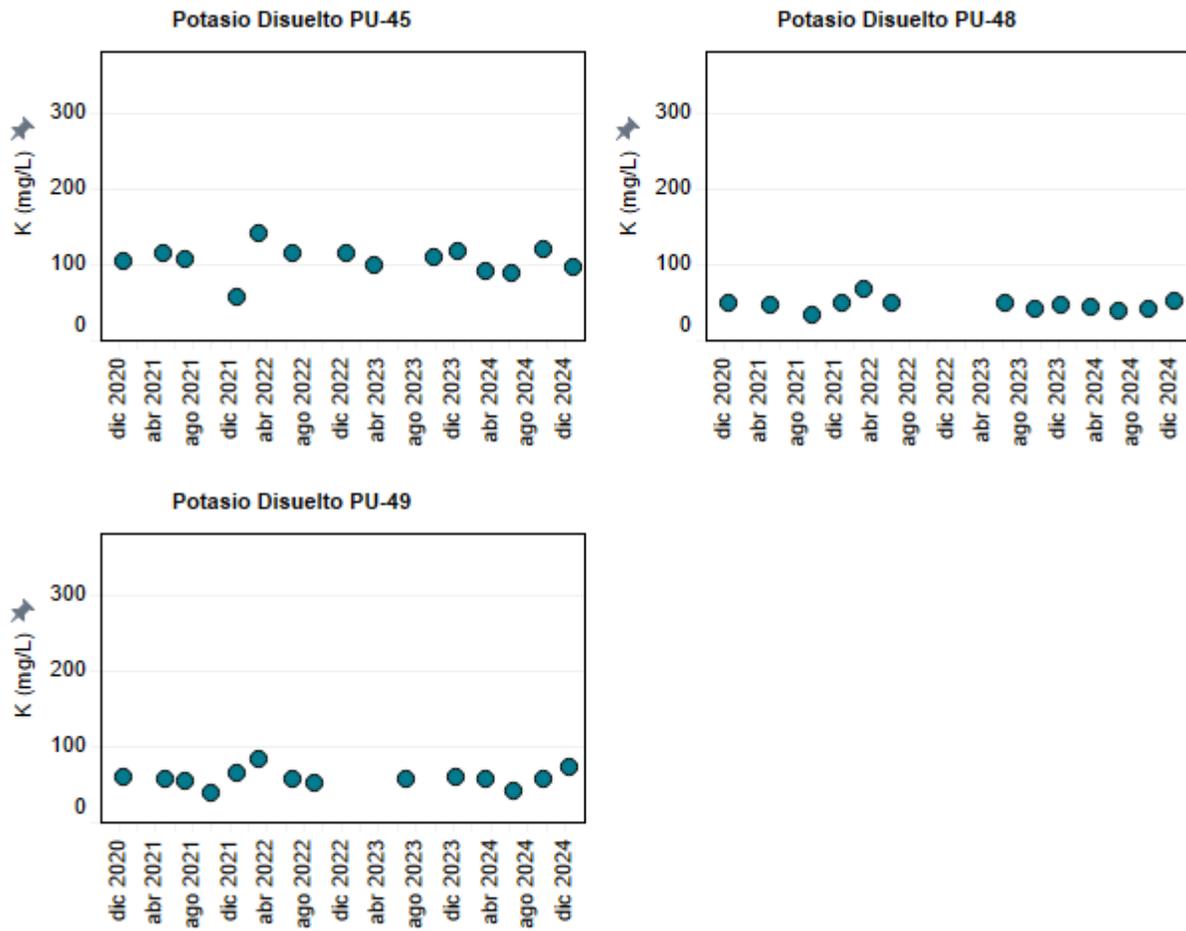


Figura 4-62: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/L) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.

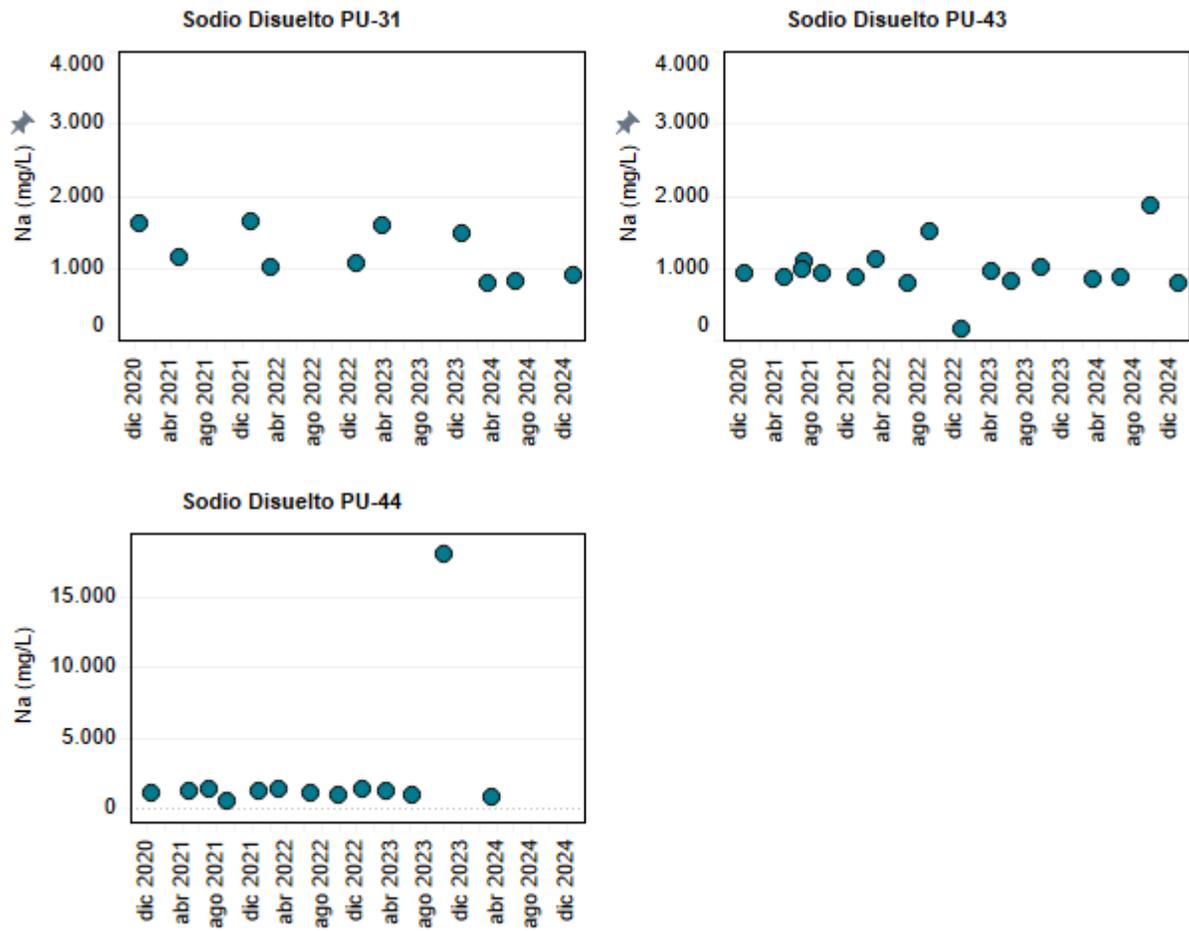


Figura 4-63: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/L) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.

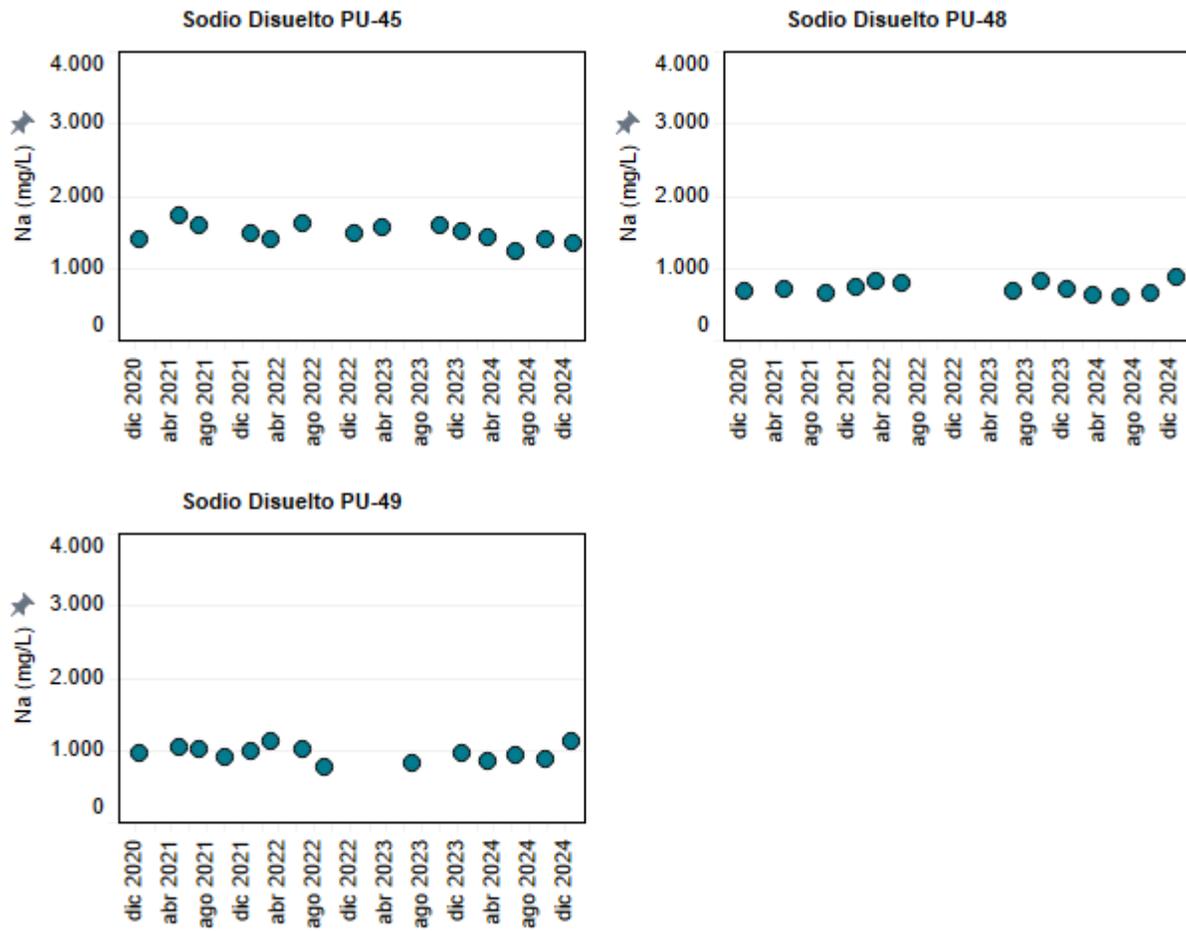


Figura 4-64: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/L) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.

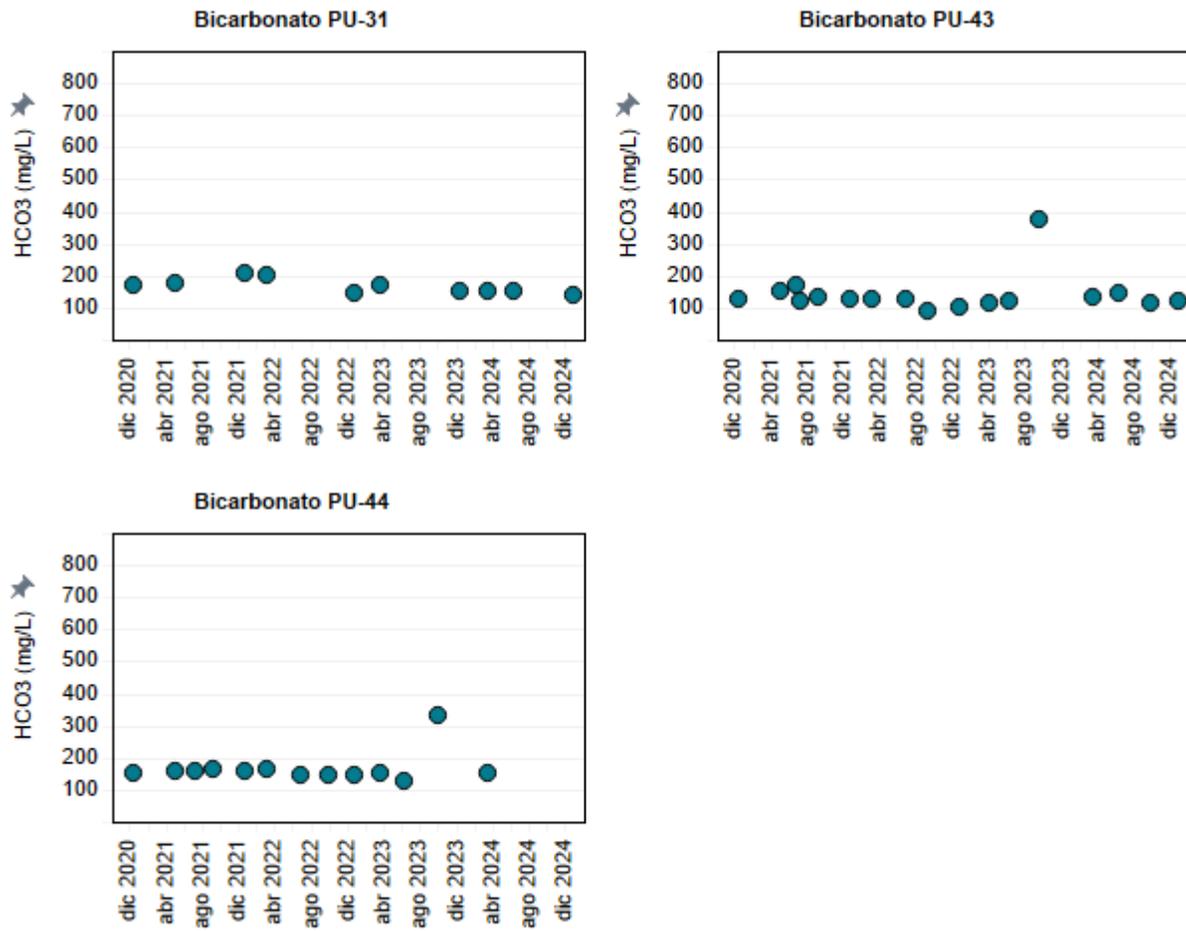


Figura 4-65: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/L) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.

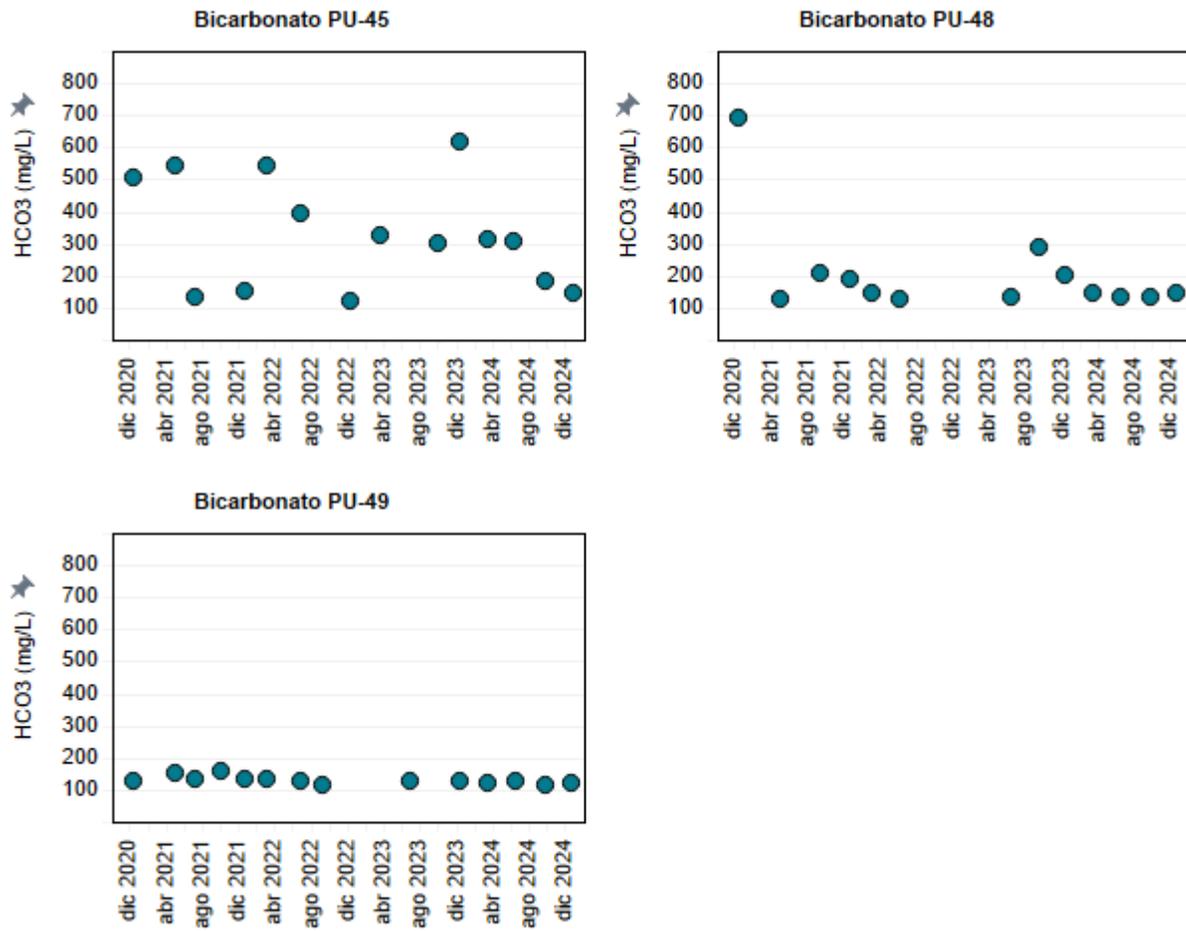


Figura 4-66: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/L) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.

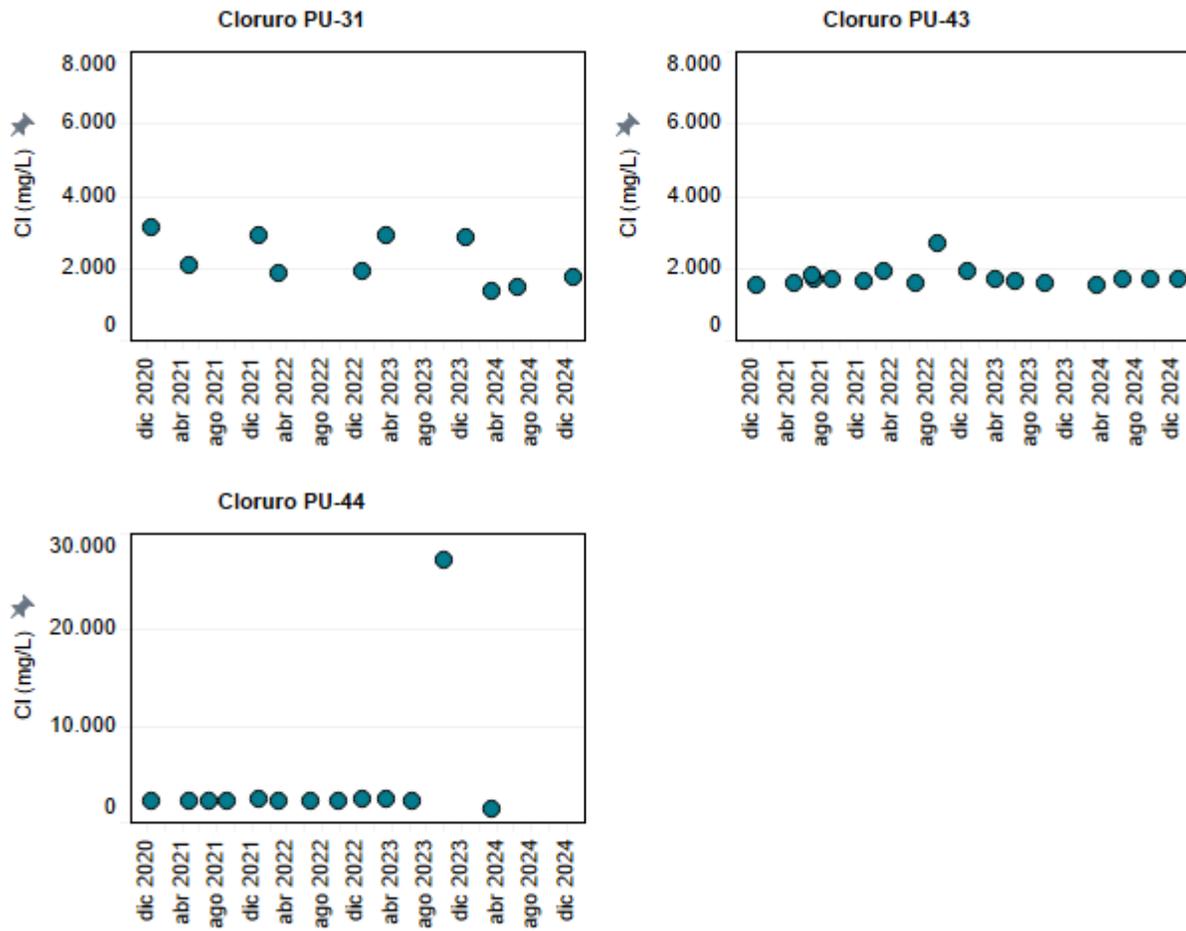


Figura 4-67: Evolución temporal de Cloruro (mg/L) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.

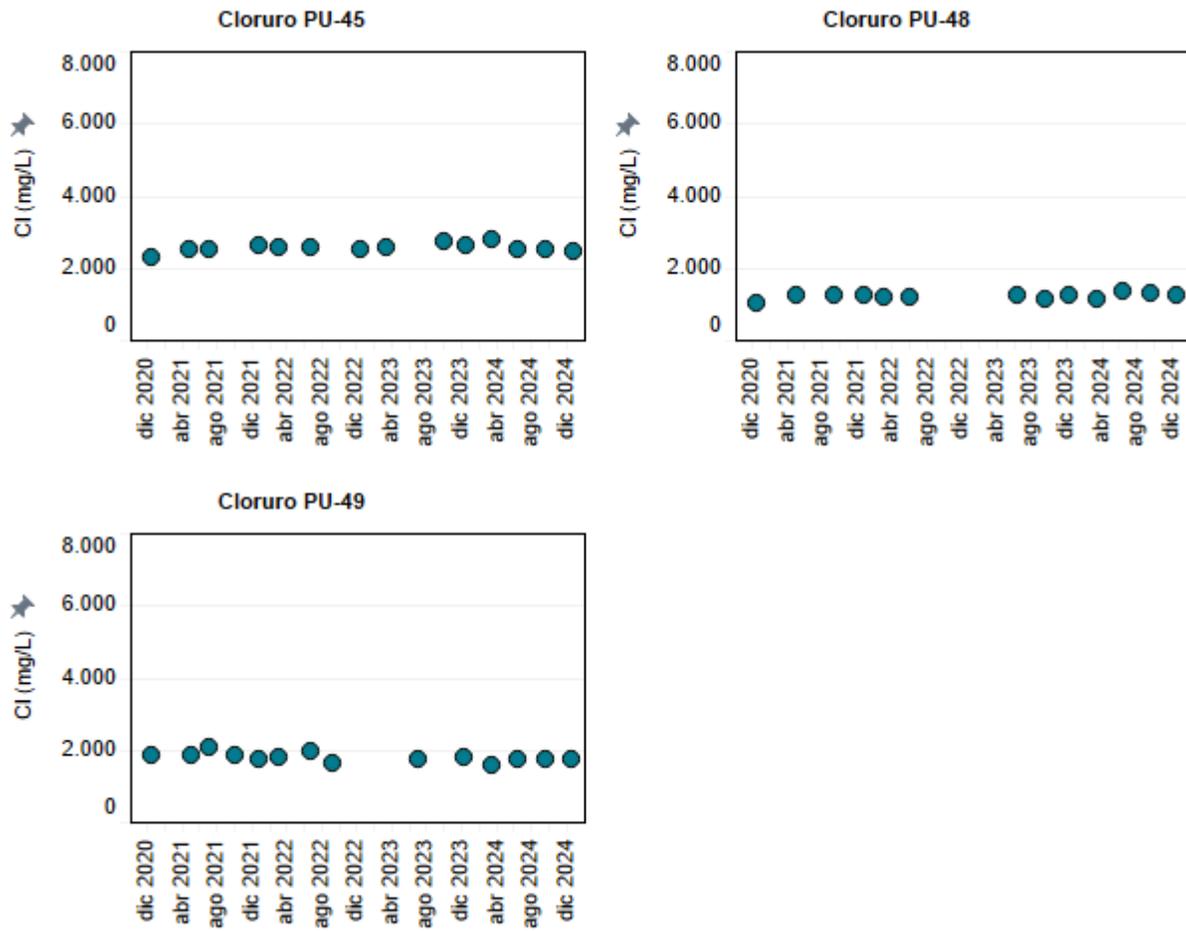


Figura 4-68: Evolución temporal de Cloruro (mg/L) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.

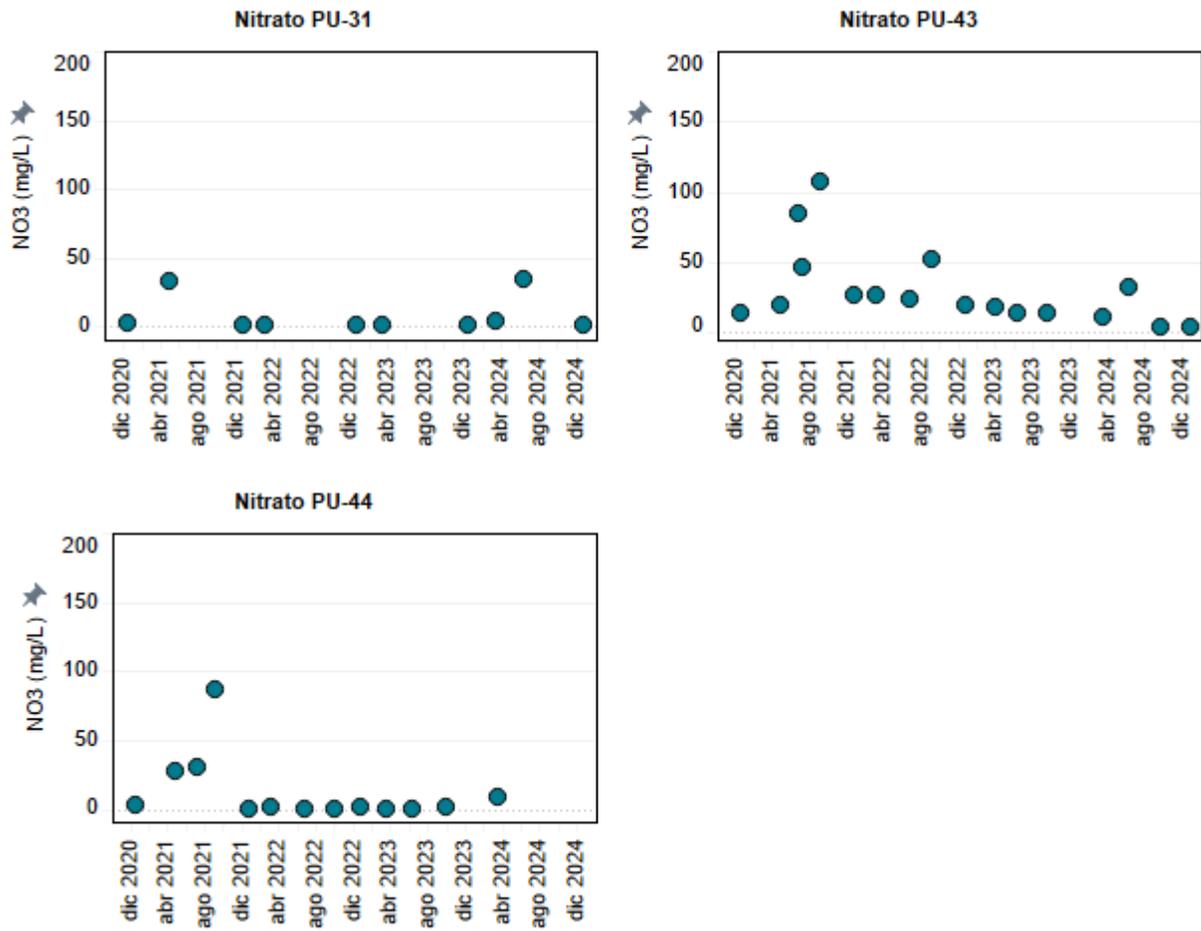


Figura 4-69: Evolución temporal de Nitrato (mg/L) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.

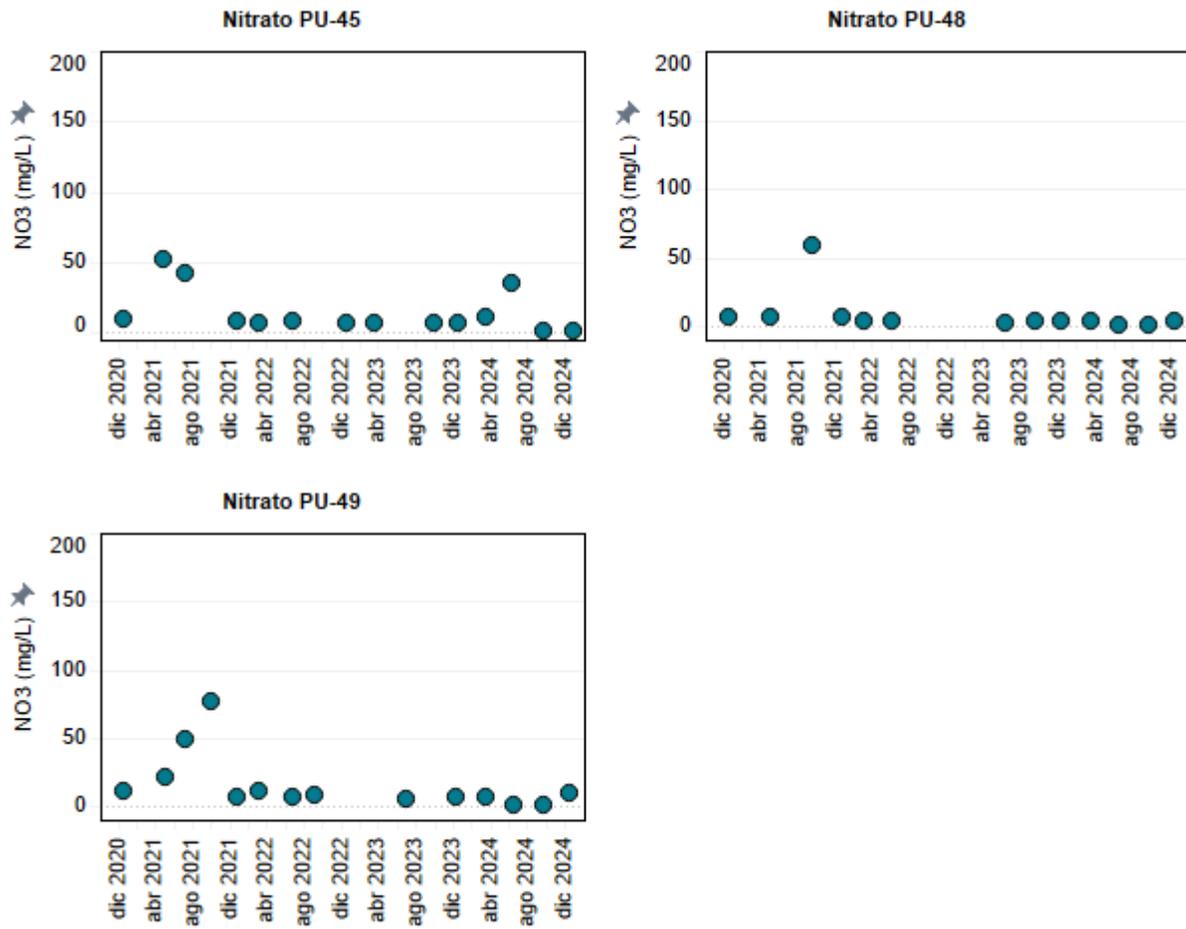


Figura 4-70: Evolución temporal de Nitrato disuelto (mg/L) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.

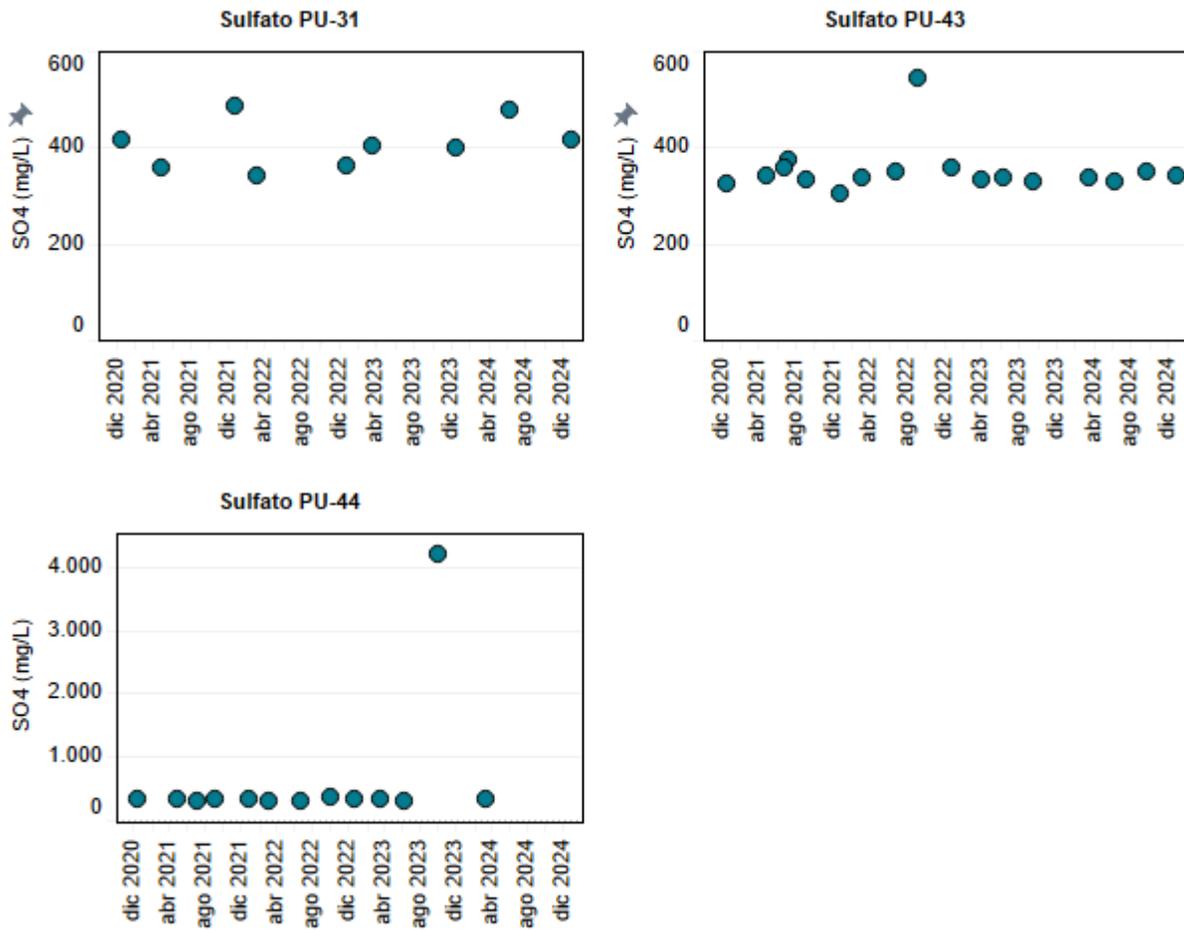


Figura 4-71: Evolución temporal de Sulfato (mg/L) en los puntos PU-31, PU-43 y PU-44.

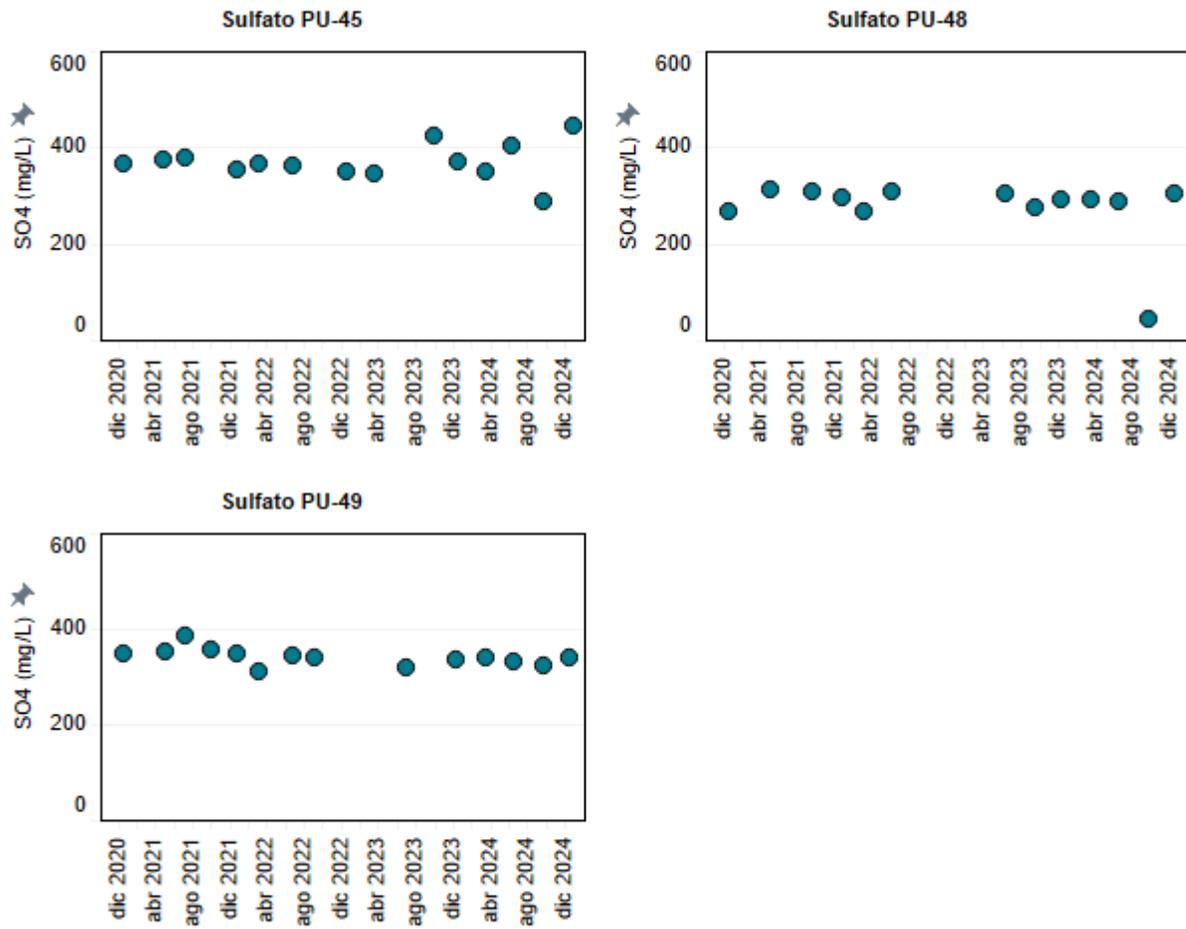


Figura 4-72: Evolución temporal de Sulfato (mg/L) en los puntos PU-45, PU-48 y PU-49.

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, la mayoría de los puntos analizados en el laboratorio no supera una diferencia porcentual del 10%, a excepción de los puntos POD-2 en septiembre 2024 y PU-43 en diciembre 2024, 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 septiembre 2024 (%)	Diferencia diciembre 2024 (%)
B-2	8,82	4,36
B-4	5,61	0,95
CP-11	8,74	1,22
PB-11	6,95	6,60
PB-12	1,43	0,13
P-19a	3,52	0,59
P-4a	6,63	3,64
PBT-14	0,30	1,40
POD-1	7,29	2,32
POD-2	10,10	3,37
POD-3	2,49	1,05
PU-31	(*)	7,37
PU-43	0,95	10,50
PU-44	(**)	(**)
PU-45	2,07	5,39
PU-48	2,33	9,53
PU-49	4,71	6,58

(*): Puntera congelada.

(**): Nivel de agua insuficiente para toma de muestras y análisis de parámetros hidroquímicos.

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.
B-2	12-09-2024	4.721	4.683	1,01	7,50	7,73	0,97
B-2	09-12-2024	4.843	4.656	1,04	7,64	8,18	0,93
B-4	12-09-2024	4.571	4.481	1,02	7,15	7,02	1,02
B-4	09-12-2024	4.557	4.442	1,03	8,17	7,34	1,11
CP-11	06-09-2024	5.110	4.476	1,14	7,71	7,67	1,01
CP-11	16-12-2024	4.715	4.526	1,04	7,53	8,23	0,91
P-19a	06-09-2024	5.067	4.406	1,15	7,42	7,68	0,97
P-19a	09-12-2024	4.495	4.403	1,02	7,70	8,08	0,95
P-4a	06-09-2024	5.237	4.774	1,10	7,76	7,71	1,01
P-4a	09-12-2024	4.716	4.637	1,02	7,83	7,89	0,99
PB-11	06-09-2024	3.516	3.301	1,07	8,94	8,15	1,10
PB-11	09-12-2024	3.022	3.073	0,98	8,96	8,86	1,01
PB-12	06-09-2024	5.066	4.560	1,11	7,76	7,70	1,01
PB-12	09-12-2024	4.654	4.508	1,03	7,69	8,03	0,96
PBT-14	12-09-2024	3.862	4.297	0,90	7,72	7,82	0,99
PBT-14	09-12-2024	4.362	4.307	1,01	7,50	8,03	0,93
POD-1	12-09-2024	18.860	17.694	1,07	7,29	7,70	0,95
POD-1	09-12-2024	18.700	17.646	1,06	7,19	8,27	0,87
POD-2	12-09-2024	4.603	4.394	1,05	7,74	7,83	0,99
POD-2	09-12-2024	4.471	4.395	1,02	8,10	8,09	1,00
POD-3	12-09-2024	4.540	4.488	1,01	7,72	7,91	0,98
POD-3	09-12-2024	4.510	4.421	1,02	8,13	8,12	1,00
PU-31	20-09-2024	(*)	(*)	-	(*)	(*)	-
PU-31	23-12-2024	5.814	5.971	0,97	7,17	8,15	0,88

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.
PU-43	20-09-2024	5.953	5.695	1,05	7,47	7,08	1,06
PU-43	23-12-2024	5.660	5.707	0,99	7,80	8,03	0,97
PU-44	20-09-2024	7.680	(**)	-	7,39	(**)	-
PU-44	23-12-2024	7.527	(**)	-	7,45	(**)	-
PU-45	20-09-2024	8.594	8.345	1,03	7,98	7,78	1,03
PU-45	23-12-2024	8.045	8.058	1,00	7,89	8,15	0,97
PU-48	20-09-2024	4.348	4.316	1,01	7,75	7,51	1,03
PU-48	16-12-2024	5.000	4.591	1,09	7,70	8,24	0,93
PU-49	20-09-2024	6.248	5.788	1,08	7,84	7,64	1,03
PU-49	16-12-2024	6.043	5.847	1,03	7,49	8,18	0,92

(*): *Puntera congelada.*

(**) *Nivel de agua insuficiente para toma de muestras y análisis de parámetros hidroquímicos en laboratorio, sólo se miden parámetros in situ.*

En la Figura 5-1, Figura 5-2, Figura 5-3 y Figura 5-4 se muestra la comparación entre la conductividad eléctrica medida in situ y en laboratorio para los pozos y punteras, mientras que en la Figura 5-5, Figura 5-6, Figura 5-7 y Figura 5-8 se ilustra la comparación entre pH medido in situ y en laboratorio para los pozos y punteras.

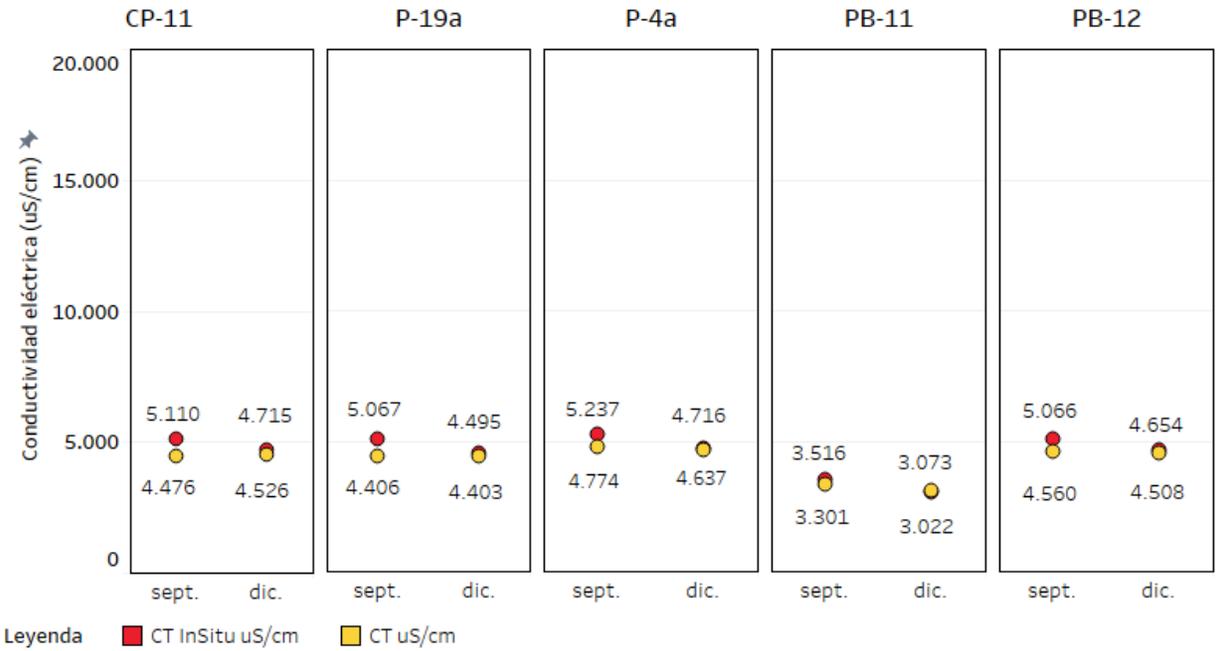


Figura 5-1: Comparación entre la conductividad eléctrica medida in situ y laboratorio en los pozos CP-11, P-19a, P-4a, PB-11 y PB-12.

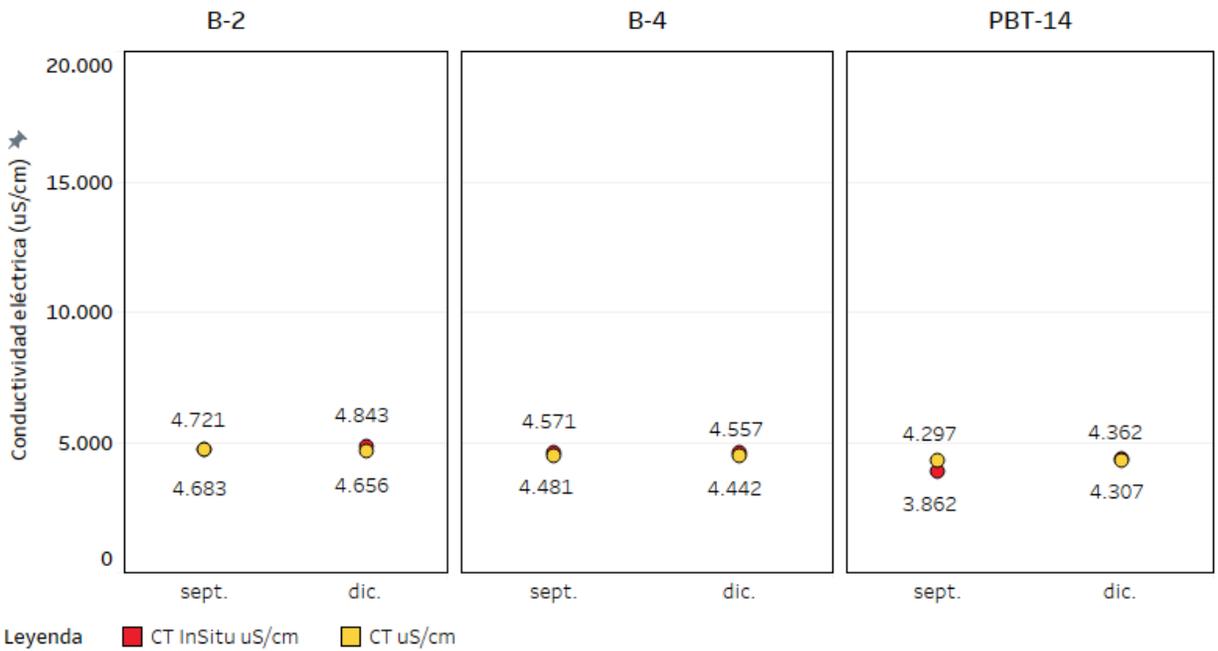


Figura 5-2: Comparación entre la conductividad eléctrica medida in situ y laboratorio en los pozos B-2, B-4 y PBT-14.

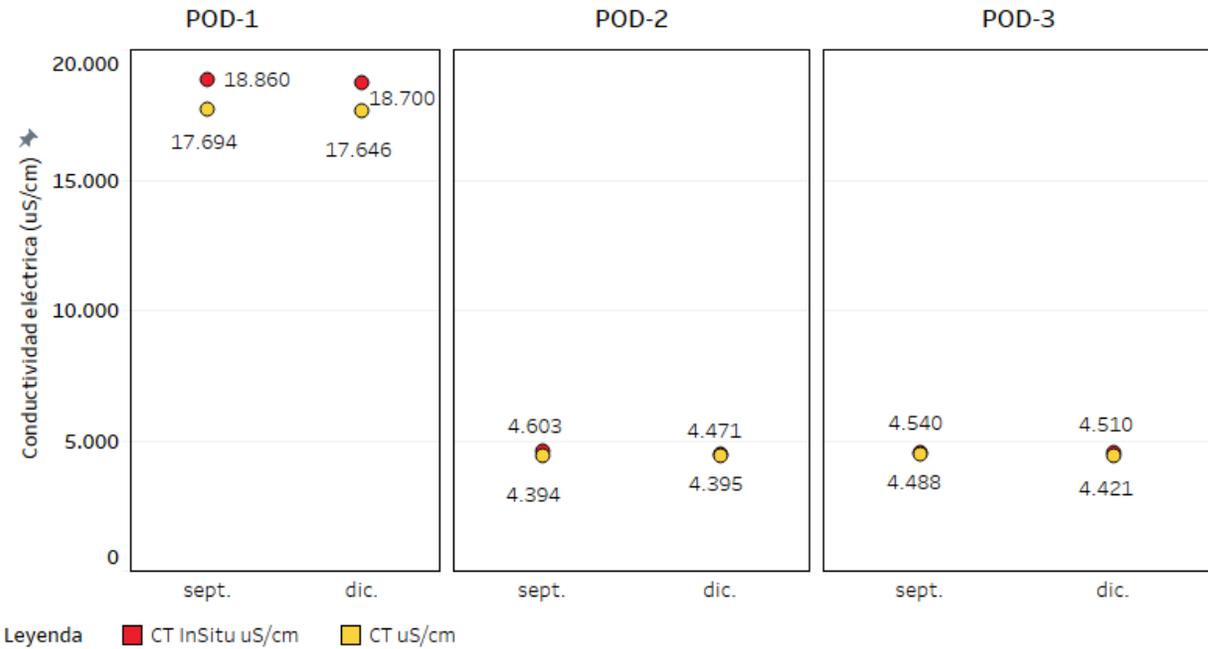


Figura 5-3: Comparación entre la conductividad eléctrica medida in situ y laboratorio en los pozos POD-1, POD-2 y POD-3.

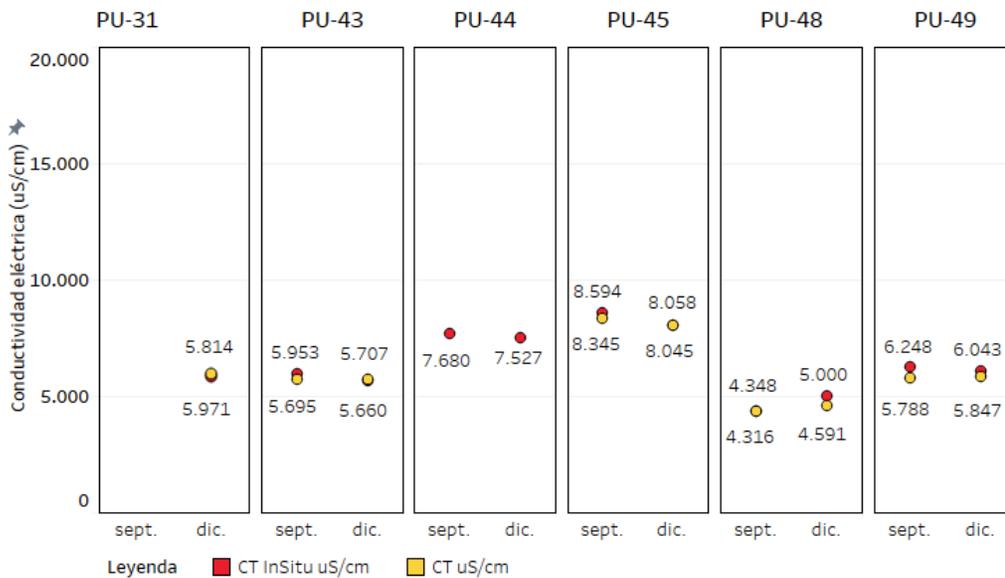


Figura 5-4: Comparación entre la conductividad eléctrica medida in situ y laboratorio en las punteras PU-31, PU-43, PU-44, PU-45, PU-48 y PU-49.

La puntera PU-31 se encontró congelada en septiembre de 2024 y, en el segundo semestre de 2024, en la puntera PU-44 el nivel de agua fue insuficiente para toma de muestras y análisis de parámetros hidroquímicos en laboratorio, solo se midieron parámetros in situ.

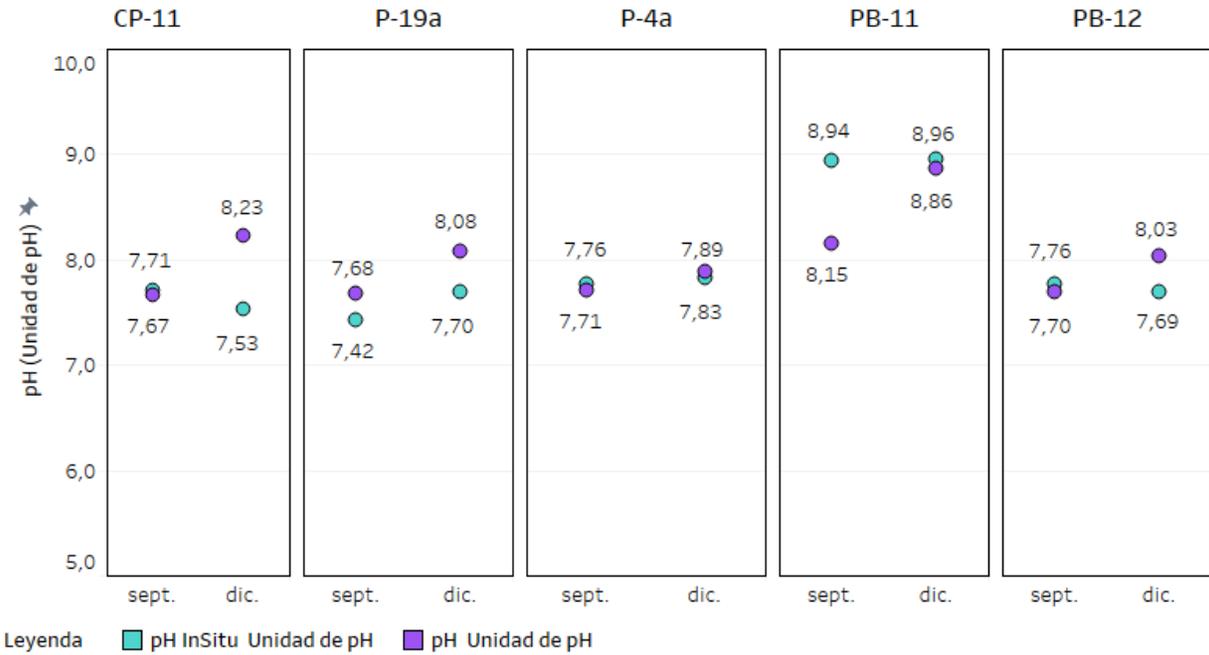


Figura 5-5: Comparación entre el pH medido in situ y laboratorio en los pozos CP-11, P-19a, P-4a, PB-11 y PB-12.

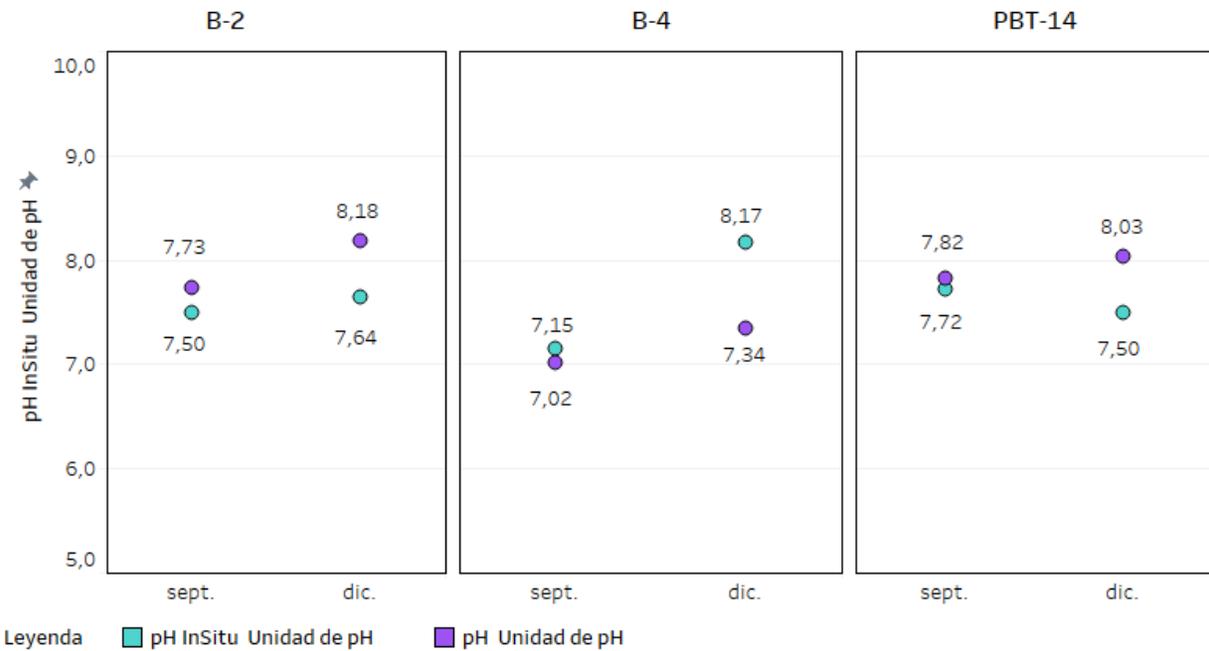


Figura 5-6: Comparación entre el pH medido in situ y laboratorio en los pozos B-2, B-4 y PBT-14.

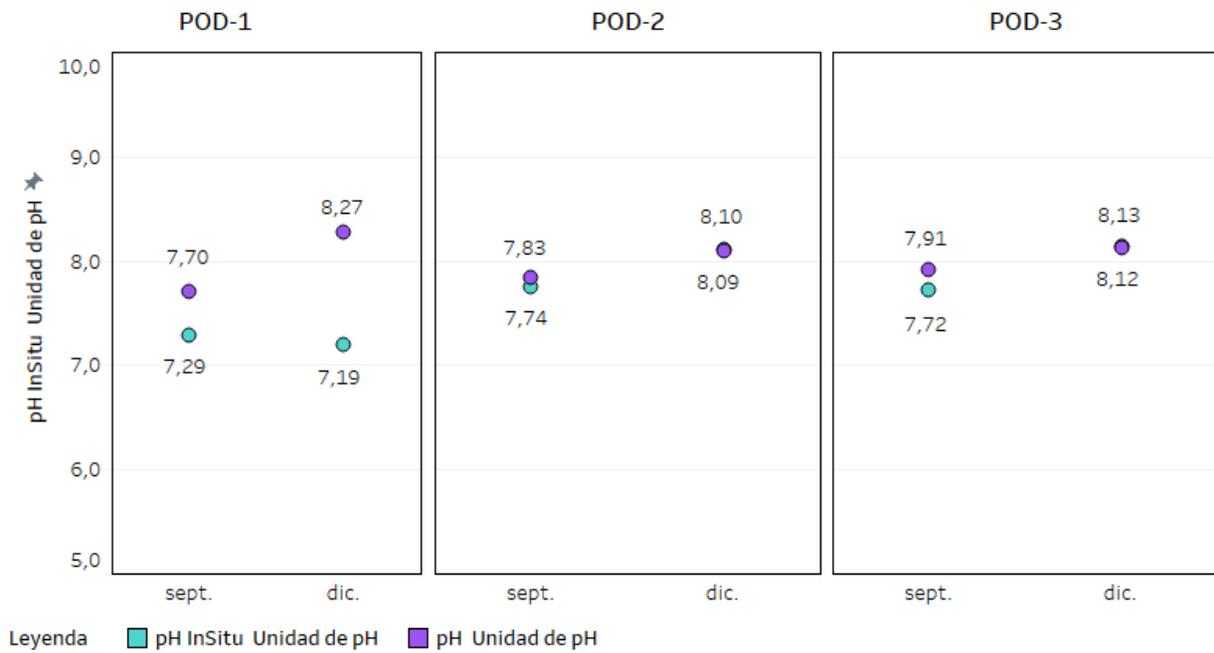


Figura 5-7: Comparación entre el pH medido in situ y laboratorio en los pozos POD-1, POD-2 y POD-3.

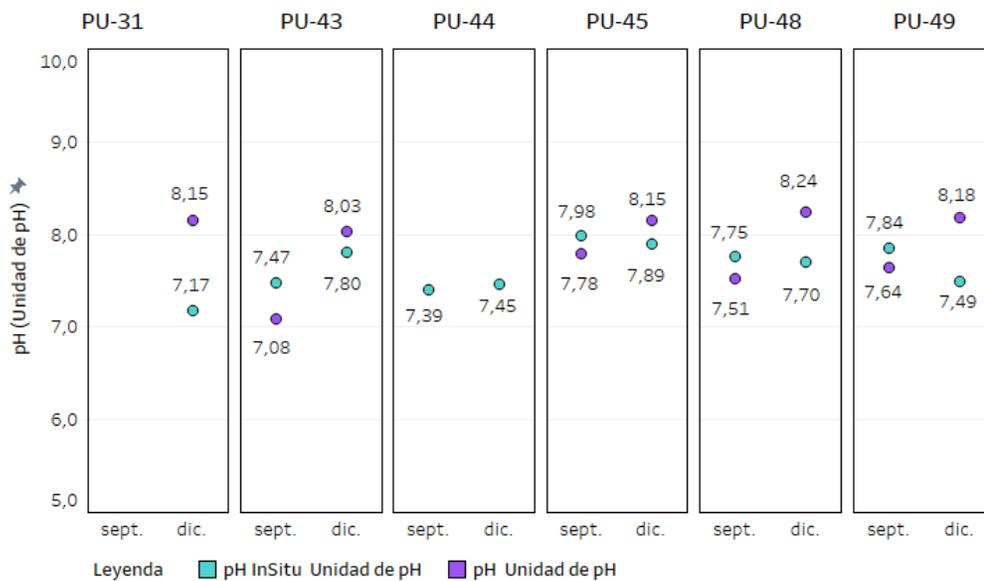


Figura 5-8: Comparación entre el pH medido in situ y laboratorio en las punteras PU-31, PU-43, PU-44, PU-45, PU-48 y PU-49.

La puntera PU-31 se encontró congelada en septiembre de 2024. Y, en el segundo semestre de 2024, en la puntera PU-44 el nivel de agua fue insuficiente para toma de muestras y análisis de parámetros hidroquímicos en laboratorio, solo se midieron parámetros in situ.

Con respecto a la comparación entre conductividades in situ y en laboratorio, las variaciones son bajas en la mayoría de los puntos analizados, siendo no mayor al 10% (entre 0,97 y 1,10), excepto en septiembre de 2024 en los puntos CP-11 (14,2%), P-19a (15,0%), PB-12 (11,1%) y PBT-14 (10,1%).

Por otra parte, en cuanto al pH medido in situ y en laboratorio, en diciembre de 2024, los puntos B-4, POD-1 y PU-31 superan el 10% de diferencia porcentual entre ambos valores, registrando una diferencia de 11,3%, 13,1% y 12,0%, respectivamente.

A modo de visualización, la Figura 5-9 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.

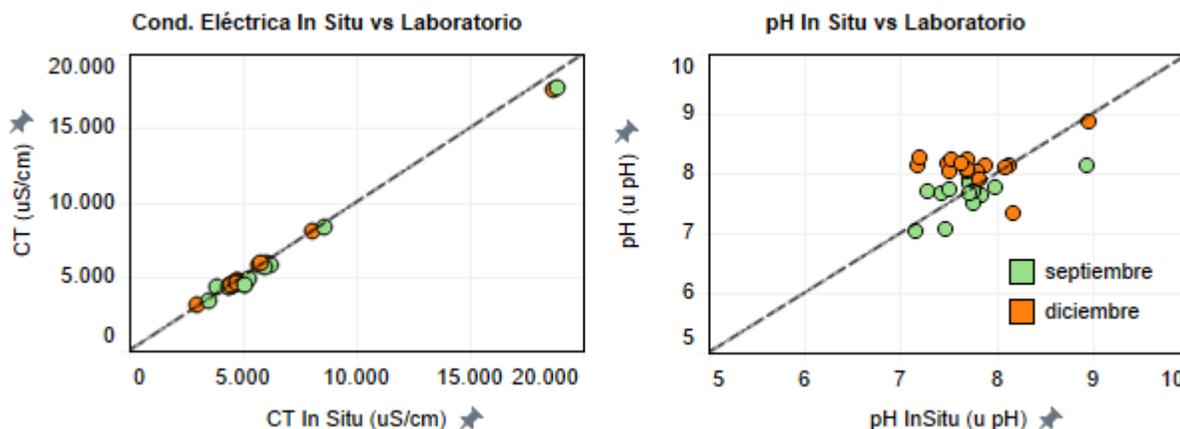


Figura 5-9: Comparación entre las mediciones tomadas in situ y en laboratorio – Conductividad eléctrica y pH.

5.2 Evolución temporal parámetros hidroquímicos

A continuación, se describe el comportamiento observado para cada variable. Cabe destacar que la puntera PU-31 no registra mediciones en septiembre de 2024 ya que se encontró congelada, y la puntera PU-44 no registra mediciones de parámetros fisicoquímicos en laboratorio en el segundo semestre de 2024, debido a que el nivel de agua fue insuficiente para la toma de muestras y consecuente análisis de dichos parámetros.

5.2.1 Parámetros fisicoquímicos in situ

En general, se observa que durante el segundo semestre de 2024 la mayoría de los parámetros fisicoquímicos medidos in situ se mantienen dentro del mismo rango respecto a las mediciones anteriores, sin variaciones significativas. Sin embargo, el pH aumenta en los puntos B-2, B-4, POD-2, POD-3 y PB-11 alcanzando, en este último, el valor máximo de la serie (8,96 u pH). Por otra parte, el pH en la PU-31 se mantiene alto desde el semestre previo.

Cabe destacar que en el punto POD-1 se identifican las concentraciones más altas de conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales, en comparación con los otros puntos de monitoreo, durante todo el periodo evaluado.

5.2.2 Parámetros fisicoquímicos laboratorio

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos medidos en laboratorio, en general, no se observan variaciones significativas en el periodo reportado. No obstante, en diciembre 2024, el pH aumenta en el punto PB-11, alcanzando el valor máximo de la serie (8,86 u pH), al igual que el potencial redox en el punto P-4a.

Respecto a la conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales, se identifican concentraciones más altas en el punto POD-1 en comparación con los otros puntos de monitoreo, durante todo el periodo evaluado.

5.2.3 Cationes y aniones disueltos

Con respecto a las concentraciones de cationes y aniones disueltos, en general, se mantienen dentro del rango de valores previos. El aumento de sodio (PU-43) y las disminuciones de boro (B-2 y B-4), manganeso (B-4), sílice (PU-49) y sulfato (PU-48), registrados en septiembre 2024, se recuperan en diciembre 2024, excepto la concentración de manganeso en el punto POD-1, que se mantiene alta durante el segundo semestre de 2024.

Cabe destacar que, en todo el periodo evaluado, se observa que las concentraciones de calcio, sodio, sulfato y cloruro son más altas en el punto POD-1, en comparación con los otros puntos de monitoreo.

Adicionalmente, las concentraciones de potasio (P-4a), sulfato (CP-11, PB-11 y PU-31), nitrato (POD-1) y cloruro (PU-31), que registraron valores anómalos durante el primer semestre reportado, probablemente correspondan a errores de muestreo, ya que en el semestre actual retornan al rango de valores histórico. Por otra parte, tras un aumento en la concentración de

nitrate en los puntos B-2, B-4 POD-2 y POD-3 en junio 2024, disminuye en septiembre y vuelve a aumentar en diciembre, lo cual será evaluado con mediciones posteriores.

5.3 Diagrama Piper

En la Figura 5-10 se presenta el diagrama Piper de la cuenca Salar de Pedernales para los 17 puntos analizados en el segundo semestre de 2024. Cabe destacar que en la mayoría de los puntos el dato corresponde a la medición de diciembre 2024, a excepción de la muestra de la puntera PU-44, cuya medición corresponde a marzo 2024, ya que, durante junio, septiembre y diciembre de 2024 el volumen de agua extraído de la puntera fue insuficiente para realizar análisis hidroquímicos en laboratorio.

Al respecto, la marca de agua de todos los puntos muestreados corresponde a clorurada sódica. En cuanto al contenido de cationes, las aguas contienen entre un 73% y 90% de sodio más potasio, entre un 5% y 18% de calcio, y entre un 5% y 10% de magnesio. Del total del contenido de aniones, en general, este grupo contiene entre un 67% y 87% de cloruro más nitrato, entre 9% y 28% de sulfato, y entre un 2% y 5% de bicarbonato.

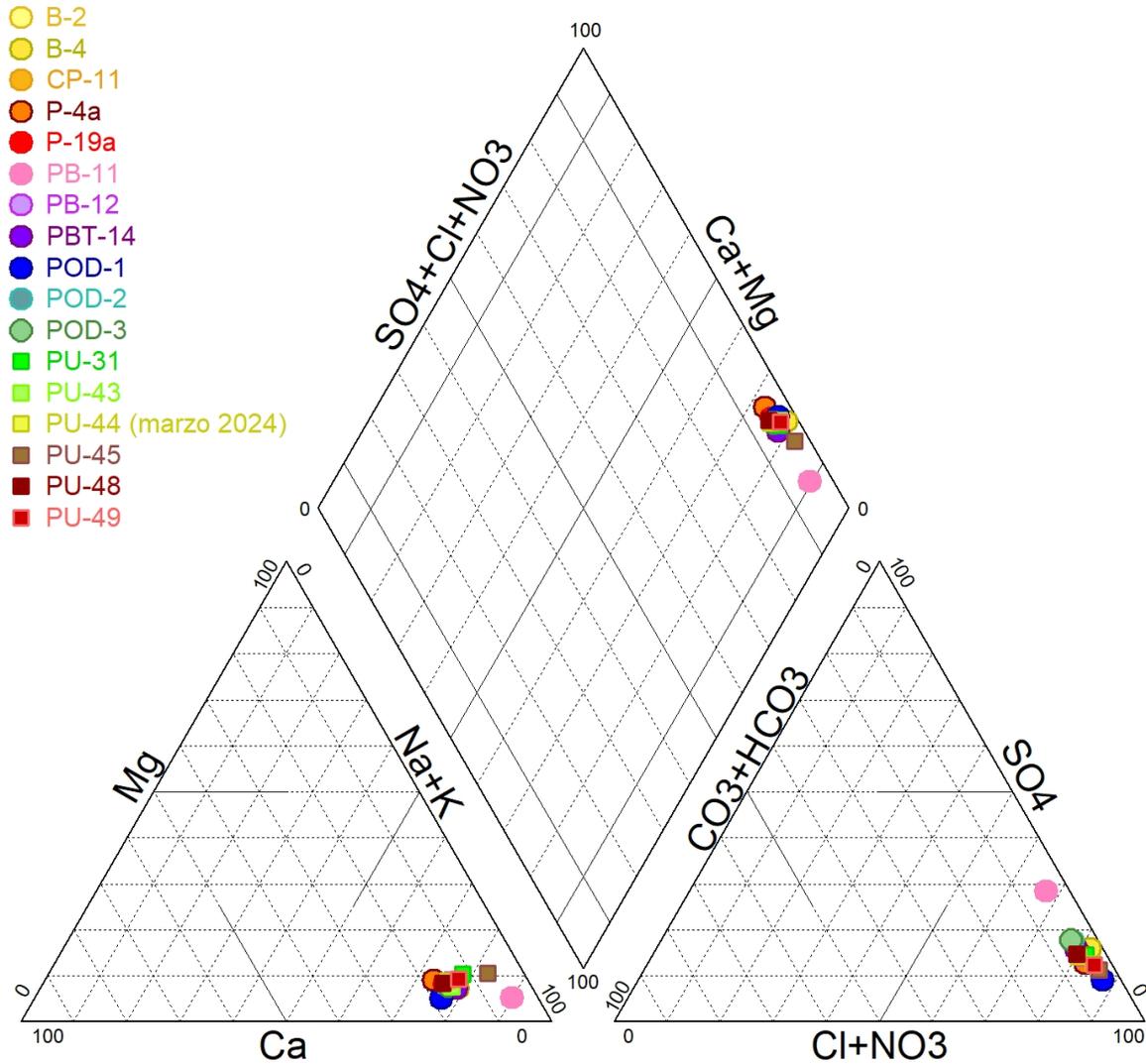


Figura 5-10: Diagrama Piper de los puntos monitoreados en el segundo semestre 2024.

Los datos corresponden a la medición de diciembre 2024, a excepción de la puntera PU-44, cuya medición corresponde a marzo 2024, ya que, durante junio, septiembre y diciembre de 2024 el volumen de agua extraído fue insuficiente para realizar análisis hidroquímicos en laboratorio.

5.4 Diagrama Stiff modificado

En la Figura 5-11 se presentan los diagramas de Stiff modificado de la cuenca Salar de Pedernales para los 17 puntos monitoreados en el segundo semestre del 2024. Cabe destacar que en la mayoría de los puntos el dato corresponde a la medición de diciembre 2024, a excepción de la puntera PU-44, cuya medición corresponde a marzo 2024, ya que, durante junio, septiembre y diciembre 2024 el volumen de agua extraído fue insuficiente para realizar análisis hidroquímicos en laboratorio.

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) sobre el calcio y magnesio.

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

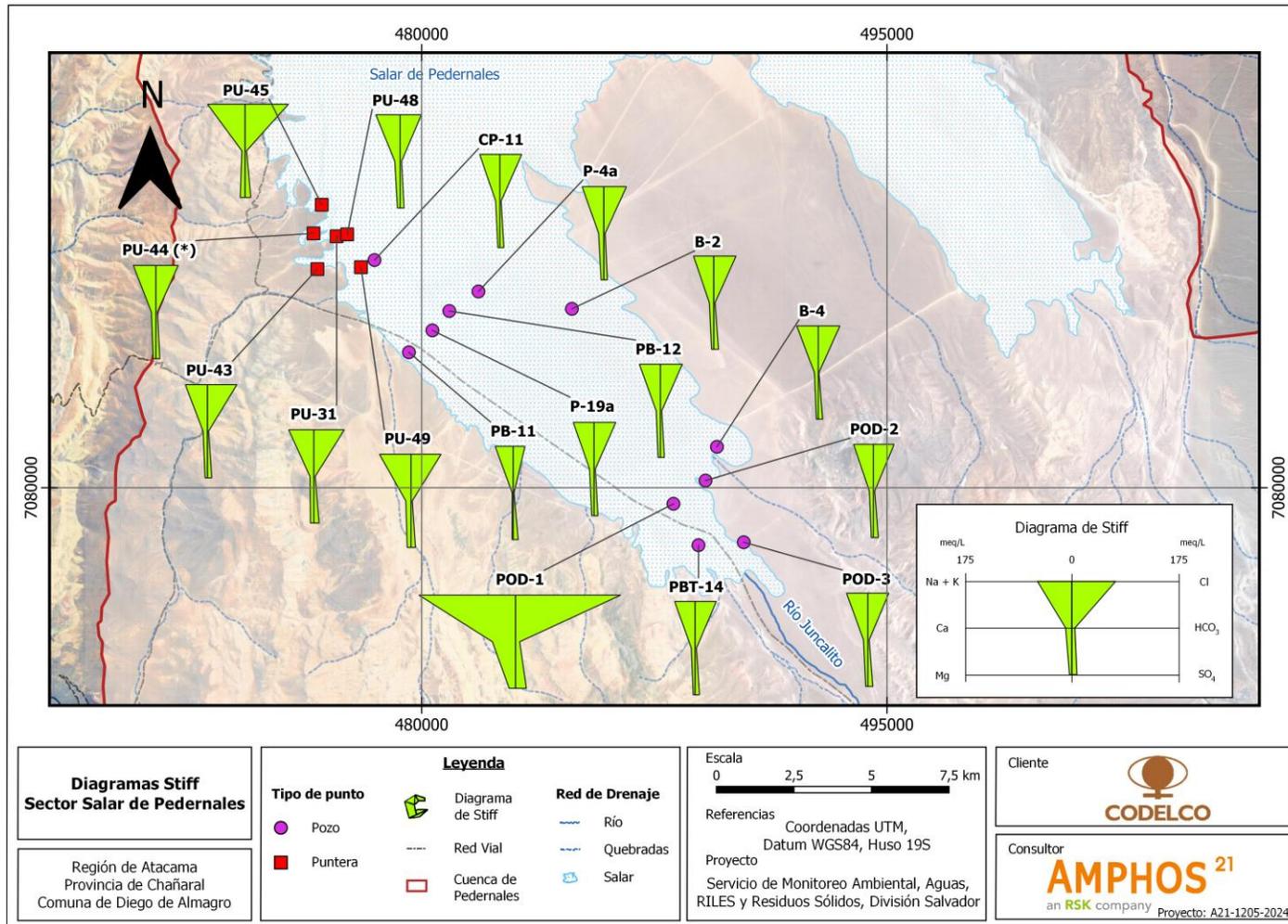


Figura 5-11: Diagramas de Stiff modificado de los puntos monitoreados en el segundo semestre 2024.

Los datos corresponden al último monitoreo realizado en cada punto (diciembre 2024).

(*): En la puntera PU-44, la medición corresponde a marzo 2024, ya que, durante junio, septiembre y diciembre 2024 el volumen de agua extraído fue insuficiente para realizar análisis hidroquímicos en laboratorio.

6 Conclusiones

La campaña de medición que se incluye en el presente informe semestral fue realizada en los meses de septiembre y diciembre de 2024, cuyas mediciones fueron llevadas a cabo por AGQ, ETFA autorizada para los alcances de medición en aguas subterráneas.

Durante las actividades de las campañas llevadas a cabo se considera un programa de mediciones con 17 puntos (11 piezómetros y 6 punteras), incluyendo los 6 pozos de control asociados al futuro campo de pozos de bombeo según lo comprometido en el PRI.

Las tomas de muestra de agua se realizan de manera exitosa en la mayoría de los puntos del programa, a excepción de la puntera PU-31 en septiembre 2024, que se encontraba congelada, y la PU-44 en septiembre y diciembre 2024, que presentó un nivel de agua insuficiente para toma de muestras y la medición de parámetros químicos en laboratorio.

En general, los parámetros fisicoquímicos in situ no presentan grandes variaciones durante el semestre actual. Sin embargo, se identifica un aumento del pH en los puntos B-2, B-4, POD-2, POD-3 y PB-11. Además, el punto POD-1, presenta los valores más altos de conductividad y sólidos disueltos totales, en comparación con los otros puntos de monitoreo. Respecto a los parámetros fisicoquímicos medidos en laboratorio, durante el segundo semestre 2024, se replica el comportamiento comentado previamente para los puntos PB-11 y POD-1.

Por otro lado, respecto de los cationes y aniones analizados, durante todo el periodo evaluado, las concentraciones de calcio, sodio, sulfato y cloruro son más altas en el punto POD-1, en comparación con los otros puntos de monitoreo. Adicionalmente, el aumento en la concentración de sodio (PU-43) y las disminuciones de boro (B-2 y B-4), manganeso (B-4), sílice (PU-49) y sulfato (PU-48), durante septiembre 2024, retoman su tendencia en diciembre 2024, al igual que los valores anómalos registrados durante el primer semestre de 2024. No así el aumento en la concentración de manganeso en POD-1 durante el semestre actual, y de nitrato en los puntos B-2, B-4, POD-2 y POD-3 en junio y diciembre 2024, que serán verificados con las mediciones posteriores, pudiendo corresponder a errores de muestreo. Los demás cationes y aniones se mantienen estables en comparación con los registros históricos.

En todos los puntos monitoreados se observa una predominancia de los cloruros sobre los demás aniones, y del sodio más potasio sobre los demás cationes, correspondiendo la marca de agua a clorurada sódica. Si bien el punto POD-1 tiene la misma marca de agua que los demás puntos, en general, presenta el mayor contenido de cationes y aniones mayoritarios, lo cual se refleja en su elevada conductividad eléctrica.

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.

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