Flow
Hydro Consulting



Título del documento:	Caracterización Hidroquímica de la Pluma y Potenciales Fuentes
Tipo de documento:	Reporte Técnico – Rev. 0
Código del documento:	FLOW-COD006-REP-HDG-003R0
Suscribe el documento:	Flow Hydro Consulting Group
Enviado a:	Manuel Bucci – Gerencia de Planificación
Empresa:	Codelco Distrito Norte
Fecha	12 de noviembre de 2026

Flow
Hydro Consulting

Revisión	Fecha	Emitido para	Preparó	Revisó	Aprobó	Cliente
A	06/05/2024	Rev. Interna	MJF	PR	JY	MB
B	09/05/2024	Cliente	MJF	PR	JY	MB
C	03/06/2024	Cliente	MJF	PR	CM	MB
0	12/11/2026	Cliente	MJF	PR	CM	MB

RESUMEN EJECUTIVO

El proyecto minero Radomiro Tomic, bajo la Gerencia de Planificación del Distrito Norte de Codelco, ha iniciado un estudio detallado sobre la infiltración de aguas sulfatadas en el paleocanal al noreste de la operación. Este estudio es crucial para la gestión de los recursos hídricos y ambientales, dada la operativa minera y sus compromisos voluntarios de mitigación ambiental.

El presente documento entrega un análisis detallado de la hidroquímica de las aguas subterráneas alrededor del complejo industrial Radomiro Tomic con el objetivo de caracterizar el comportamiento hidroquímico e isotópico de las aguas subterráneas en el entorno del complejo industrial RT, evaluar la distribución espacial y temporal de la pluma identificada y analizar sus características en relación con las potenciales fuentes históricas reconocidas en el sector.

El análisis hidroquímico presentado en este documento se basa en la compilación de información entregada por Codelco en el marco de actualizaciones de los modelos hidrogeológicos conceptuales y numéricos del complejo industrial RT (WSP, 2018; Hídrica, 2023); y de monitoreos de seguimiento ambiental (Plan voluntario ambiental PVA).

Las estaciones de monitoreo de aguas fueron seleccionadas y categorizadas según la distribución espacial y relación con la posible pluma en 4 grupos: aguas naturales, aguas del sector industrial , zona de mezcla y aguas abajo. Se evaluó las hidrofacies presente, la evolución de las concentraciones en el tiempo y relativo a los niveles freático, se determinó las relaciones iónicas e índices de saturación y, por último, se realizó un análisis multivariable para determinar un indicador combinado que permitiera evaluar el avance espacial y temporal de las características hidroquímicas de los sectores históricamente intervenidos en el sector industrial.

A partir de los análisis realizados, se reconoce que las aguas naturales presentan una variabilidad en la calidad química e isotópica, lo que dificulta la definición de concentraciones “background” para la implementación de una barrera hidráulica. La signatura isotópica ($\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$) de las aguas naturales varía dependiendo de la subcuenca en la cual se ubican los puntos de monitoreo, debido principalmente a la diferente altura de recarga de las aguas en dichas subcuencas.

Las aguas históricamente intervenidas presentan concentraciones elevadas de analitos, tales como sulfato, cloruro, sodio y nitrato, entre otros. La isotopía de la molécula de agua indica que se encuentran empobrecidas con respecto a las aguas naturales del sector (PCH-26 y PCH-27), debido a que el agua ocupada en el proceso minero corresponde a una mezcla de aguas del sector y aguas que provienen de Estanque de Agua de San Pedro, Colana e Inacaliri, recargadas a una mayor altura y menores temperaturas, consecuentemente con una marca isotópica más empobrecida en $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$.

Las aguas subterráneas de la zona de mezcla se agruparon en proximales (PCH-14, PCH-16B y PCH-18) y distales (P-7, P-8 y PCAR-1) según la distribución de los pozos respecto del complejo industrial. Estas aguas presentan características químicas intermedias entre aguas industriales y naturales; y al igual que las aguas naturales, presentan una marcada diferencia en su signatura isotópica debido a los aportes de las subcuencas donde se

encuentran. Por lo tanto, no es posible utilizar los isótopos de la molécula de agua como trazadores del avance de la pluma para determinar del porcentaje de mezcla de aguas frescas y del sector industrial, enfoque clásico de dilución hacia aguas abajo.

A partir del análisis de relaciones iónicas, índices de saturación y análisis multivariable, se evidencia que existen 2 procesos que controlan principalmente la calidad química en la zona de estudio: 1) meteorización de silicatos y sulfuros de las aguas del sector industrial con aguas enriquecidas en $\delta^{18}O$ y empobrecida en $\delta^{34}S$; y 2) meteorización de rocas sedimentarias con niveles evaporíticos que involucra la disolución de yeso, calcita y/o haluros y con aguas empobrecidas con respecto a $\delta^{18}O$, con una posible recarga a mayor altura que las aguas industriales.

El análisis de factores principales destaca el hecho que los analitos aportados por las aguas representativas de sectores históricamente intervenidos dentro del sector industrial RT, tales como sulfatos, nitratos, calcio, etc., también son aportados naturalmente por las rocas de los acuíferos aguas abajo, lo que dificulta la interpretación de las series de tiempo de las concentraciones de elementos. Por lo tanto, el uso de sulfato o cloruros, como un trazador de la pluma histórica de las infiltraciones, puede llevar a interpretaciones erróneas ya que estos parámetros no son conservativos en la zona de RT.

A partir de los análisis realizados, se seleccionó un indicador químico, compuesto por sulfato, cloruro y nitrato. La distribución espacial y temporal de este indicador permitió observar que la pluma se detecta en el pozo P-8 y PCAR-1 desde el 2016, pero no es evidente en los pozos PCH-16B y PCH-18 previo al 2023, año en el cual ya se detecta la pluma en el PCH-14. Así, la instalación de la barrera hidráulica se debería evaluar aguas abajo del sector industrial, en el cual se ha demostrado una afectación histórica.

EQUIPO TÉCNICO RESPONSABLE

José Yánez – Hidrogeólogo Principal

Ingeniero Civil, P. Universidad Católica de Chile, MSc. U. Politécnica de Cataluña, España. CGWP-NGWA, USA.

Claudia Martínez – Hidrogeóloga Principal

Geóloga, Universidad de Chile.

Paula Ramírez – Hidrogeoquímica Principal

Geóloga, Universidad de Chile. PhD, Imperial College; MSc Geología, Universidad de Chile.

María Jesús Fuentes – Hidrogeoquímica de Proyecto

Geóloga - Universidad de Chile.

Paloma Castillo – Hidrogeoquímica Junior

Geóloga – Universidad Andrés Bello

CONTENIDOS DEL INFORME

RESUMEN EJECUTIVO ..... **iii**

1 INTRODUCCIÓN **1**

1.1 Objetivo del documento 1

1.2 Alcances abordados en el informe 2

1.3 Área de estudio 2

2 METODOLOGÍA **4**

2.1 Revisión de antecedentes 4

2.2 Validación de Datos Químicos 7

2.3 Hidrofacies 7

2.4 Relaciones Iónicas 8

2.5 Índices de Saturación 9

2.6 Análisis Isotópico 9

2.7 Análisis Multivariable 11

3 CARACTERÍSTICAS HIDROQUIMICAS E ISOTOPICAS **13**

3.1 Selección de estaciones de monitoreo 13

3.2 Control de calidad 17

3.3 Evolución en el tiempo 18

3.4 Relaciones Iónicas 27

3.5 Índice de Saturacion 33

3.6 Analisis Isotópico 37

3.7 Análisis Multivariable 44

4 CONCLUSIONES **52**

5 REFERENCIAS **54**

ANEXOS **56**

Anexo A: Evolución temporal de calidad química ..... **Error! Bookmark not defined.**

1 INTRODUCCIÓN

La Gerencia de Planificación del Distrito Norte (GPDN) de la Vicepresidencia de Operaciones Norte de Codelco ha llevado a cabo una serie de trabajos relacionados con la hidrogeología en el área de influencia directa del proyecto minero Radomiro Tomic. Este proyecto minero, que ha sido calificado de manera favorable ambientalmente, busca mantener operativa la línea de hidrometalurgia y explotación de sulfuros existentes, además de incorporar nuevos recursos mineros identificados en fases de expansión del rajo norte y este.

Como parte de los compromisos voluntarios adquiridos, Radomiro Tomic se ha propuesto realizar un estudio orientado a actualizar el entendimiento hidrogeológico e hidroquímico del sector, incluyendo la evaluación de posibles vías preferenciales de flujo y mecanismos de transporte asociados a la pluma de sulfatos identificada aguas abajo del complejo industrial . Este estudio busca actualizar el entendimiento del funcionamiento hidrodinámico del paleocanal que ha sido descrito al NE del rajo y evaluar alternativas para interceptar la pluma de aguas sulfatadas que por ahí circulan, respaldando técnicamente las decisiones tomadas en el contexto normativo.

Este informe detalla la metodología y el análisis de la evolución temporal y espacial de las aguas subterráneas aguas abajo del sector industrial.

1.1 OBJETIVO DEL DOCUMENTO

El **objetivo general del servicio** es determinar las mejores alternativas de intercepción de la pluma de alteración de sulfatos evaluada en modelos conceptuales y numéricos anteriores.

El **objetivo de este documento** es evaluar las características hidroquímicas e isotópicas de las aguas del sector industrial, aguas arriba y aguas abajo de este para establecer las características propias de las infiltraciones. Los objetivos específicos corresponden a:

- Evaluar la calidad química e isotópica de las aguas subterráneas con respecto al nivel freático para establecer posibles correlaciones.
- Determinar las relaciones iónicas y calcular los índices de saturación de minerales que pudiesen estar reaccionando en las aguas subterráneas.
- Determinar los principales procesos geoquímicos que controlan la calidad del agua considerando tanto elementos químicos como isotópicos.

1.2 ALCANCES ABORDADOS EN EL INFORME

Los alcances abordados en este documento son:

- Revisión y compilación de bases de datos existentes.
- Análisis de hidrofacies y evaluación espacial y temporal de la calidad química de los diferentes tipos de aguas.
- Análisis isotópico de la molécula de agua y de azufre en la molécula de sulfato
- Evaluación de relaciones iónicas e índices de saturación de minerales
- Análisis estadístico univariable y multivariable de la información química e isotópica

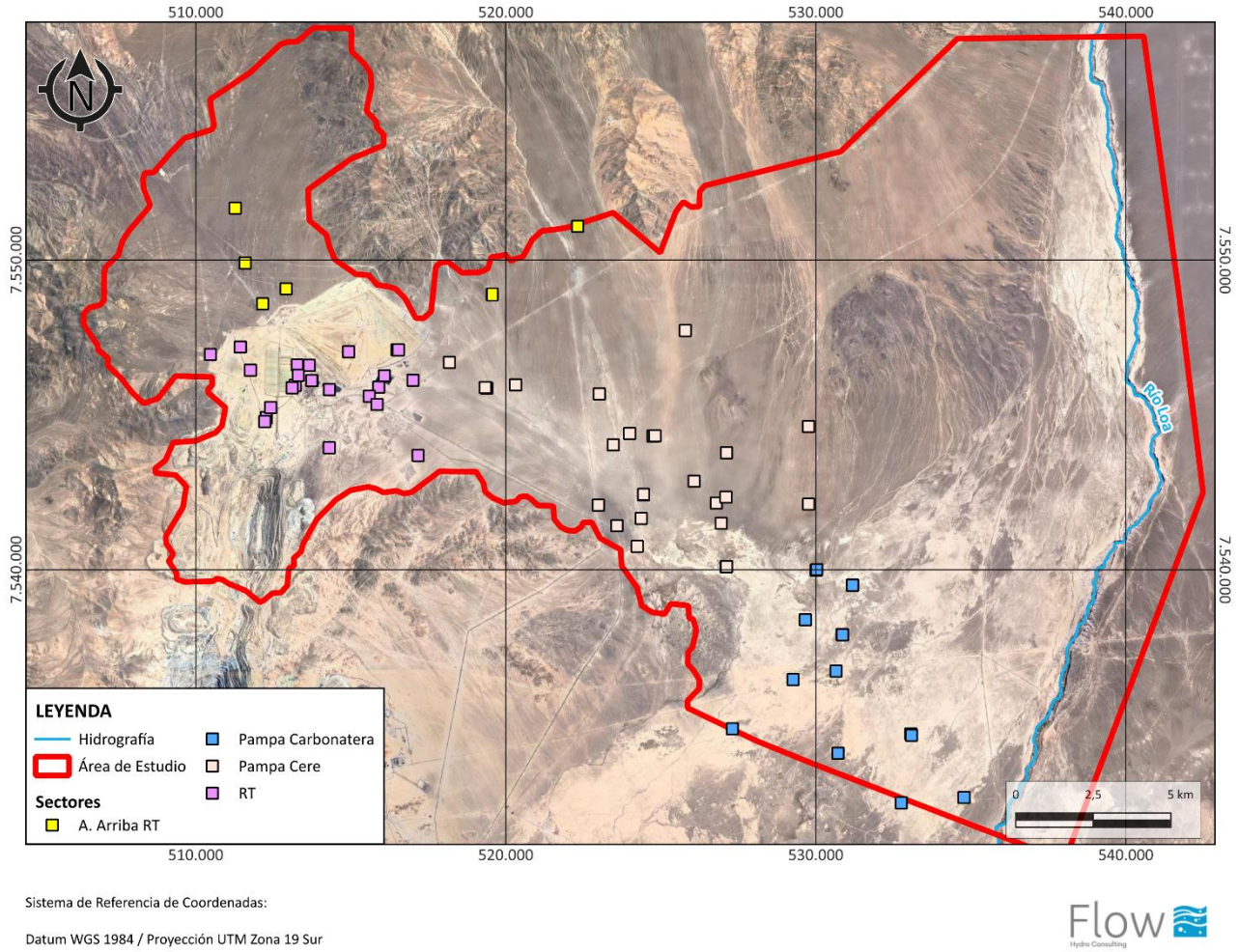
1.3 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio para la caracterización hidroquímica se extiende desde la cabecera de la subcuenca donde se emplaza el complejo industrial de Radomiro Tomic hasta el sector de Pampa Cere, de manera tal de entender las diferentes calidades químicas naturales y comprender las calidades químicas de las posibles fuentes a fin de delimitar la extensión del avance de la pluma de contaminación. La definición del área de estudio consideró la distribución espacial, el contexto hidrogeológico y la potencial influencia de actividades históricas desarrolladas en el sector industrial.

El área de estudio definida para el análisis localizado del paleocanal – y su respectiva relación con la pluma de existente – consideró criterios tanto geológicos como hidrogeológicos, que fueron analizados en conjunto con la disponibilidad de información de monitoreo de niveles freáticos y de calidad del agua subterránea en el sector de interés.

En primer lugar, se utilizó un modelo de elevación digital (DEM) y la geología a detalle disponible (1:140.000 WSP, 2018) con la finalidad de discernir entre la roca basal y los depósitos sedimentarios de la cuenca – determinando así el contacto roca relleno –, lo que permitió establecer los límites norte y sur del área de estudio. Al noroeste y noreste, aguas arriba del sector RT, se consideró el cierre incluyendo dentro del área de estudio los pozos de monitoreo más cercanos a la zona industrial con el objetivo de contar con sus registros para el análisis respectivo. Por su parte, la revisión de la piezometría del acuífero principal existente en el sector, en conjunto con la última extensión modelada de la pluma de sulfatos (Hídrica, 2023) permitió establecer el límite este y sureste del área de estudio, considerando como límite este el río Loa. En la Fuente: Elaboración propia.

Figura 1-1 se presenta el área de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1-1: Área de estudio con los puntos de monitoreo considerados para la caracterización

2 METODOLOGÍA

2.1 REVISIÓN DE ANTECEDENTES

Para el entendimiento del origen y características de la pluma de sulfatos se compiló información a partir de fuentes de información tales como modelos hidrogeológicos y estudios de filtraciones de RT (SGA, 2019; WSP, 2018; Hídrica, 2023), planes de vigilancia ambiental (PVA; Amphos21, 2020; Amphos21, 2022), análisis hidroquímico e isotópico (WSP, 2017; Hídrica, 2022, Amphos21, 2023), minutas de terreno (Hídrica, 2022).

2.1.1 Estaciones de monitoreo

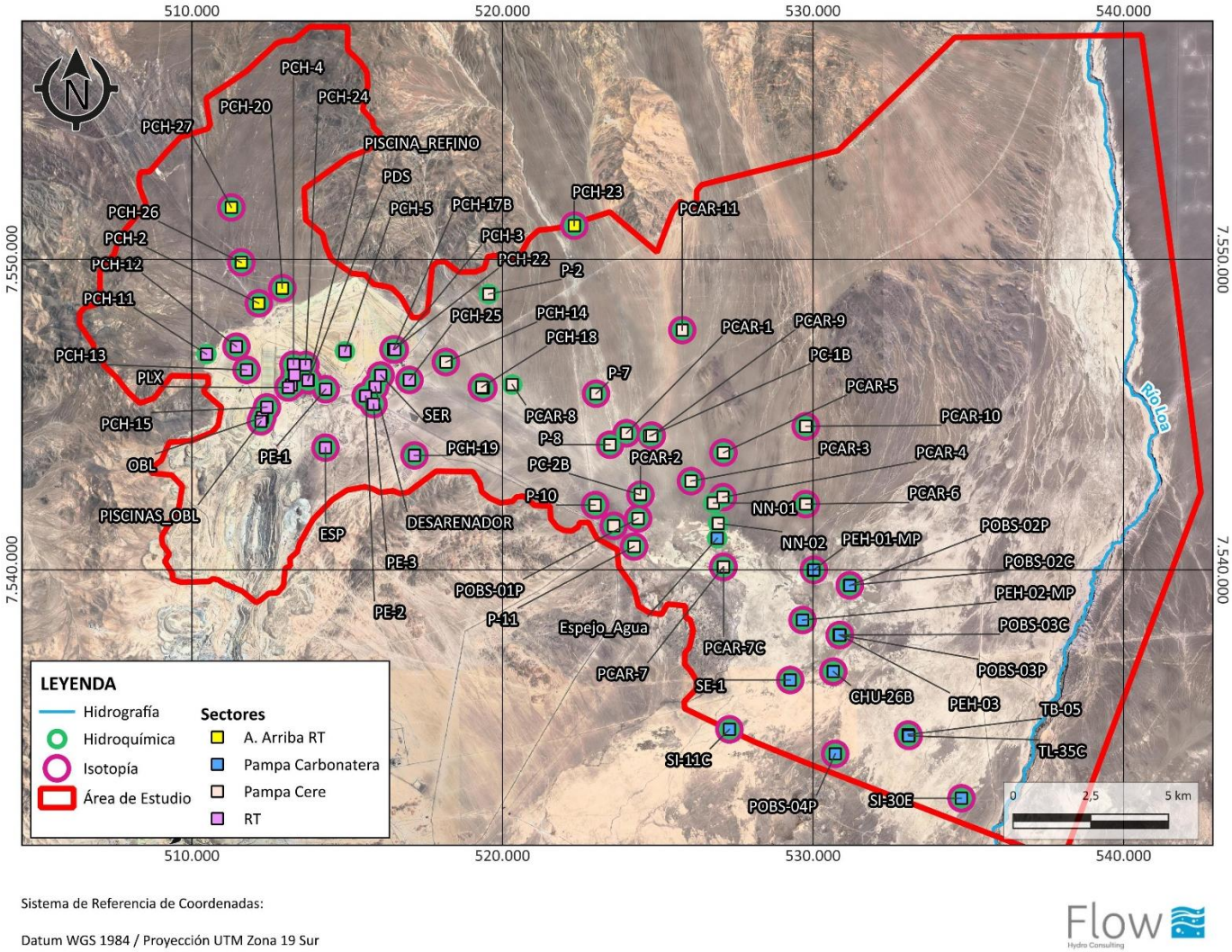
El total de estaciones de monitoreo dentro del área delimitada es 67, las que fueron diferenciadas como estaciones de aguas subterráneas, ya sean naturales, contactadas o de mezcla y aguas superficiales del sector industrial , se detallan según sectores, los que corresponden a ‘’RT’’, ‘’Pampa Cere’’ y “Pampa Carbonatera” como se observa en la Figura 2-1.

En los modelos hidrogeológicos revisados, se reconocen diferentes sectores, siendo de interés para esta caracterización separar el sector RT, considerando tres subsectores; aguas arriba del Complejo Industrial Radomiro Tomic (CIRT), CIRT y aguas abajo de CIRT. Los pozos y estaciones de monitoreo de aguas se categorizan por sector en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Sectores considerados en el análisis de la pluma de sulfato

Sector	Subsector	Pozos
RT	Aguas arriba CIRT	PCH-27, PCH-26, PCH-2, PCH-20, PCH-11
	CIRT	PCH-12, PCH-13, aguas industriales superficiales (13 estaciones)
	Aguas abajo CIRT	PCH-15, PCH-4, PCH-24, PCH-5, PCH-17B, PCH-3, PCH-2, PCH-25
Pampa Cere	Oeste	PCH-14, P-2, PCH-23, PCAR-11, PCH-19, PH-18, PCH-16B, PCAR-8
	Este	P-7, P-8, PCAR-1, PC-1B, PCAR-9, PCAR-2, PC-2B, P-10, PCAR-3, PCAR-4, PCAR-5, NN-01, NN-02, P-11, AR-1569, POBS-01P
Pampa Carbonatera		PEH-01-MP, PEH-02-MP, POBS-02P, POBS-02C, POBS-03C, POBS-03P, PEH-03, TB-05, TL-35C, SI-30E, POBS-04P, SI-11C, SE-1, CHU-26B, espejo de agua.

Fuente: Elaboración propia



Sistema de Referencia de Coordenadas:

Datum WGS 1984 / Proyección UTM Zona 19 Sur

Fuente: Elaboración propia

Figura 2-1: Estaciones de monitoreo hidroquímico e isotópico en el sector de estudio

2.1.2 Incertidumbre

A partir de la revisión y compilación de los datos químicos e isótopos de los informes revisados, la metodología de la toma de muestra y análisis y la información litológica y mineralógica en profundidad, se detallan los puntos más relevantes y cómo estos pueden impactar en el análisis de los procesos que controlan la química de las aguas de la zona de estudio y el control del avance de la pluma de contaminación:

- La información para el desarrollo del análisis hidroquímico e isotópico se basó en una base de datos compilada por FLOW a partir de planillas con los resultados de los monitoreos en el marco de los modelos conceptuales y monitores PVA.
- Se confirmó con Codelco que la toma de muestras se realiza con bailer y sin purga, por lo que captura la parte superior del nivel freático. Esto impacta de manera directa en la captura y control de avance de la pluma de contaminación. Se ha observado en los perfilajes de los pozos de la zona de mezcla, a partir del comportamiento de la conductividad eléctrica/salinidad, que existe una estratificación del acuífero.
- Se cuenta con solo 3 campañas de muestreo isotópico con monitoreo de diferentes puntos en la zona de estudio. En particular, se observa falta de información química/isotópica entre PCH-18 y P-8 (isotopos: 1 dato).
- Respecto de la información de química e isotopía de zonas alejadas de RT, se cuenta con un dato de monitoreo del pozo P-2 y registros del pozo PCH-23 entre abril de 2011 y octubre de 2017.
- Existe poca información litológica sobre la composición de las rocas en profundidad, la estratigrafía está enfocada en la descripción granulométrica e hidrogeológica de las rocas, con el enfoque de agrupación de unidades hidrogeológicas.

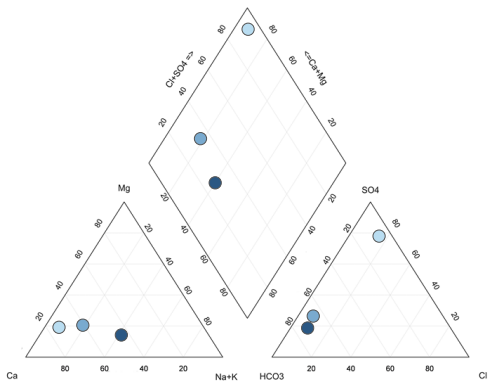
2.2 VALIDACIÓN DE DATOS QUÍMICOS

El balance iónico indica si existe un equilibrio entre cationes y aniones de la muestra de agua. En una muestra de agua, la cantidad de iones con carga positiva en solución (cationes) debe equilibrar la cantidad de iones con carga negativa (aniones). Esta comprobación debería arrojar un valor de 0% si los cationes y aniones están perfectamente equilibrados, aunque se acepta que valores entre ± 10% son satisfactorios para esta prueba. Para la validación de los datos se utilizará como límite un error de balance iónico inferior o igual al 10%. El error de balance iónico (EBI) se calcula mediante la siguiente fórmula definida por Standard Method (SM 1030 E):

$$Error\ de\ Balance\ Iónico\ (\%) = \frac{(\sum Cationes - \sum Aniones)}{(\sum Cationes + \sum Aniones)} \times 100$$

2.3 HIDROFACIES

En primer lugar, se utilizó la clasificación de facies hidroquímicas según el diagrama de Piper (1944). Este diagrama se muestra en la Figura 2-2 y consiste en un diagrama ternario de los aniones mayoritarios (Cl^-, SO_4^{2-}, $HCO_3^- + CO_3^{2-}$), un diagrama ternario de los cationes mayoritarios (Ca^{2+}, $Na^+ + K^+$, Mg^{2+}) y un rombo en el cual se proyecta los puntos desde ambos triángulos. El rombo está dividido en campos correspondientes a la clasificación final del agua. Los diagramas ternarios representan las composiciones porcentuales relativas entre 3 variables, por lo cual en este caso se suma la composición de los cationes sodio y potasio ($Na^+ + K^+$) en solo un vértice y de los aniones carbonato y bicarbonato ($CO_3^{2-} + HCO_3^-$) en solo un vértice. Este tipo de diagrama facilita la evaluación de cambios en el tiempo de las diferentes calidades y estimar posible fuentes.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-2: Ejemplo de diagrama de Piper

2.4 RELACIONES IÓNICAS

Las relaciones entre elementos mayores, expresados en miliequivalentes o concentración molar, permiten identificar fuentes naturales o aportes de elementos que experimentan las aguas debido al contacto agua-roca o agua-fuente, indicando el terreno que interactúa o procede el agua, fenómenos modificadores o características específicas del agua (Hounslow, 1995). Para este estudio se ha considerado los siguientes analitos, expresados en meq/l, y relaciones iónicas:

- Calcio versus sulfato: relación que busca establecer procedencia del calcio, posibles fuentes yeso, oxidación de pirita, intercambio iónico, precipitación /disolución de calcita y/o disolución de silicatos
- Sodio versus cloruro: relación que busca establecer el origen del sodio como posibles fuentes halita, disolución de albita, intercambio iónico, agua de mar.
- Bicarbonato versus sílice: relación que busca establecer si existe meteorización de rocas carbonatadas o silicatadas.
- Magnesio versus calcio: relación que establece con más detalle la clasificación anterior, indicando que tipo de meteorización: meteorización de rocas carbonatada (dolomita o caliza) o silicatadas (rocas del tipo graníticas o basálticas).

La Tabla 2-2 resume los rangos y procesos geoquímicos asociados para cada relación iónica analizada.

Tabla 2-2: Relaciones iónicas con los respectivos rangos y procesos asociados.

Rango / R.I	$Ca/Ca+SO_4$	Rango / R.I	Na/Na+Cl	Rango / R.I	HCO_3/SiO_2
>0.5	Fuente de calcio desde carbonatos o silicatos	>0.5	Intercambio iónico	>10	Meteorización de carbonatos
=0.5	Disolución de yeso	=0.5	Disolución de halita	5<R.I<10	ambiguo
R.I<0.5 pH<5,5	Oxidación de pirita	R.I<0.5 TDS>500	Agua de mar	<5	Meteorización de silicatos
R.I<0.5	Intercambio iónico o precipitación de calcita	R.I <0.5 50<TDS<500	error		
pH neutro		<0.5 TDS<50	agua de lluvia		

Fuente: Elaboración propia

2.5 ÍNDICES DE SATURACIÓN

El estado de equilibrio del agua con respecto a una fase mineral determinada puede ser determinada calculando el índice de saturación. Los cambios en los índices de saturación de las aguas permiten distinguir diferentes etapas en la evolución hidroquímica y permite identificar las reacciones geoquímicas que podrían estar controlando la química del agua.

El índice de saturación (IS) se calcula a partir de la razón logarítmica entre el producto de actividad iónica de las especies en solución (PAI) con respecto a la constante del producto solubilidad (Ksp):

$$\text{IS}(\text{mineral}) = log_{10}\left(\frac{\text{PAI}}{\text{K}_{sp}}\right)$$

Si IS = 0 la composición del agua refleja equilibrio de solubilidad con respecto a una fase mineral específica. En la práctica, se asume en equilibrio cuando el IS varía entre el rango -0,05 a 0,05 (Merkel y Nordstrom, 2008). Si IS < 0, la composición del agua sugiere que se encuentra subsaturada o con tendencia de disolver el mineral. Por último, si IS > 0 la composición del agua sugiere que se encuentra sobresaturada, por lo tanto, incapaz de disolver más del mineral, o bien con tendencia a precipitar el mineral.

Para determinar los índices de saturación de las aguas de los puntos de monitoreo de la zona de estudio, se ha ocupado el software termodinámico PHREEQC versión 3 (2021; Parkhurst y Appelo, 2013), utilizando la base de datos geoquímicos Minteq. Esta base de datos fue editada para incluir el molibdeno, para lo cual se ocupó las especies y reacciones definidas en la base de datos termodinámicos MinteqV4 (2016).

Los minerales de interés ocupados para el análisis de las aguas subterráneas son yeso y calcita, minerales que se reconocen ampliamente en las rocas de la zona de estudios.

2.6 ANÁLISIS ISOTÓPICO

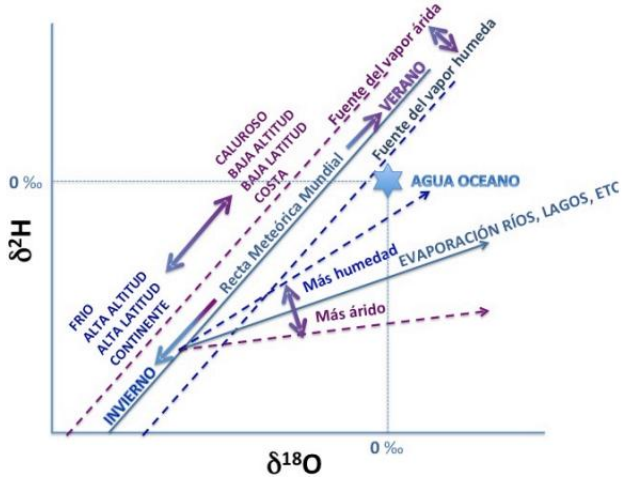
Los isotopos del agua, oxígeno (^{18}O) y deuterio (^{2}H o D), son utilizados en estudios hidrogeológicos ya que al ser parte de la molécula del agua son, por lo tanto, también parte del ciclo hidrológico. Las aguas de precipitación están influenciadas por el fraccionamiento isotópico debido al efecto de altura geográfica, temperatura y la cantidad de precipitación. La Figura 2-3 y Figura 2-4 presentan las modificaciones en el contenido isotópico de las aguas superficiales y subterráneas, respectivamente, producto de diferentes procesos hidrológicos e interacción agua-roca. Las precipitaciones de diferentes partes del mundo definen la línea meteórica mundial (LMM; Craig, 1961) como:

$$\delta^{2}H = 8 \times \delta^{18}O + 10$$

Esta línea ha sido encontrada en la signatura isotópica de aguas muestreadas alrededor de todo el mundo, con variaciones mínimas locales que forman “Líneas de Agua Meteóricas Locales” (LML). Luego, la LMM y la LML se

interpretan como una referencia para entender los distintos procesos que afectan las aguas, tales como evaporación, mezcla de aguas, variaciones estacionales y gradiente de temperatura por efecto de la altura, y permiten así inferir el origen y transporte de las aguas superficiales y subterráneas.

Un aspecto importante de las LML es que la ubicación de la composición isotópica de las precipitaciones a lo largo de ellas está influenciada por la altitud geográfica de la precipitación: agua precipitada a mayor altitud geográfica estará más empobrecida isotópicamente que agua precipitada a menor altitud. Esto se debe principalmente a 2 factores: 1) aguas arriba la lluvia procede de masas de vapor progresivamente empobrecidas isotópicamente debido a pérdida de isótopos pesados durante lluvias precedentes; 2) la menor temperatura a mayor altitud induce un mayor fraccionamiento isotópico durante la condensación del vapor. La relación exacta con la altitud de la precipitación depende de la topografía local y la distancia a la costa. La Figura 2-3 resume los principales procesos hidrológicos que afectan la composición hidrológica del agua.



Fuente: www.ub.edu

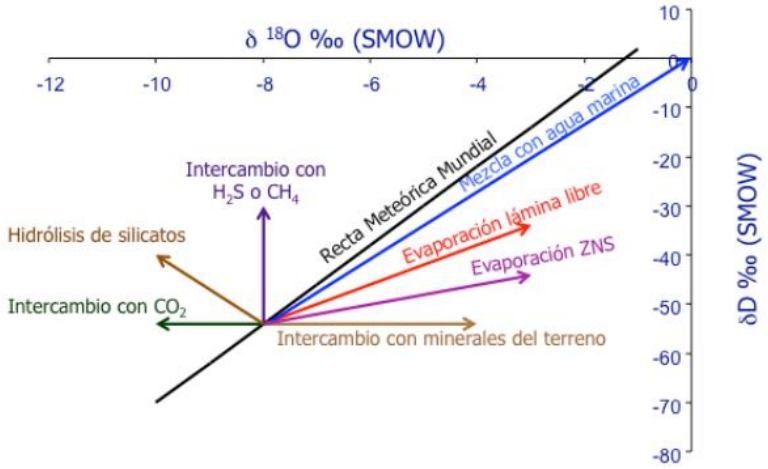
Figura 2-3: Resumen de procesos que modifican la composición isotópica de aguas superficiales

Por otra parte, en las aguas subterráneas, en general, en climas templados y húmedos, su composición isotópica es similar a la composición isotópica media de las precipitaciones en el área de recarga, de modo que esto sirve para identificar zonas de recarga y trayectorias de flujo de aguas subterráneas. Diferencias entre la isotopía de las aguas subterráneas y las precipitaciones del área de recarga pueden producirse por procesos tales como los siguientes:

1) Las precipitaciones sufren cierto grado de evaporación previamente a la recarga del acuífero.
2) Las aguas tienen grandes tiempos de residencia, de modo que las condiciones climáticas en que ocurrió la recarga eran diferentes a las actuales.
3) Fraccionamiento isotópico durante procesos de interacción agua-roca, especialmente si el tiempo de residencia ha sido prolongado con respecto a la cinética de las reacciones de intercambio isotópico.

La Figura 2-4 presenta los diferentes procesos que pueden modificar la composición isotópica de aguas subterráneas, tales como evaporación, reacciones químicas, reacciones de intercambio y mezclas.

Por lo tanto, el análisis isotópico consiste en buscar agrupaciones de muestras que hayan sido expuestas a condiciones fisicoquímicas similares (precipitaciones, evaporaciones), definiendo así marcadores isotópicos diferenciados que permiten separar distintos tipos de agua, complementando los resultados obtenidos a través de las características químicas del agua.



Fuente: www.ub.edu

Figura 2-4: Resumen de procesos que modifican la composición isotópica del agua subterránea con respecto a las precipitaciones del área de recarga

2.7 ANÁLISIS MULTIVARIABLE

El análisis multivariable es una herramienta estadística que examina las relaciones entre varias variables al mismo tiempo, permitiendo identificar integralmente posibles fuentes de elementos, tendencias, correlaciones y cambios en las concentraciones de los elementos químicos del agua. En particular, el análisis de factores principales (AFP) permite identificar relaciones subyacentes de un grupo de variables y reducir la dimensionalidad de los datos, detectando la estructura oculta (o factores) de datos multivariables. En geoquímica, los factores corresponden a procesos controladores de la calidad química de los datos (Reimann, 2008).

Para utilizar AFP con muestras de calidad de agua se requiere que los datos sean preparados con el objetivo de reducir el ruido y mejorar su distribución. Lo anterior es de especial importancia dado que los datos químicos de calidad de agua consideran elementos físico-químicos, mayores, menores y trazas, los cuales tienen diferentes escalas y/o algunos parámetros son asociación de varios de ellos. Por otra parte, generalmente los datos químicos de muestras de aguas se encuentran sesgados fuertemente hacia la izquierda influyendo directamente en la covarianza y correlación de los datos y, por lo tanto, influyendo en los resultados de AFP.

Por lo tanto, los siguientes pasos se deben aplicar previo a la selección de AFP:

- **Homogenización de base de datos**: para resultados más estables se requiere seleccionar las variables de interés y muestras que contengan valores para las variables seleccionadas. Es de especial importancia evaluar la cantidad de valores bajo el límite de detección ya que pueden influenciar incorrectamente los resultados de la covarianza y correlación de los datos.
- **Revisión de resumen estadístico de cada variable**: cada variable debe ser estudiada con respecto a su distribución y rangos de variabilidad.
- **Transformación de variables**: para mejorar la distribución de cada variable se utilizará la transformación logarítmica o box-cox, la cual estima la mejor potencia que conlleva a una distribución normal de los datos. Adicionalmente, los datos serán centrados y escalados para que puedan ser comparable entre sí, considerando la existencia de elementos mayores, menores y trazas.
- **Detección de outliers**: valores extremos o outliers pueden influenciar fuertemente a AFP, por lo tanto, estos deben ser removidos.
- **Dimensionalidad para AFP**: dependiendo de la cantidad de muestras se debe seleccionar un set de variables que permitan resultados estables. Existen diferentes criterios para la selección de la cantidad de variables tales como $n > p^2$, o $n > 9p$, o simplemente $n > 8p$ (Reimann, 2008), donde n es el número de muestras y p la cantidad de variable. Como herramienta para reducir el número de variables, se utilizará la matriz de correlación con el objetivo de identificar las correlaciones fuertes entre parámetros (>0.8) y solo ingresar una variable. El AFP fue realizado en el software libre R y utilizando el paquete StatDAS.

3 CARACTERÍSTICAS HIDROQUIMICAS E ISOTOPICAS

3.1 SELECCIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO

A partir de la información disponible y del entendimiento de los diferentes procesos que afectan la zona de mezcla se realizó una selección de estaciones que permitieron dar cuenta del avance de la pluma. Para este propósito se indican en la Tabla 3-1 las estaciones seleccionadas, con la agrupación utilizada para la caracterización, indicando el rango de registro de datos que estas tienen.

Tabla 3-1: Estaciones de monitoreo utilizadas para la caracterización de la pluma y las fuentes de contaminación

Grupo	Subcuenca	Pozos	Fecha registro	Cantidad de registros
Aguas Naturales aguas arriba RT	8	PCH-27	14/05/2012 - 14/12/2023	122
	8	PCH-26	14/05/2012 – 14/12/2023	123
	9	P-2	16/06/2005	1
	9	PCH-23	29/04/2011 – 17/10/2017	74
	10	PCAR-11	04/11/2005 – 22/08/2023	204
	11	PCAR-10	30/08/2005 – 25/09/2023	209
Aguas Sector Industrial	8	PCH-24 (Pilas)	14/05/2012 - 27/12/2023	92
		PCH-19	29/04/2011 - 27/12/2023	67
		PCH-25 (Botadero)	14/05/2012 - 22/11/2023	73
Zona de mezcla Proximal	8	PCH-14	29/04/2011 - 14/12/2023	133
		PCH-18	10/05/2011 - 27/12/2023	137
		PCH-16B	27/04/2011 - 27/12/2023	113
Zona de mezcla Distal	9	P-7	25/09/3003 - 21/09/2023	210
		P-8	30/09/2003 - 21/09/2023	220
		PCAR-1	18/07/2005 - 21/09/2023	206
Aguas Naturales aguas abajo	8	P-10	24/10/2003 - 21/09/2023	205
	9	PCAR-9	12/08/2005 - 21/09/2023	1.007
	10	PCAR-3	26/07/2005 - 21/09/2023	218
	10	PCAR-4	30/07/2005 - 21/09/2023	218
	10	PCAR-5	02/08/2005 - 21/09/2023	210
	8-9	P-11	24/10/2003 - 21/09/2023	213
	8	AR-1569	30/09/2003 - 21/09/2023	213

Fuente: Elaboración propia

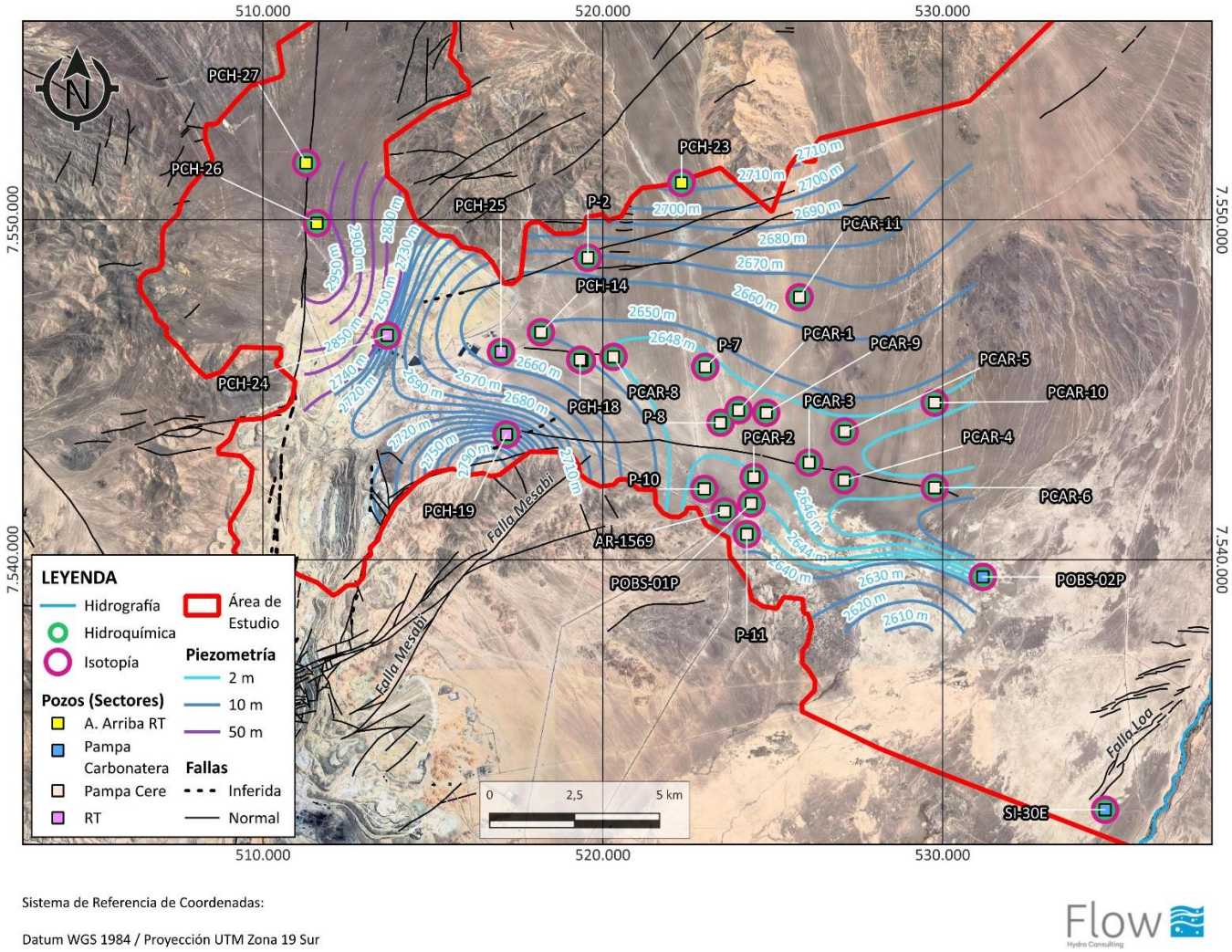
Según los antecedentes recopilados y los distintos modelos presentados, la Tabla 3-2 resume el avance de la pluma de contaminación en la zona de estudio y los parámetros que se utilizaron para delimitarla desde 2011 hasta 2022.

Tabla 3-2: Extensión de la pluma de contaminación y los parámetros considerados para definirla según cada modelo conceptual

Características	**Modelo 2011 (Geohidrología, 2011)**	**Modelo 2018 (WSP, 2017, 2018)**	**PVA 2020 (Amphos21, 2020)**	**Modelo 2022 (Hídrica, 2022, 2023)**
Extensión longitudinal	Posterior a P-8. La pluma de sulfato alcanza los 9km de longitud.	Posterior a P-8 y PCAR-1. La pluma de sulfato alcanza los 9,6 km de longitud aprox.	Antes de PCAR-9. La pluma de sulfato alcanza los 9,8 km de longitud aprox.	P-8 a PCAR-1. La pluma de sulfato alcanza los 9,8 km de longitud aprox.
Extensión lateral	Aproximado entre PCH-14 y P-8.	Aproximado entre PCH-14 y P-8.	Aproximado entre PCH-14 y P-8.	Aproximado entre PCH-14 y P-8.
Parámetros utilizados en definición de pluma	SO_4, Na, Cl.	SO_4, Cl, NO_3^- y Na.	SO_4^{2-}, Al y Cu	SO_4, Cl, NO_3^-
Isotopía utilizados en definición de pluma	$\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de la molécula de agua ^{34}S y ^{18}O de la molécula del sulfato disuelto.	$\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de la molécula de agua ^{34}S y ^{18}O de la molécula del sulfato disuelto.	$\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de la molécula de agua.	$\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de la molécula de agua. ^{34}S y ^{18}O de la molécula del sulfato disuelto.

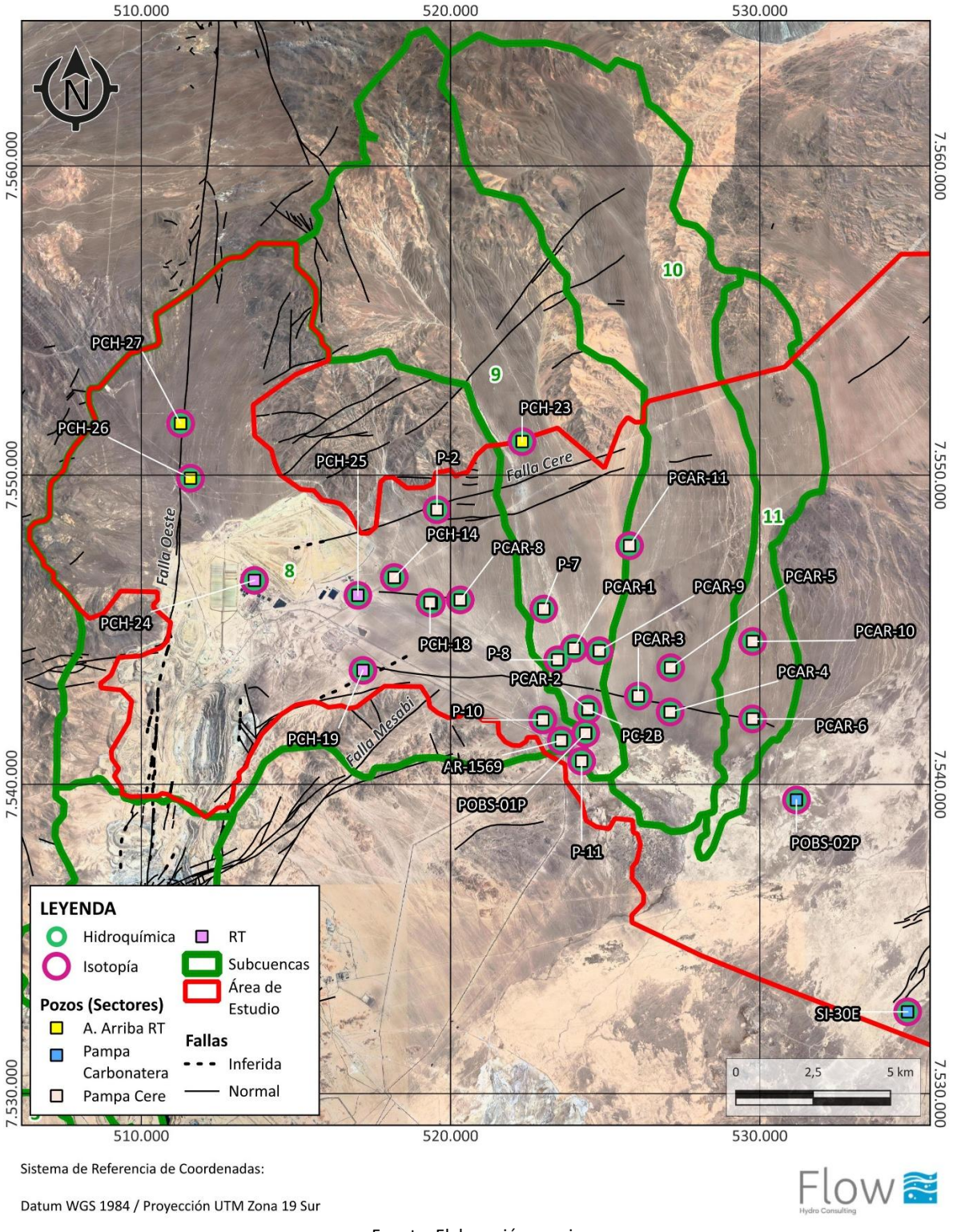
Fuente: Elaboración propia

La Figura 3-1 presenta las estaciones de monitoreo seleccionadas para la caracterización junto con las estructuras geológicas definidas o inferidas en la zona de estudio y la piezometría del modelo conceptual hidrogeológico (Hídrica, 2023). La Figura 3-2 presenta las estaciones de monitoreo seleccionadas y las subcuencas.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-1: Estaciones de monitoreo seleccionadas para la caracterización con piezometría de 2023 (Hídrica, 2023) y estructuras presentes



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-2: Estaciones de monitoreo seleccionadas junto con las subcuencas y estructuras presente

3.2 CONTROL DE CALIDAD

La Figura 3-3 presenta el error de balance iónico de los análisis de agua subterránea de las estaciones de monitoreo seleccionadas para cada sector. Se presentan datos disponibles desde 2003 correspondientes, entre otros, a las estaciones localizadas en el sector industrial. Se observa que los datos en su mayoría están dentro del rango de aceptabilidad de ±10%. Resulta importante notar que en el caso de las aguas industriales se produce un desplazamiento de mayor abundancia de aniones a mayor abundancia de cationes entre 2016 y 2017, lo que puede indicar un cambio en los aditivos de proceso como también podría ser un indicador de cambios en el mecanismo de muestreo y/o laboratorio de análisis de muestras.

La Tabla 3-3 presenta datos sobre la cantidad de análisis validados mediante error de balance iónico (EBI) en cada sector.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-3: Error de balance iónico de las muestras según sector

Tabla 3-3: Resumen de cantidad de análisis validados por el criterio del error de balance iónico en estaciones seleccionadas por cada Sector

Total de análisis por Sector	Naturales	Sector Industrial	Mezcla	Aguas Abajo
Cantidad con cálculo de EBI	778	1.066	2.190	1.610
10% < |EBI| ≤ 100%	45	270	121	61
|EBI| ≤ 10%	733	796	2.069	1.549

Fuente: Elaboración propia.

3.3 EVOLUCIÓN EN EL TIEMPO

La evolución en el tiempo de las aguas de la zona de estudio se realizó analizando las variaciones de nivel y las variaciones de concentración observadas de elementos de especial interés como son el sulfato, cloruro, nitrato y sodio, entre otros. Para el análisis se utilizaron series de tiempo y diagramas de Piper que son presentados según relevancia y agrupados en esta sección y las fichas por cada uno de los pozos se presentan en el Anexo A. A continuación, se listan las características más relevantes:

- Las aguas naturales presentaron una evolución en su composición hidroquímica, desde aguas sulfatas/cloruradas-sódico/cálcicas a sulfatadas-sódico/cálcicas o sulfatadas-cálcicas, con concentraciones de sulfato que varían entre 400-1.200 mg/l, indicando en algunos casos la disolución de minerales sulfatados y con ello contribuciones naturales de sulfatos al acuífero, mientras que en otros caso se observaron altas concentraciones de cloruro y sodio, con valores promedio de 700 mg/l y 600 mg/l respectivamente, indicando posiblemente contribuciones naturales de estos elementos a la zona de mezcla.
- Las aguas industriales evidenciaron una evolución en su composición hidroquímica, pasando de sulfatadas/cloruradas-sódicas a cloruradas-sódico/cálcicas, con concentraciones de sulfatos que varían entre 500 y 30.000 mg/l, cloruros entre 700 y 45.000 mg/l y nitrato entre 100 y 55.000 mg/l, siendo estos elementos la más relevante evidencia histórica de la influencia del sector industrial en conjunto con la marcada evolución hidroquímica de estas aguas.
- Las aguas subterráneas de la zona de mezcla se agruparon en proximales y distales según la distribución de los pozos respecto del complejo industrial. Las aguas subterráneas proximales, presentaron en general una evolución pasando de sulfatadas-sódicas a sulfatadas/cloruradas-sódico/cálcicas, con concentraciones de sulfato, cloruro y nitratos entre 500-2.000 mg/l, 80-1.400 mg/l y 1-1.300 mg/l respectivamente. Las aguas subterráneas distales evidenciaron una evolución en general pasando de cloruradas-sódicas a sulfatadas-calco sódicas, con concentraciones de sulfato, cloruro y nitratos entre 400-1.000 mg/l, 150-700 mg/l y 50-350 mg/l respectivamente.

3.3.1 Aguas Naturales

Las aguas subterráneas naturales se detectan en 6 pozos del sector: PCH-26, PCH-27, P-2, P-23, PCH-10 y PCH-11 (Figura 3-4). Los pozos PCH-26 y PCH-27, que corresponden a los ubicados al noroeste, aguas arriba del complejo industrial RT en la subcuenca 8, presentan niveles que descienden entre 10 y 20 cm en el periodo comprendido entre 2012 y 2016 y posteriormente se mantienen estables en el tiempo según el registro analizado hasta diciembre de 2023. Respecto a la evolución de las concentraciones en el tiempo, están son constantes en el registro comprendido entre 2012 y 2023 (Figura 3-4). Los valores de sulfato son de entre 800-1.000 mg/l, los valores de cloruro son de 80-150 mg/l, a excepción de los registros entre junio de 2017 y diciembre de 2018 que superan los 350 mg/l en PCH-26. Las concentraciones de nitrato van entre 40-100 mg/l entre 2012 y 2017, luego disminuyen en el periodo comprendido entre 2017 y 2021 a valores entre 10-50 mg/l, y hacia el final del registro

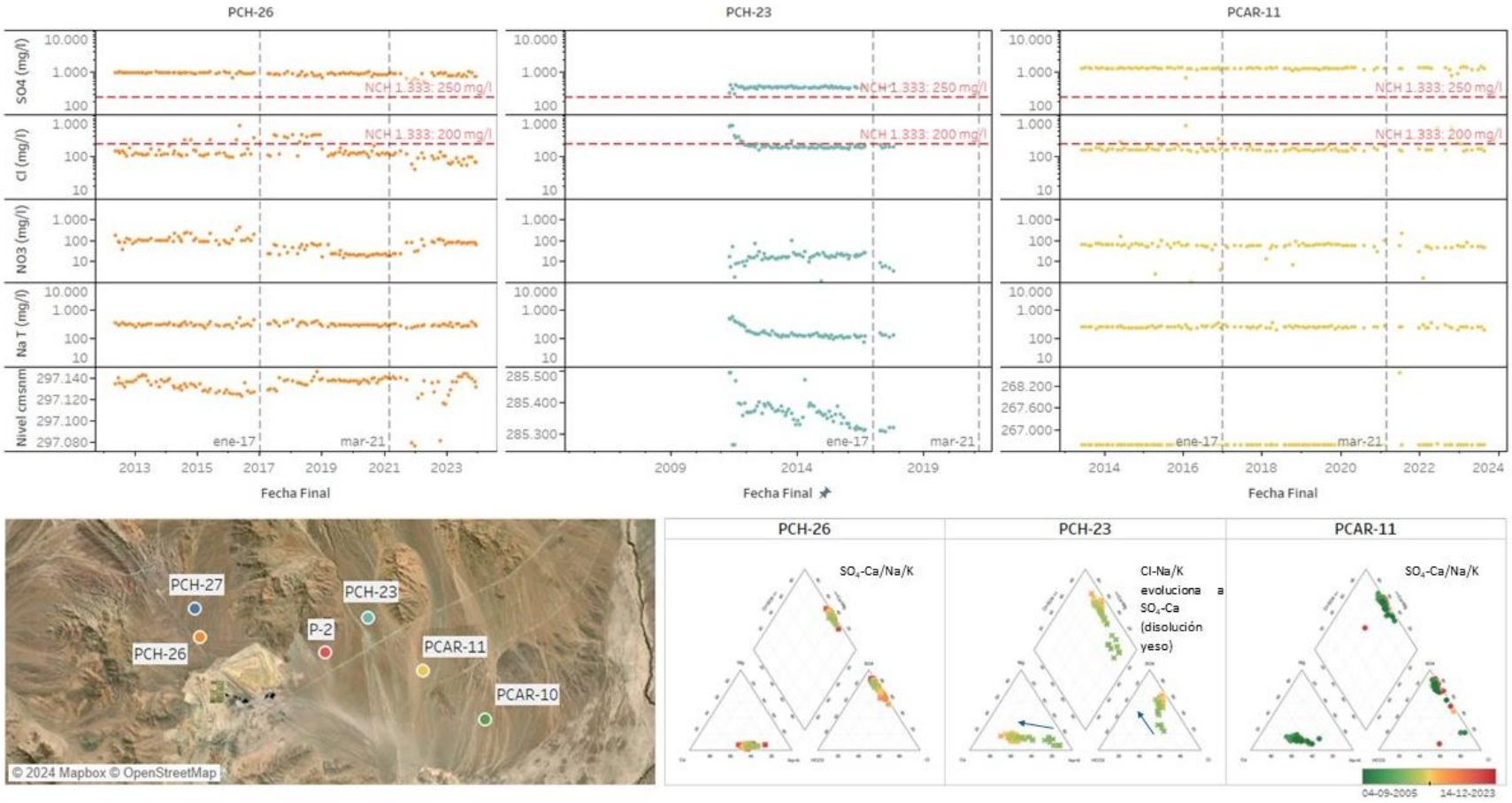
se restituyen los valores entre 40-100 mg/l. Las concentraciones de sodio se mantienen estables con valores que van entre 250 y 400 mg/l.

Los pozos PCH-23 y P-2, que corresponden a los ubicados al noreste aguas arriba del complejo industrial RT en la subcuenca 9, donde el pozo P-2 cuenta con un registro y no es posible realizar un análisis temporal. PCH-23 presentó niveles que descienden entre 10 y 20 cm en el periodo comprendido entre 2011 y 2016; y posteriormente solo se cuentan con registros de la segunda mitad de 2017 que indican un nivel estable. Respecto a la evolución de las concentraciones en el tiempo, estas son constantes en el registro comprendido entre mediados de 2012 y fines de 2023. Los valores de sulfato son de entre 400-500 mg/l, los valores de cloruro son de 160-170 mg/l. Las concentraciones de nitrato van entre 20-30 mg/l entre 2012 y 2017, luego disminuyen a valores inferiores a 10 mg/l. Las concentraciones de sodio se mantienen estables con valores que van entre 100 y 150 mg/l.

Los pozos PCAR-10 y PCAR-11, que corresponden a los ubicados al este aguas arriba del complejo industrial RT en la subcuenca 10 y 11 respectivamente, ambos presentaron niveles que descienden entre 20 y 40 cm en el periodo comprendido entre 2011 y 2016 y posteriormente se observaron registros que indican un nivel estable. Respecto a la evolución de las concentraciones en el tiempo, están son constantes en el registro comprendido entre mediados de 2012 y fines de 2023. Los valores de sulfato son de 500 mg/l para el pozo PCAR-10 y de 1.000 mg/l para el pozo PCAR-11, los valores de cloruro son de 650-750 mg/l para el pozo PCAR-10 y de 150 mg/l para el pozo PCAR-11. Las concentraciones de nitrato van entre 40-60 mg/l. Las concentraciones de sodio se mantienen estables con valores que van entre 250 y 350 mg/l para PCAR-11 y entre 550 y 650 para PCAR-10.

A partir de lo observado en el diagrama de Piper (Figura 3-4), las aguas naturales subterráneas de la zona de estudio dan cuenta de una evolución de la composición hidroquímica en el tiempo donde se incorporan sulfato y calcio, pasando de una composición sulfatas/cloruradas-sódico/cálcicas a sulfatadas-sódico/cálcicas o sulfatadas-cálcicas como se observa en la Figura 3-4.

Debido a la variabilidad de la calidad de las aguas naturales, como se vio previamente, se debe tener especial cuidado en la definición de concentraciones “background” en el caso de implementar una barrera hidráulica.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-4: Aguas naturales en el entorno aguas arriba del complejo industrial RT.

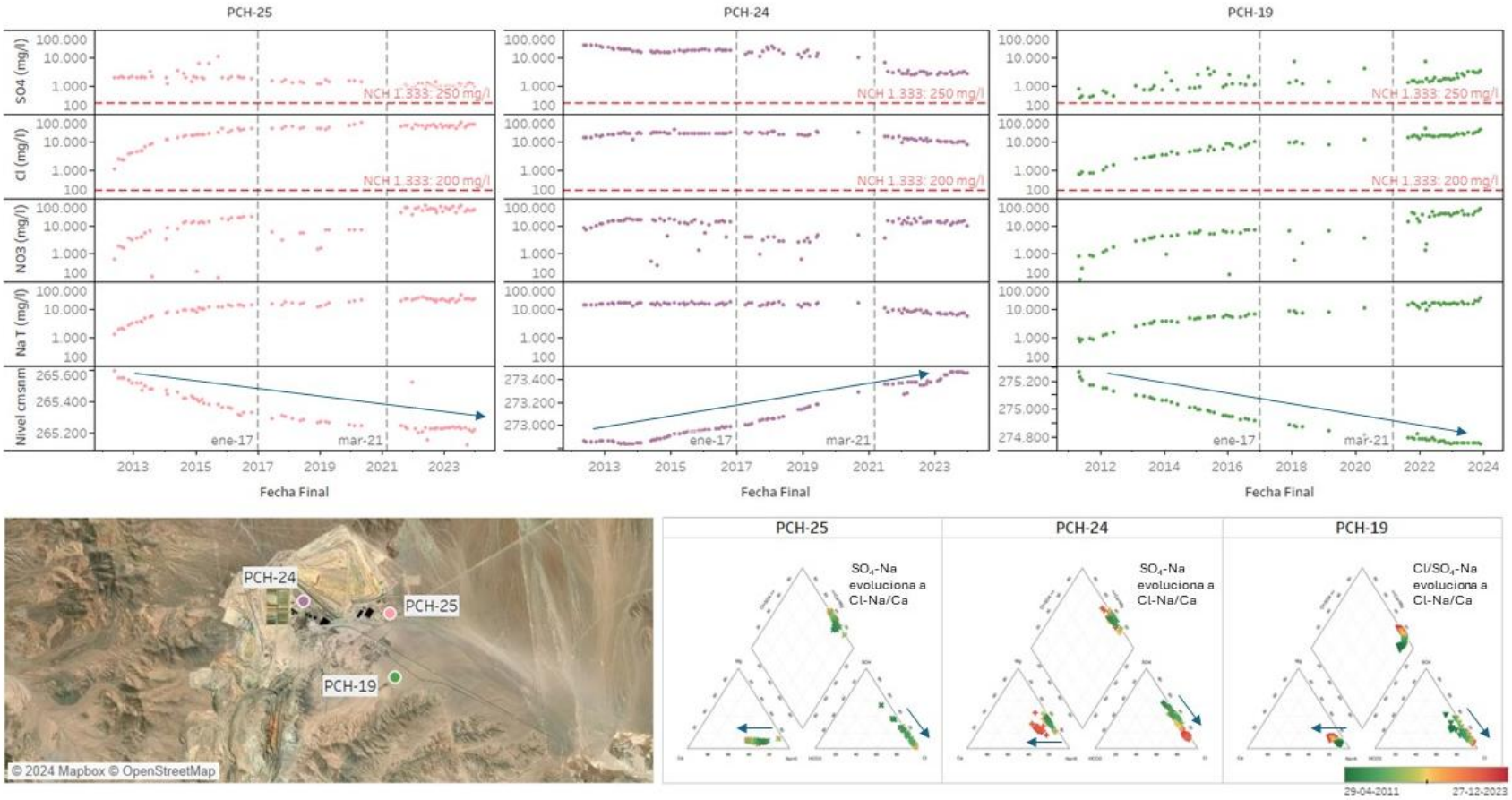
3.3.2 Aguas del Sector Industrial

En el caso de las aguas subterráneas del sector industrial, como se indica en la Tabla 3-1, existen 3 pozos en el sector permiten representarlas. Para representar sus características se presentan las series de tiempo, diagramas Piper y mapa de ubicación de los pozos PCH-25, PCH-24 y PCH-19 en la Figura 3-5.

Los pozos PCH-24 y PCH-25, se ubican al interior complejo industrial de RT aguas abajo de las pilas de lixiviación y del botadero de ripios, respectivamente, mientras que el pozo PCH-19 se ubica al sureste de la zona de estudio, este del rajo de RT. Estos puntos presentan características hidroquímicas diferenciadas respecto de las aguas naturales y permiten caracterizar la variabilidad de las aguas subterráneas en sectores históricamente intervenidos por la actividad minera.

Respecto a la evolución de las concentraciones en el tiempo, estas aumentan en su mayoría, a excepción del sulfato, en el registro comprendido entre 2011 y 2023. Los valores de sulfato en el pozo PCH-25 disminuyen de 2.000 a 1.000 mg/l y de 30.000 a 3.000 en el pozo PCH-24 y aumenta de 400 mg/l a 4.000 mg/l en el pozo PCH-19, los valores de cloruro aumentaron de 800 mg/l a 30.000 mg/l en el pozo PCH-19, de 1.000 mg/l a 45.000 mg/l en el poco PCH-25 y en el caso del PCH-24 se registró un aumento de 15.000 mg/l a 23.000 mg/l en el periodo comprendido entre 2011 y 2021 y, posteriormente descendió a concentraciones de 10.000 mg/l. Las concentraciones de nitrato van entre 600-8000 mg/l al comienzo del registro, aumentando hasta alcanzar valores de hasta 40.000 mg/l. Las concentraciones de sodio mantienen la tendencia observada en el cloruro, donde PCH-24 aumenta su concentración hasta 2021 desde 14.000 mg/l hasta 18.000 mg/l y luego disminuye a valores inferiores a 10.000 mg/l, mientras que los pozos PCH-25 y PCH-19 aumentan de valores de 1.000 mg/l a 25.000 mg/l en el periodo completo.

A partir de lo observado en el diagrama de Piper, las aguas subterráneas del sector industrial de la zona de estudio dan cuenta de una evolución de la composición hidroquímica en el tiempo donde se incorporan cloruro y calcio, pasando de una composición sulfatadas/cloruradas-sódicas a cloruradas-sódico/cálcicas como se observa en la Figura 3-5.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-5: Evolución hidroquímica de las aguas subterráneas en puntos representativos del sector industrial RT.

3.3.3 Zona de Mezcla

En el caso de las aguas subterráneas de la zona de mezcla, como se indica en la Tabla 3-1, 7 pozos en el sector permiten representarlas considerando la extensión de la pluma definida según diferentes autores y resumido en la Tabla 3-2. Para representar sus características se presentan las series de tiempo, diagramas Piper y mapa de ubicación de los pozos en la zona más proximal en la Figura 3-6 y de la zona más distal en la Figura 3-7.

Los pozos PCH-14, PCH-18 y PCH-16B, que corresponden a los ubicados en la zona de mezcla más proximal aguas abajo del complejo industrial RT en la subcuenca 8, presentan niveles que aumentan en promedio 24,5 cm/año, 19,3 cm/año y 18,9 cm/año respectivamente en el periodo comprendido entre 2011 y 2023. Respecto a la evolución de las concentraciones en el tiempo, estas aumentan en el registro comprendido entre 2011 y 2023, observándose dos saltos en las concentraciones, la primera en enero de 2017 y la segunda en marzo de 2021, donde se produjeron descensos de concentración que se atribuyen a cambios en el monitoreo (equipo de monitoreo y/o laboratorio).

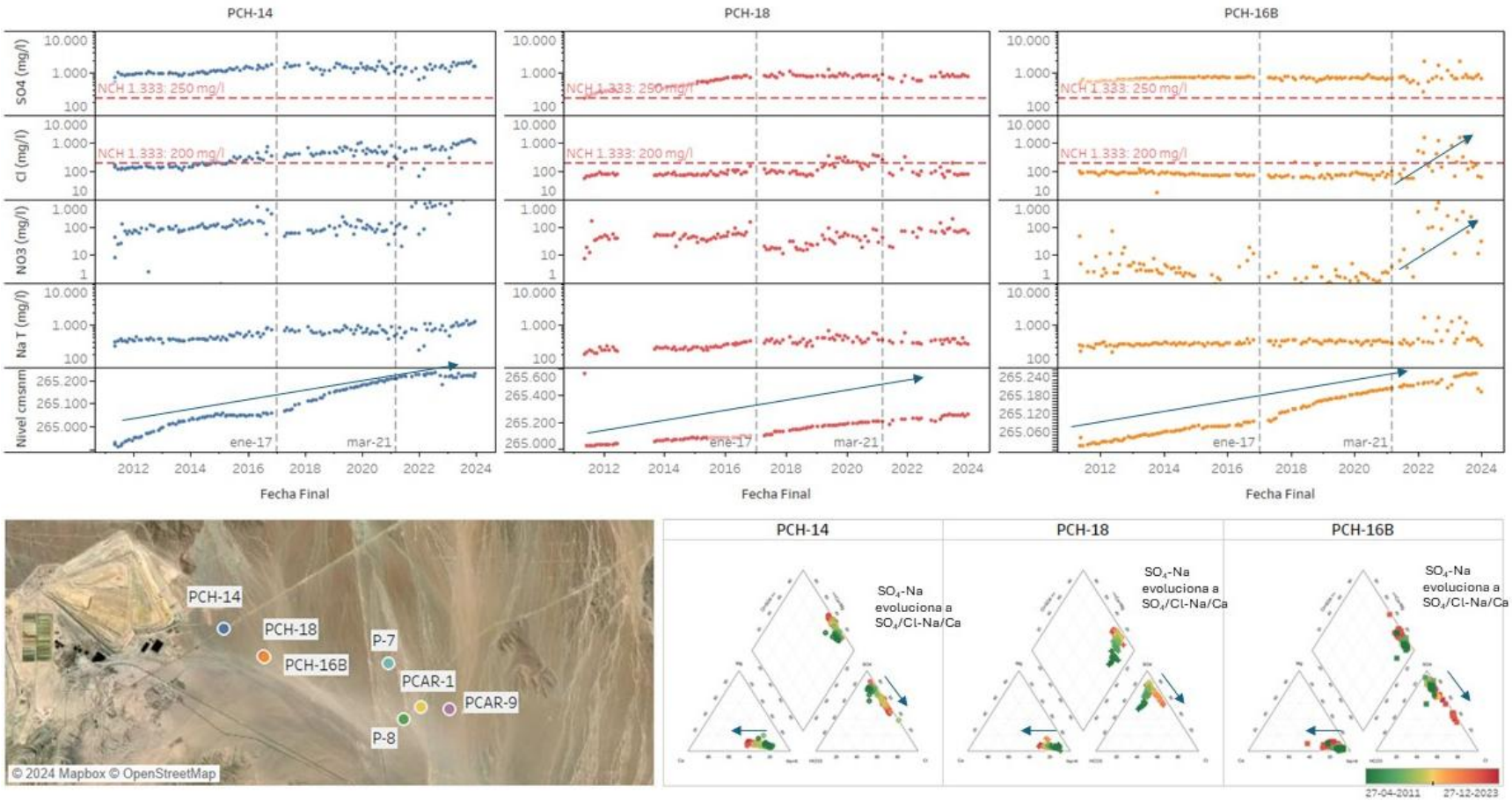
El pozo PCH-14 es el que presenta las mayores concentraciones de todos los elementos, con concentraciones de sulfato que incrementaron de 1.000 mg/l a 1.400 mg/l, valores de cloruro que variaron de 60 mg/l a 80 mg/l, las concentraciones de nitrato aumentaron de 20 mg/l a 1.200 mg/l y las concentraciones de sodio que registraron aumentos entre 320 mg/l y 1.200 mg/l. Luego, el pozo PCH-18, con concentraciones de sulfato que incrementaron de 400 mg/l a 800 mg/l, valores de cloruro que variaron de 120 mg/l a 1.400 mg/l, las concentraciones de nitrato aumentaron de 7 mg/l a 80 mg/l y las concentraciones de sodio que registraron aumentos entre 200 mg/l y 500 mg/l. Finalmente, el pozo PCH-16B, con concentraciones de sulfato que incrementaron de 600 mg/l a 900 mg/l (máximo de 1.900 mg/l puntual), valores de cloruro promedio de 80 mg/l que son estables hasta diciembre de 2020 y que luego aumentan hasta llegar a 1.000 mg/l, las concentraciones de nitrato promedio de 2 mg/l que son estables hasta diciembre de 2020 y que luego aumentan hasta llegar a 1.300 mg/l y las concentraciones de sodio que son estables en torno a 400 mg/l.

A partir de lo observado en el diagrama de Piper, las aguas subterráneas de la zona de mezcla proximal dan cuenta de una evolución de la composición hidroquímica en el tiempo donde se incorporan cloruro y calcio, pasando de una composición sulfatadas-sódicas a sulfatadas/cloruradas-sódico/cálcicas como se observa en la Figura 3-6.

Los pozos P-7, P-8 y PCAR-1, que corresponden a los ubicados en la zona de mezcla más distal aguas abajo del complejo industrial RT en la subcuenca 9, presentan niveles que aumentan en promedio 9,7 cm/año, 7,4 cm/año y 6,8 cm/año respectivamente en el periodo comprendido entre 2010 y 2023. Respecto a la evolución de las concentraciones en el tiempo, estas aumentan en el registro comprendido entre 2011 y 2023. El pozo P-7 es el que presenta las mayores concentraciones de sulfatos y las menores de los restantes elementos, con concentraciones de sulfato que incrementaron de 400 mg/l a 1.000 mg/l, donde el salto más notorio se produce durante 2017 pasando de 400 a 800 mg/l, valores de cloruro que variaron de 150 mg/l a 200 mg/l, concentraciones de nitrato aumentaron de 40 mg/l a 100 mg/l y las concentraciones de sodio que registraron aumentos entre 80 mg/l y 160 mg/l, donde el salto de cloruro, nitrato y sodio es coincidente temporalmente con el de aumento de concentración de sulfatos. Luego, el pozo P-8, con concentraciones de sulfato que

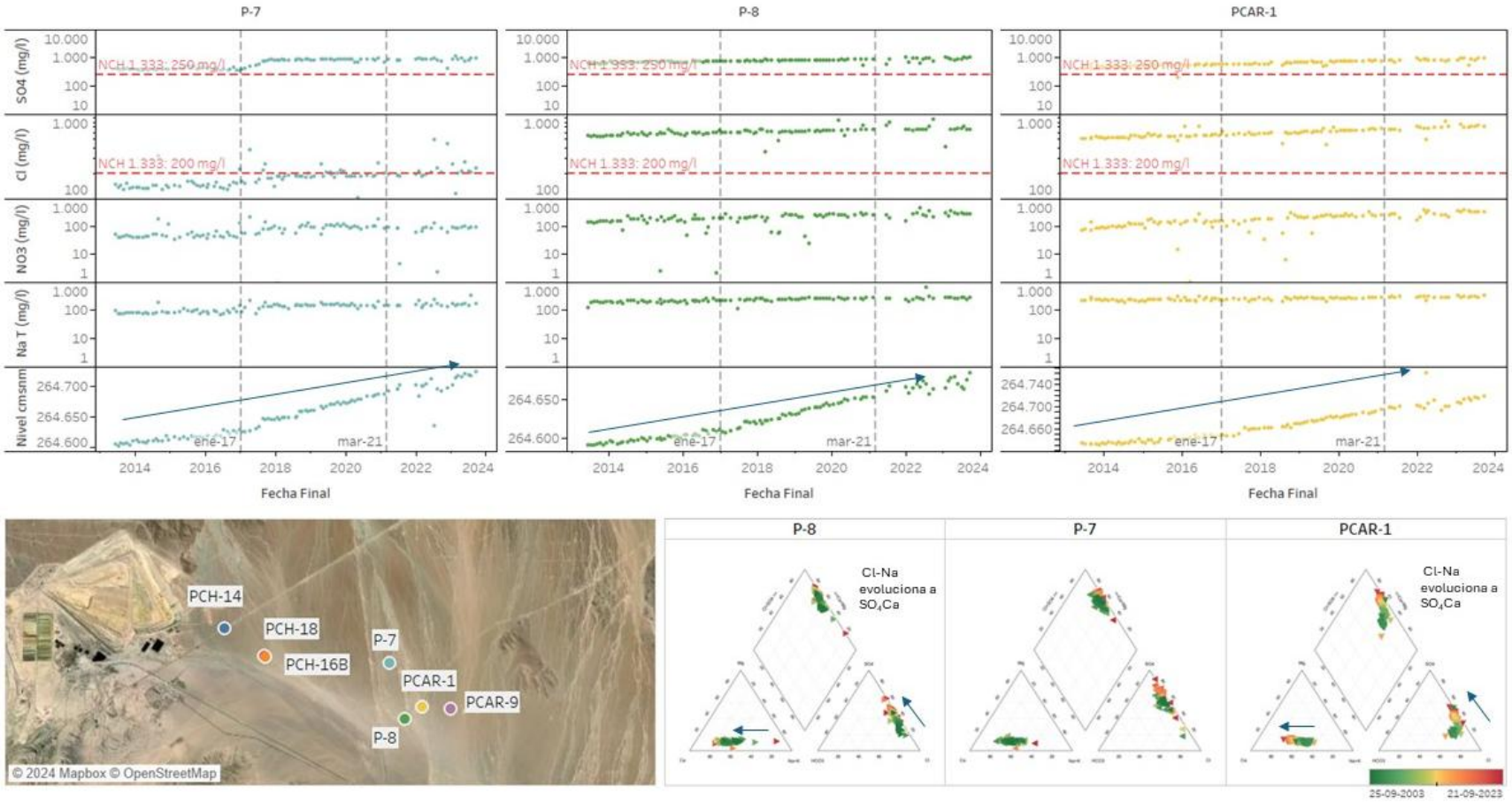
incrementaron de 600 mg/l a 1.000 mg/l, valores de cloruro que variaron de 550 mg/l a 650 mg/l, las concentraciones de nitrato aumentaron de 150 mg/l a 300 mg/l y las concentraciones de sodio que registraron aumentos entre 200 mg/l y 300 mg/l. Finalmente, el pozo PCAR-1, con concentraciones de sulfato que incrementaron de 400 mg/l a 1.000 mg/l, valores de cloruro que incrementaron de 500 mg/l a 700 mg/l, las concentraciones de nitrato que incrementaron de 80 mg/l a 350 mg/l y las concentraciones de sodio que incrementaron de 200 a 350 mg/l.

A partir de lo observado en el diagrama de Piper, las aguas subterráneas de la zona de mezcla proximal dan cuenta de una evolución de la composición hidroquímica en el tiempo donde se incorporan sulfato y calcio, pasando de una composición cloruradas-sódicas a sulfatadas-calco sódicas como se observa en la Figura 3-7.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-6: Aguas subterráneas de la zona de mezcla más próxima aguas abajo del complejo industrial RT.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-7:Aguas subterráneas de la zona de mezcla más distal aguas abajo del complejo industrial RT.

3.4 RELACIONES IÓNICAS

Se utilizaron diferentes relaciones iónicas, con foco en las aguas naturales y en la zona de mezcla, para comprender la relación existente entre los analitos presentes en el agua en la zona de mezcla y si estos pueden atribuirse a una contribución natural debido a proceso geoquímicos naturales que experimentan las aguas subterráneas naturales en contacto con las rocas de la zona de estudio o se atribuyen a contribuciones antropogénicas provenientes de la zona industrial de RT.

Para esto se analizaron las relaciones iónicas de calcio versus sulfato, sodio versus cloruro, bicarbonato versus sílice y magnesio versus calcio, donde la interpretación de los datos se realizó según la Sección 2.4 (Hounslow, 1995).

3.4.1 Relación iónica calcio versus sulfato

A partir de la relación iónica $Ca/Ca+SO_4$ ilustrada en la Figura 3-8, en el caso de las aguas naturales ubicadas en el sector aguas arriba del complejo industrial RT tanto al noreste como el noroeste, es posible identificar que las aguas experimentan secuestro de calcio debido a procesos geoquímicos naturales asociados a precipitación de calcita o a intercambio iónico.

Respecto de las aguas subterráneas del sector industrial, PCH-25, PCH-24 y PCH-19, el valor de la mediana de los datos varía entre 0,11 y 0,92. Esta variabilidad evidencia diferencias en la relación entre sulfato y calcio entre los puntos representativos del sector industrial, asociadas a la diversidad de procesos geoquímicos y antecedentes históricos de intervención existentes en el área..

La zona de mezcla se agrupa según zona proximal, PCH-14, PCH-18 y PCH-16B y zona distal, P-7, P-8 y PCAR-1. Los pozos ubicados en la zona más proximal tienen un valor de mediana entre 0,1 y 0,3 mientras que los pozos ubicados en la zona más distal, a excepción de P-7, presentaron una mediana de valores en torno a 0,6 dando a entender que los proximales sugieren un secuestro de calcio producto de precipitación de calcita o intercambio iónico, mientras que los distales indican una fuente de calcio desde carbonatos o silicatos. P-7 estaría dando cuenta de disolución de yeso.

Finalmente, las aguas subterráneas captadas por los pozos ubicados aguas debajo de la zona de mezcla presentan valores de mediana de relación iónica $Ca/Ca+SO_4$ entre 0,6 y 0,8 dando a entender que este sector tiene una fuente adicional de calcio desde carbonatos o silicatos.

3.4.2 Relación iónica sodio versus cloro

A partir de la relación iónica Na/Na+Cl ilustrada en la Figura 3-8, en el caso de las aguas naturales ubicadas en el sector aguas arriba del complejo industrial RT tanto al noreste como el noroeste, es posible identificar que las aguas experimentan aportes adicionales de sodio debido a procesos geoquímicos naturales asociados a intercambio iónico.

Respecto a la relación iónica Na/Na+Cl en el caso de PCH-19, su valor de mediana mayor que 0,5 es indicativo de fuente adicional de sodio desde el sur-oeste hacia la zona de mezcla según las direcciones de flujo que se observan en la Figura 3-1. Para los pozos PCH-24 y PCH-25 la mediana de los datos es 0,5, indicativa de un estado de equilibrio de contribuciones de sodio y cloruro.

La zona de mezcla se agrupa según zona proximal, PCH-14, PCH-18 y PCH-16B y zona distal, P-7, P-8 y PCAR-1. Los pozos ubicados en la zona más proximal tienen un valor de mediana en torno a 0,8, mientras que los pozos ubicados en la zona más distal, a excepción de P-8, presentaron una mediana de valores de entre 0,4 y 0,5, dando a entender que los procesos geoquímicos que están afectando a las aguas subterráneas que captan estos pozos no son los mismos. Los proximales sugieren una contribución adicional de sodio producto de intercambio iónico, mientras que los distales indican disolución de halita. P-8 sugiere una contribución adicional de cloruro.

Finalmente, las aguas subterráneas captadas por los pozos ubicados aguas debajo de la zona de mezcla presentan valores de mediana en torno a 0,5 dando a entender que en este sector se evidencian procesos de disolución de halita.

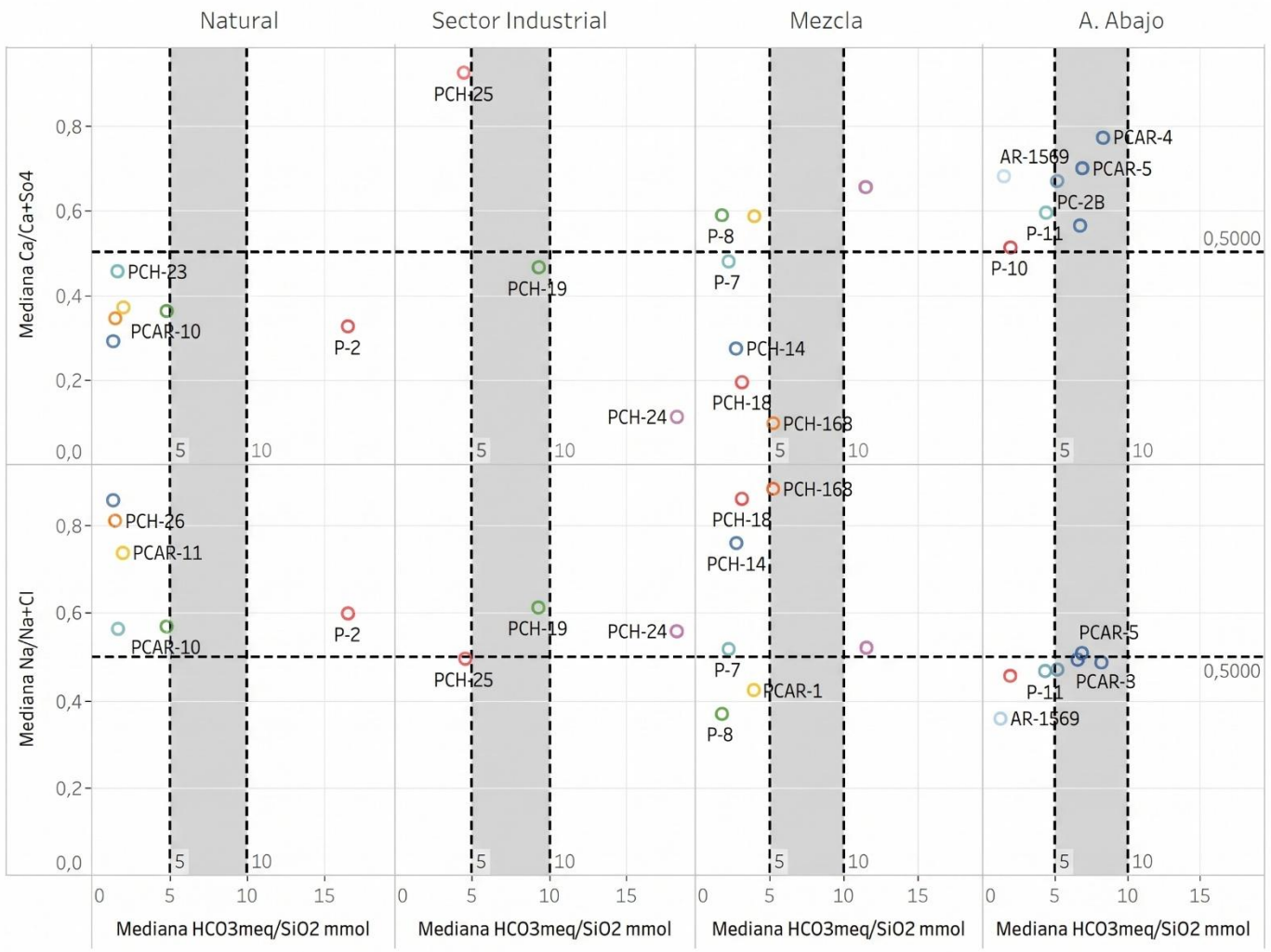
3.4.3 Relación iónica bicarbonato versus sílice

A partir de la relación iónica HCO_3/SiO_2 ilustrada en la Figura 3-8, en el caso de las aguas naturales ubicadas en el sector aguas arriba del complejo industrial RT tanto al noreste como el noroeste, es posible identificar que experimentan aportes adicionales de sílice debido a procesos geoquímicos naturales asociados a meteorización de silicatos.

El pozo PCH-25 presenta una mediana de los datos menores a 5 indicativa de meteorización de silicatos. En el caso de PCH-24, con valor de mediana mayor a 10 es indicativa de meteorización de carbonatos. PCH-19 califica como ambiguo.

La mediana de relación iónica de bicarbonato versus sílice de los pozos ubicados en la zona de mezcla, a excepción de PCAR-9, presenta valores menores a 5 lo que permite indicar el proceso de meteorización de rocas silicatadas.

Finalmente, las aguas subterráneas captadas por los pozos ubicados aguas debajo de la zona de mezcla presentan valores de mediana en torno a 5 y 10 califican como ambiguos.

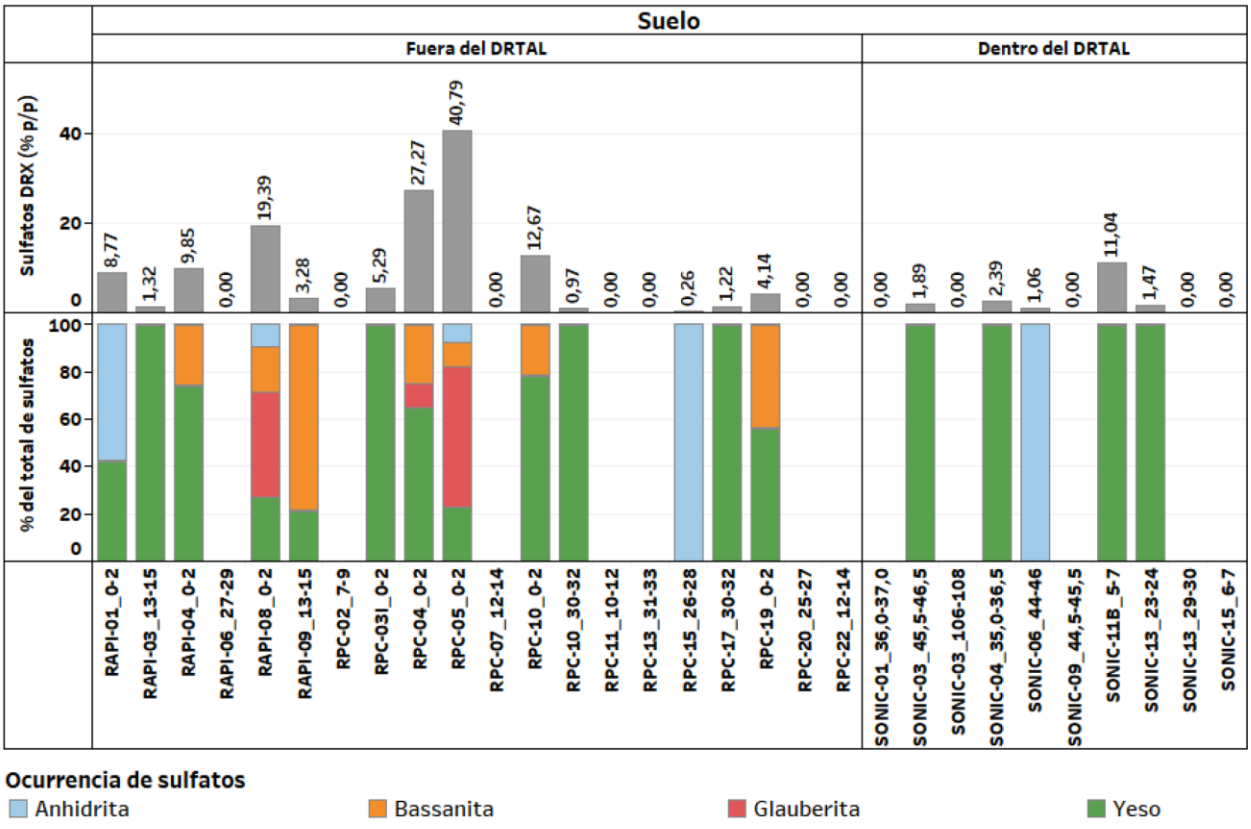


Fuente: Elaboración propia

Figura 3-8: Mediana de las Relaciones iónicas de las aguas subterráneas captadas por los pozos de la zona de estudio

Al analizar la evolución temporal de las relaciones iónicas ilustrada en Figura 3-10, es posible evidenciar que las aguas subterráneas captadas por el pozo PCH-23 sufren procesos de disolución de minerales sulfatados, a la vez que, en conjunto con el pozo PCAR-10, ambos evidencian procesos asociados a depósitos salinos de origen evaporítico.

El informe regional del distrito norte realizado por Amphos21 (2022), realiza una caracterización geoquímica con DRX de los suelos del entorno aguas arriba del depósito de relave Talabre, dando cuenta de la presencia principalmente de silicatos (3,2 – 84,2 % p/p) y carbonatos (0 – 83,2 % p/p) y presencia de sulfatos (0 – 40,8 % p/p), mientras que los filosilicatos del grupo de las arcillas (0,6 – 22,8 % p/p), haluros (0 – 11,7 % p/p) y óxidos (0 – 3,2 % p/p) se encontraron en menores proporciones. Los sulfatos que se identifican corresponden a anhidrita, basanita, glauberita y yeso, donde glauberita es un sulfato calco-sódico. La Figura 3-9 indica la distribución de los minerales presentes, donde son de particular interés para el contexto de RT los puntos ubicados fuera de DRTAL y denominados RAPI-01, RAPI-02, RAPI-03, RAPI-04, RAPI-06 y RAPI-07.



Fuente: Amphos21, 2022

Figura 3-9: Distribución de minerales sulfatos en muestras de suelo alrededor del depósito de relaves Talabre

Además, se realizaron ensayos de sales solubles en función de la profundidad, donde los resultados indican mayores contenidos de sulfato soluble (6,6 % p/p) en la porción más somera de los suelos, mientras que en el Acuífero Superior el sulfato soluble es un orden de magnitud inferior que en la zona no saturada (< 0,7 % p/p). En cuanto al contenido de cloruro soluble, identificaron las mayores concentraciones a profundidades entre 35 mbnt a 45 mbnt. Por el contrario, las muestras de suelo en los primeros metros bajo el nivel del terreno contienen un orden de magnitud menor de cloruro soluble (hasta un 0,34 % p/p).

Respecto de la evolución temporal de las relaciones de la zona de mezcla, se observan claras contribuciones adicionales de calcio y cloruros en los pozos PCH-14, PCH-18 y PCH-16B. Además, se observa un cambio de tendencia en el tiempo en los pozos PCH-18, PCH-16B y PCAR-1, pasando de una relación iónica de valor 10 o superior a un valor menor que 5, indicando paso de meteorización de silicatos a meteorización de rocas carbonatadas.

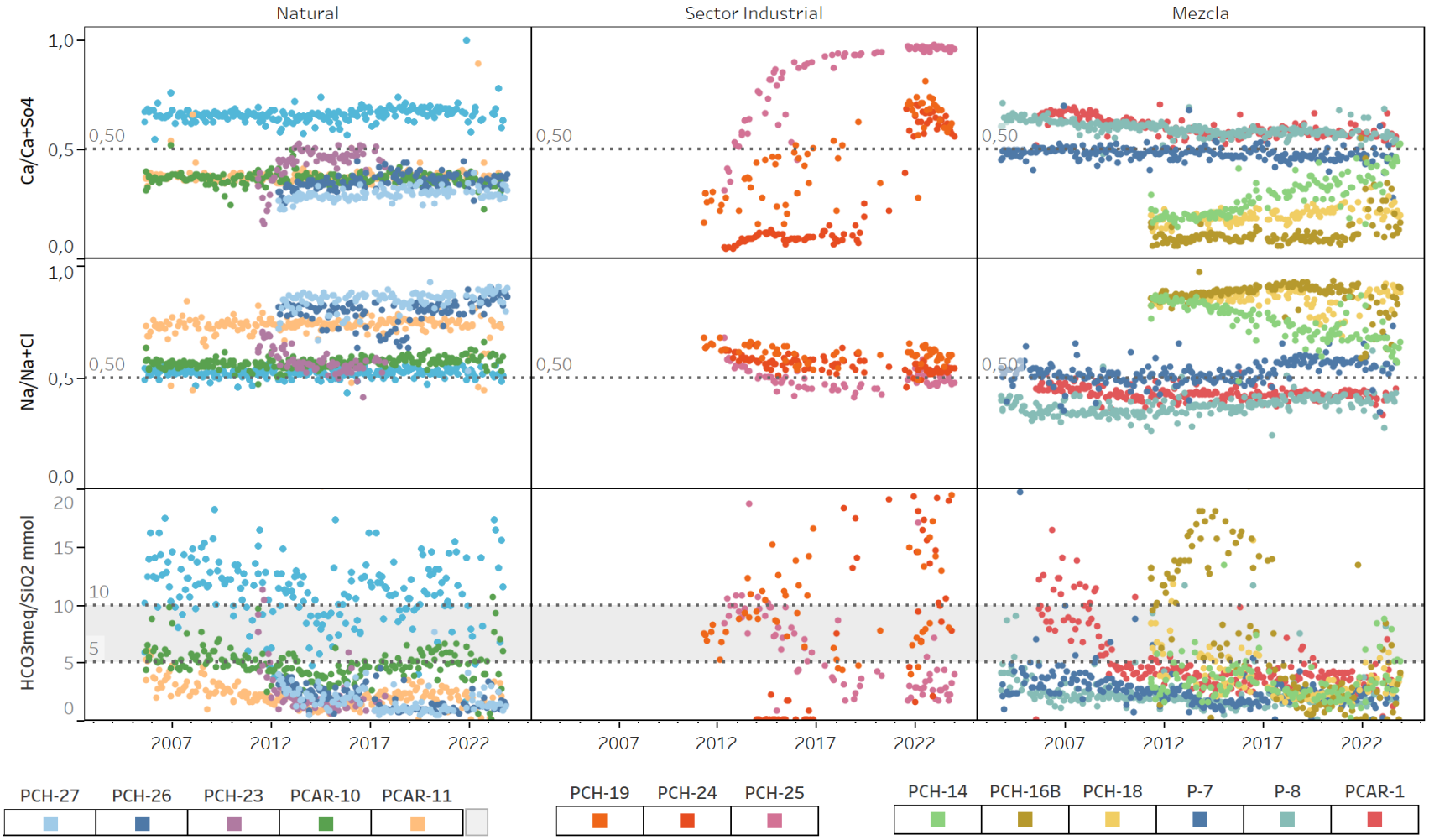
La relación iónica de bicarbonato versus sílice en el caso de los pozos PCH-14, P-7 y P-8, se mantiene con valores estables y menores a 5 en el periodo completo del registro de datos, indicando que la procedencia del sílice en las aguas subterráneas captadas en el sector provienen de la meteorización de rocas silicatadas o que existe una contribución adicional de sílice a las aguas subterráneas de la zona que hace que la razón disminuya.

En el caso del pozo PCAR-9, su relación iónica es mayor a 10 y estable en el tiempo hasta fines de 2010, luego y hasta el final del registro se mantiene generalmente sobre o igual a 10, pero también hay registros que se ubican entre 5 y 10, indicando una ambigüedad en la proveniencia del bicarbonato de las aguas subterráneas que capta este pozo.

La Tabla 3-4 resume los procesos geoquímicos observados a partir de las relaciones iónicas analizadas y las características de los suelos y rocas el sector de estudio.

Tabla 3-4: Procesos geoquímicos evidenciados en la zona de estudio

R.i / Tipo	Naturales	Mezcla proximal	Mezcla distal
$Ca/Ca+SO_4$	Intercambio iónico o precipitación de calcita	Intercambio iónico o precipitación de calcita	Fuente de calcio desde carbonatos o silicatos
Na/Na+Cl	Intercambio iónico	Intercambio iónico	Disolución de halita
HCO_3/SiO_2	Meteorización de silicatos	Cambio de tendencia en el tiempo	Meteorización de silicatos



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-10: Evolución temporal de las relaciones iónicas de las aguas naturales, deL sector industrial y de la zona de mezcla

3.5 ÍNDICE DE SATURACION

Como se menciona en el apartado anterior, la mineralogía de los suelos analizados en el estudio regional realizado por Amphos21 (2022), indica presencia de sulfatos, carbonatos y haluros que en conjunto con los procesos geoquímicos evidenciados podrían explicar la contribución natural de SO_4, Cl, Na, Ca de los suelos a las aguas subterráneas del entorno de RT.

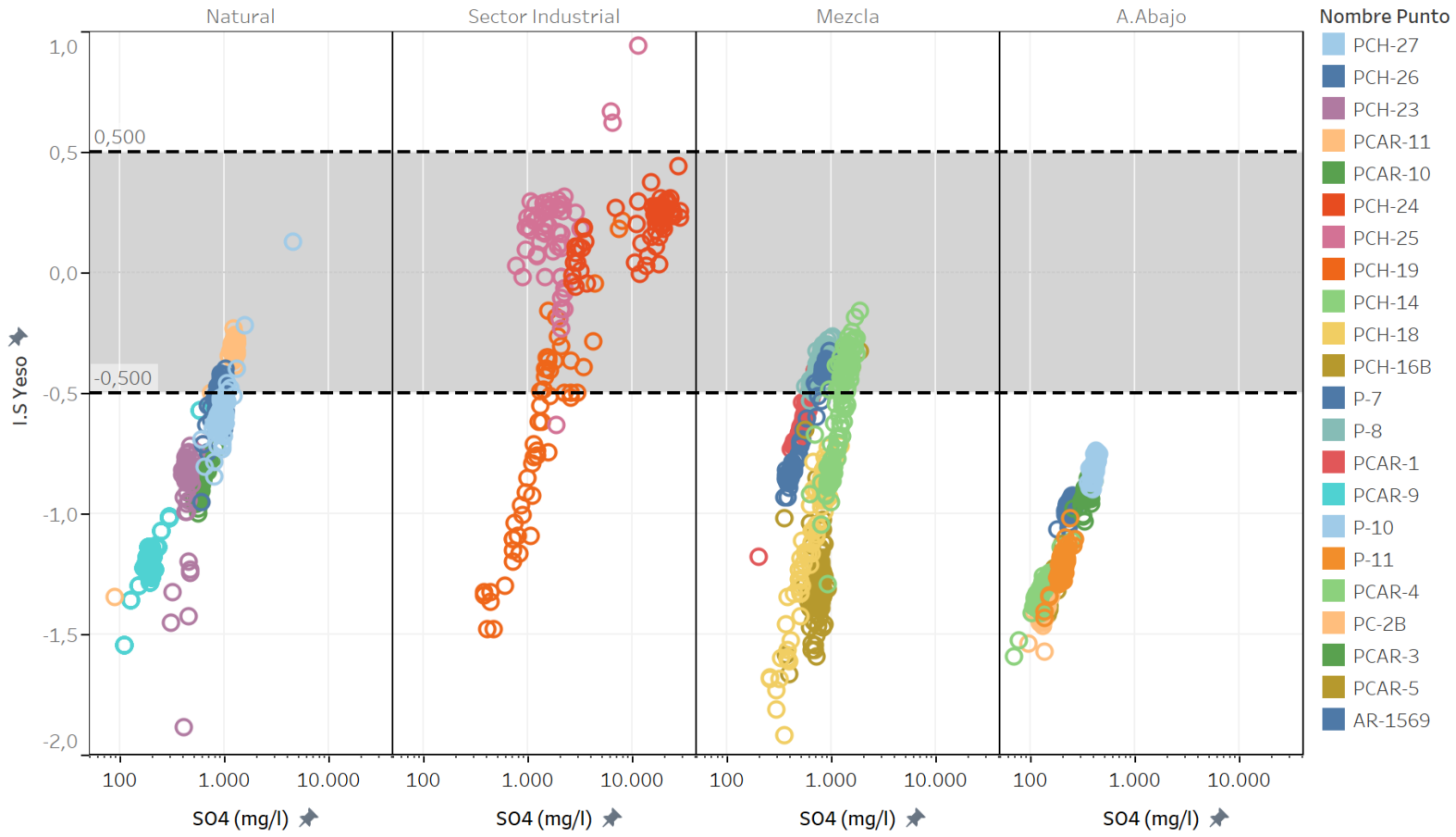
Los índices de saturación con respecto a los minerales identificados en los ensayos mineralógico de los suelos del entorno del depósito de relaves Talabre (yeso, calcita, anhidrita, basanita, glauberita, etc) fueron considerados y analizados. En este estudio se han evaluado los IS de dos minerales: yeso y calcita, ya que corresponden a fases minerales ampliamente identificadas en la geología de la zona de estudio y cobran relevancia desde el punto de vista de su solubilidad.

En la Figura 3-11 se presenta un diagrama de los IS respecto al yeso versus la concentración de sulfato agrupando los puntos por sector. A partir de la figura, es posible advertir que todas las aguas naturales se encuentran en general subsaturadas en yeso, a excepción de PCH-23 que representa una condición de equilibrio con esta fase mineral. Las aguas representativas del sector industrial evolucionan en el tiempo con una tendencia subsaturada a equilibrio e incluso sobresaturada.

La zona de mezcla proximal evidencia una tendencia similar a las aguas del sector industrial, evolucionando de una condición subsaturada a una condición de equilibrio en el tiempo en el caso del PCH-14 y PCH-18. En el caso del PCH-16B se observa una tendencia subsaturada que es mantenida en el tiempo. Los pozos P-7 y PCAR-1 también presentan una tendencia de evolución de subsaturadas a equilibrio con el tiempo, sin embargo, el pozo P-8 mantiene una condición de equilibrio con esta fase mineral constante en el tiempo.

Las aguas que se encuentran aguas abajo de la zona de mezcla poseen una clara tendencia subsaturada, pero que en los pozos P-10 y P-11 también está evolucionando hacia el equilibrio.

Finalmente, se evidencia que tanto las aguas naturales aguas arriba del complejo industrial como aguas abajo se encuentran subsaturadas en yeso, pudiendo entonces disolver mineral, que en conjunto con la presencia de depósitos sedimentarios con presencia de sulfatos podría explicar contribuciones naturales de calcio y sulfato a la zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-11: Distribución de los índices de saturación de yeso versus sulfato en la zona de estudio

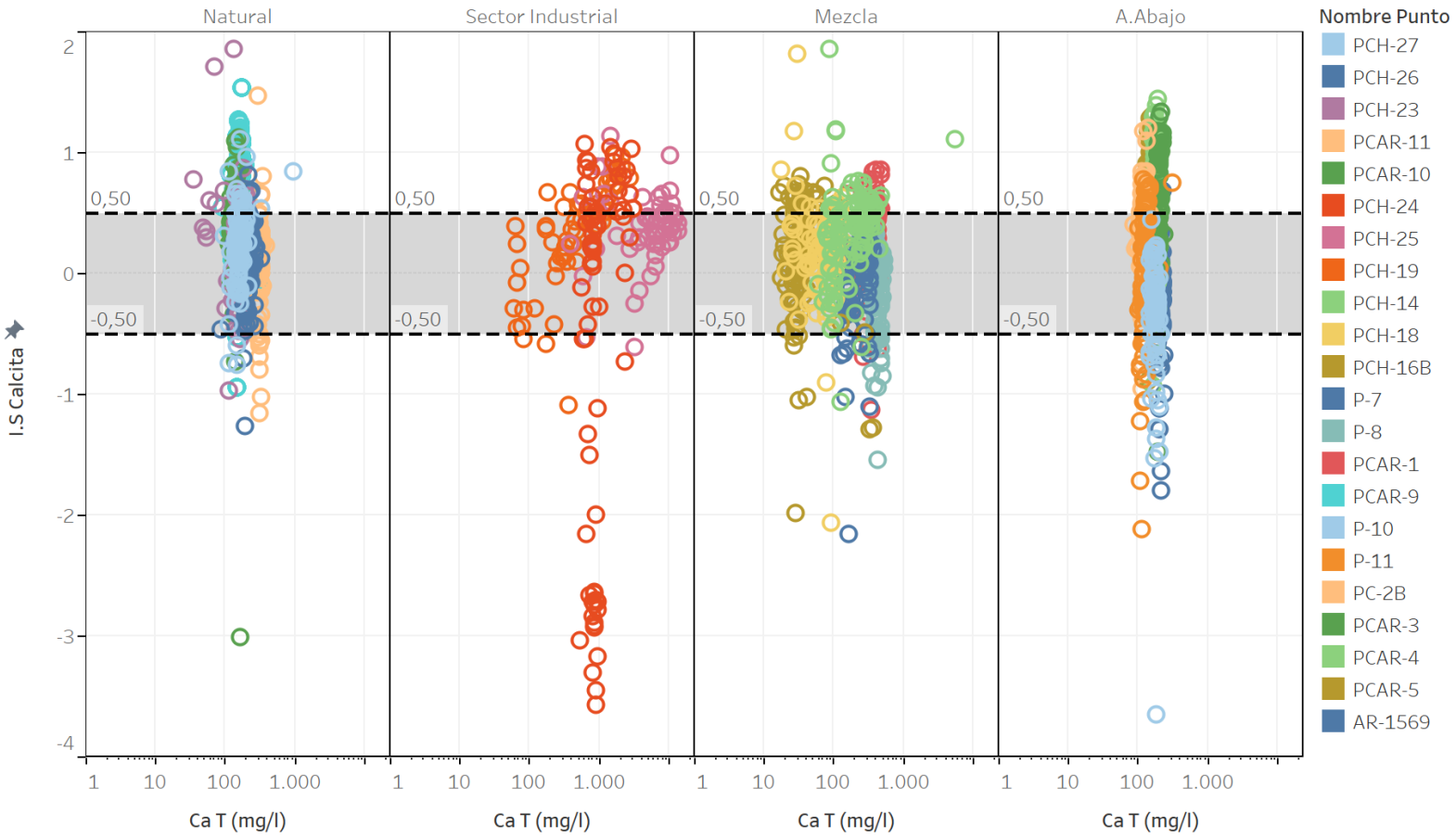
En la Figura 3-12 se presenta un diagrama de los IS respecto a calcita versus la concentración de calcio agrupando los puntos por sector. A partir de la figura, es posible advertir que todas las aguas naturales se encuentran en general en equilibrio e incluso sobresaturada en el caso de PCAR-10.

En el caso de las aguas del sector industrial, el pozo PCH-19 presenta una evolución temporal de aguas en equilibrio a sobresaturadas. PCH-24 varía entre subsaturadas, equilibrio y sobresaturadas sin una tendencia temporal clara. PCH-25 se encuentra en su mayoría en equilibrio con la fase mineral.

Los pozos ubicados en la zona de mezcla proximal se encuentran en equilibrio con la fase mineral al igual que los pozos P-7 y P-8. PCAR-1 se presenta sobresaturado en los últimos años de registro (2017-2023)

Los pozos ubicados aguas abajo se agrupan en 2, mientras que los pozos PCAR-3, PCAR-4, PCAR-5, PCAR-9 y PC-2B presentan una tendencia entre equilibrio y sobresaturada, los pozos P10, P-11 y AR-1569 presentan una tendencia en equilibrio a subsaturada.

Finalmente, se evidencia que las aguas naturales aguas arriba del complejo industrial se encuentran principalmente en equilibrio, mientras que los puntos ubicados aguas abajo se pueden agrupar según la subcuenca en la que se encuentren, donde los ubicados en la subcuenca 10 y 11 presentan una sobresaturación de calcita y los ubicados en la subcuenca 8 y 9 presentan una subsaturación de calcita.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-12: Distribución de los índices de saturación de calcita versus la concentración de calcio en la zona de estudio

3.6 ANALISIS ISOTÓPICO

3.6.1 Isotopía de la Molécula del Agua

La información isotópica de la molécula de agua de los puntos de monitoreo considera 5 años con información desde el 2014 a 2022, con solo 3 campañas con información química e isotópica de las diferentes estaciones simultáneamente (septiembre del 2014, julio del 2016 y diciembre del 2021). Se cuenta con un total de 157 registros.

La Figura 3-13 y Figura 3-14 presenta la composición isotópica de las aguas subterráneas de los diferentes sectores en la zona de estudio y la clasificación de las aguas definido en la Sección 3.1. Se ha considerado la línea meteórica local (LML; Aravena et.al. (1999) como referencia de las variaciones de las precipitaciones a nivel regional, la línea meteórica local sin exceso de deuterio ($\delta^2H = 7.8\ \delta^{18}O$) y la línea de evaporación local (LEL), definida a partir de las muestras representativas de pozos localizados aguas abajo del sector industrial.. Los tipos de aguas, definidos en el análisis hidroquímico, se han destacados con polígonos de colores y la evolución en el tiempo se indica con flechas. La LML y LEL se expresa de la siguiente forma:

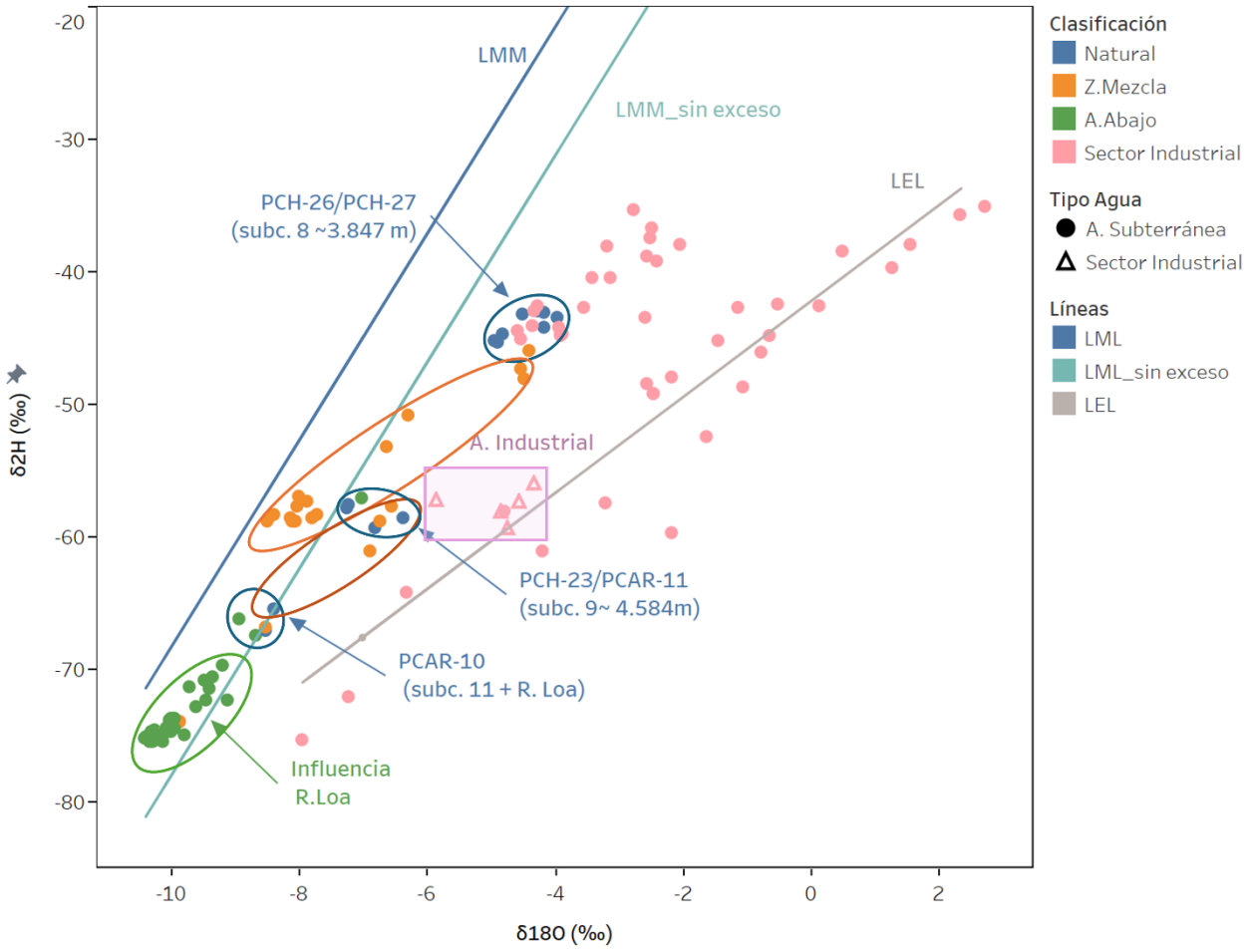
$$\delta^2H = 7{,}8*\delta^{18}O + 9{,}7 \qquad \text{LML}$$

$$\delta^2H = 3{,}62*\delta^{18}O - 42{,}19 \qquad \text{LEL}$$

Las aguas naturales se distribuyen entre -8,53 ‰ y -3,95 ‰ para $\delta^{18}O$ y -67,13 ‰ y -43,04 ‰ para δ^2H, consecuente la relación de la subcuenca donde se emplazan estos puntos. Por lo tanto, las aguas de la subcuenca 8 (Figura 3-2 y Tabla 3-1), son más enriquecidas con respecto a la subcuenca 9 y 10, ya que estas últimas son recargadas a una mayor altitud.

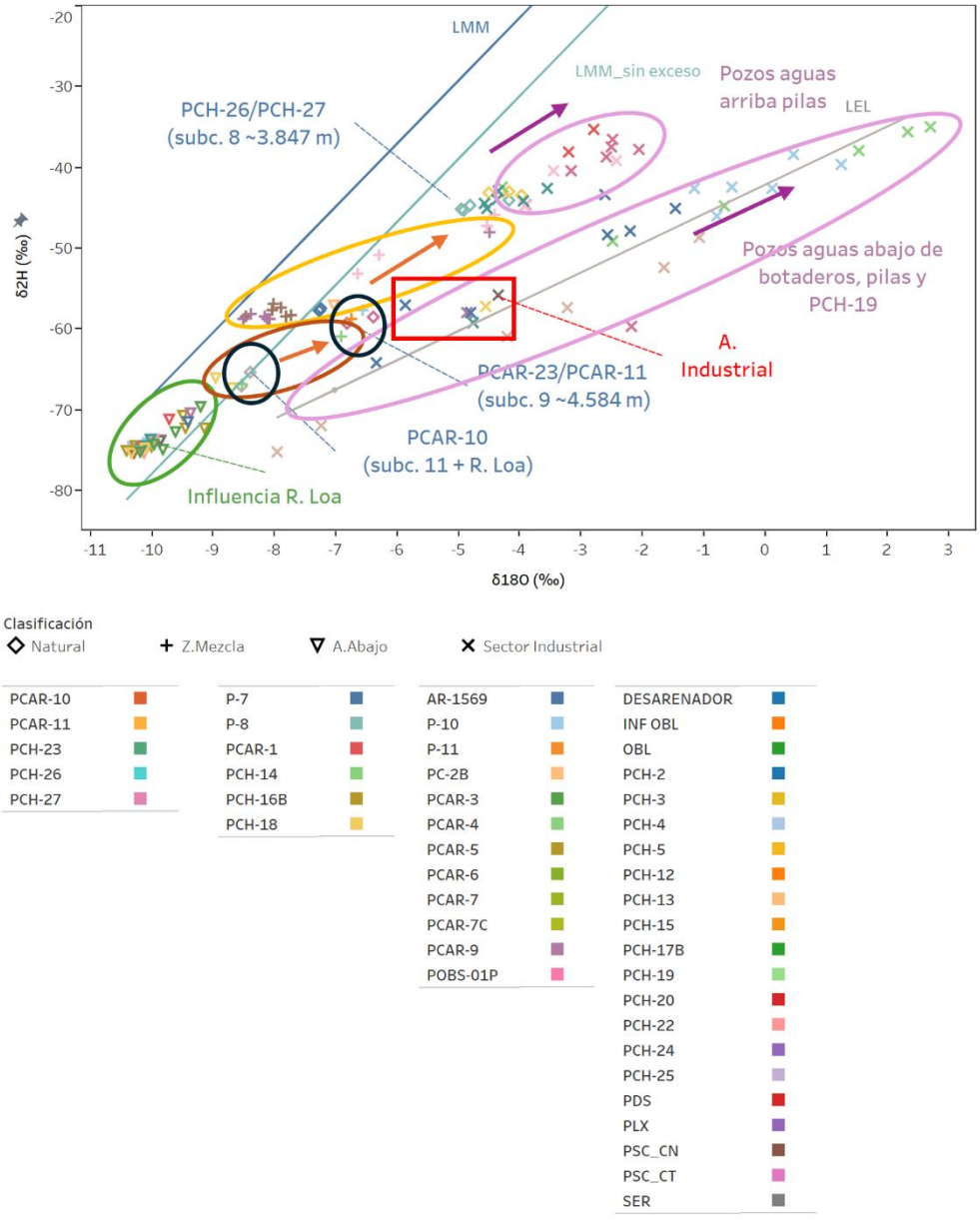
Por otro lado, la subcuenca 11 (Figura 3-2)., podría tener más influencia de las aguas del río Loa, que provienen de zonas de mayor altitud. En esta subcuenca se encuentran PCAR-10 (agua natural) y las aguas abajo de la zona de mezcla, las cuales tienen un rango de variación más acotado de -10,32 ‰ y -7,02 ‰ para $\delta^{18}O$ y -75,5 ‰ y –57,11 ‰ para δ^2H.

Las aguas del sector industrial y aguas subterráneas de la zona de RT varía entre -7,95‰ y -2,71 ‰ para $\delta^{18}O$ y -75,4 ‰ y -35,08 ‰ para δ^2H. El balance hídrico del sistema indica que las aguas utilizadas históricamente en los distintos procesos del sector industrial comprenden principalmente aguas recirculadas y, en menor proporción, aportes provenientes de fuentes externas, incluyendo Estanque de Agua de San Pedro, Colana e Inacaliri.. Para el proceso del botadero OBL y ripios, el agua utilizada corresponde únicamente a agua recirculada (Hídrica, 2022). Por su parte, la marca isotópica del agua industrial de las piscinas aguas abajo de pilas de lixiviación y botaderos de ripio varía entre -5,84 y -4,34 ‰ para $\delta^{18}O$ y -59,38 ‰ y -55,97 ‰ para δ^2H.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-13: $\delta^{2}H$ versus $\delta^{18}O$ de las aguas de la zona de estudio según la clasificación de las aguas definido en el análisis hidroquímico



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-14: δ^2H versus $\delta^{18}O$ de las aguas de la zona de estudio según la clasificación de las aguas definido en el análisis hidroquímico y pozos de monitoreo.

Las aguas subterráneas al oeste de las pilas de lixiviación, PCH-12 y PCH-13, presentan una signatura isotópica evaporadas con respecto a las naturales del sector (PCH-27 y PCH-26), evidenciando posiblemente un aporte más importante de aguas naturales. Mientras que las aguas subterráneas de los pozos PCH-24 y PCH-25, localizadas al interior del sector industrial, presentan valores enriquecidos en $\delta^{18}O$ respecto de las aguas naturales del sector (PCH-27 y PCH-26), evidenciando la ocurrencia de procesos de evaporación y/o mezcla con aguas que han experimentado modificaciones isotópicas asociadas a actividades desarrolladas históricamente en el sector industrial.

Aguas abajo, las aguas subterráneas del PCH-14, evolucionan desde una recarga intermedia entre la cabecera y parte media de la subcuenca 8 a aguas con una isotopía más parecidas a las aguas del PCH -27 y PCH-26. Sin embargo, las aguas de los pozos PCH-16B y PCH-18 se encuentran entre las líneas meteórica mundial y sin exceso de deuterio, indicando las aguas de recarga infiltradas desde la cabecera de la subcuenca 8 no han sido afectadas por evaporación. Las aguas subterráneas de los pozos aguas abajo P-7, P-8 y PCAR-1 se encuentran enriquecidos en $\delta^{18}O$ con respecto a las aguas de los pozos PCH-16B y PCH-18, similar a lo observado en los pozos de aguas naturales de la subcuenca 9 y 10 (PCH-23 y PCAR-11).

Las aguas subterráneas de la zona de mezcla reflejan, al igual que las aguas naturales, la marcada diferencia en su signatura isotópica. Debido a que las contribuciones de las diferentes subcuencas presentan una signatura isotópica marcadamente diferente, el cálculo de zona de mezcla se complejiza al tener que considerarse varios end members. Por lo tanto, no sería posible utilizar los isótopos de la molécula de agua como trazadores del avance de la pluma para determinar el porcentaje de mezcla de aguas frescas y de procesos, enfoque clásico de dilución hacia aguas abajo.

3.6.2 Isotopía de la Molécula del Sulfato

La información isotópica de azufre en sulfato de los puntos de monitoreo considera 7 años con información desde el 2010 a 2022, con solo 4 campañas con información química e isotópica de las diferentes estaciones simultáneamente (septiembre del 2014, julio del 2016, abril/mayo del 2020 y diciembre del 2021). Se cuenta con un total de 157 registros.

Para evaluar el origen de los sulfatos de las aguas subterráneas de la zona de estudio, se ha utilizado los análisis de $\delta^{34}S$ y $\delta^{18}O$ en sulfato de muestras de agua. El contenido de $\delta^{34}S$ de los sulfuros hipógenos del yacimiento Chuquicamata, con una génesis similar al yacimiento Radomiro Tomic, se ha reportado que varía entre -5,6 a -1,4 ‰ y entre 2,1 y 16,9 ‰ para sulfatos hipógeno (Zentilli, et.al.; 1994; Smuda, et.al, 2014). Por otra parte, el contenido de $\delta^{34}S$ en los yesos de los salares en la región de Antofagasta se ha reportado que varía entre 2,8 a 7,6‰ y el yeso en el suelo en el sector del Llano de la Paciencia varía entre 4,3 y 11‰ (Rech, et.al.; 2002).

La Figura 3-15 y Figura 3-16 presenta el contenido de $\delta^{34}S$ con respecto a la concentración de sulfato de las aguas subterráneas de los diferentes sectores en la zona de estudio y la clasificación de las aguas definido en la Sección 3.1.

El agua industrial presenta contenidos más bajos de $\delta^{34}S$ (variable entre -3,02 y -1,83 ‰) y las concentraciones más altas de sulfato, características compatibles con procesos de oxidación y disolución de minerales sulfurados asociados históricamente a la actividad minera. Similarmente, las aguas monitoreadas en el pozo PCH-24, localizado en el sector industrial, se obtienen valores similares de $\delta^{34}S$, aumentando levemente en el tiempo hasta -0.58 ‰.

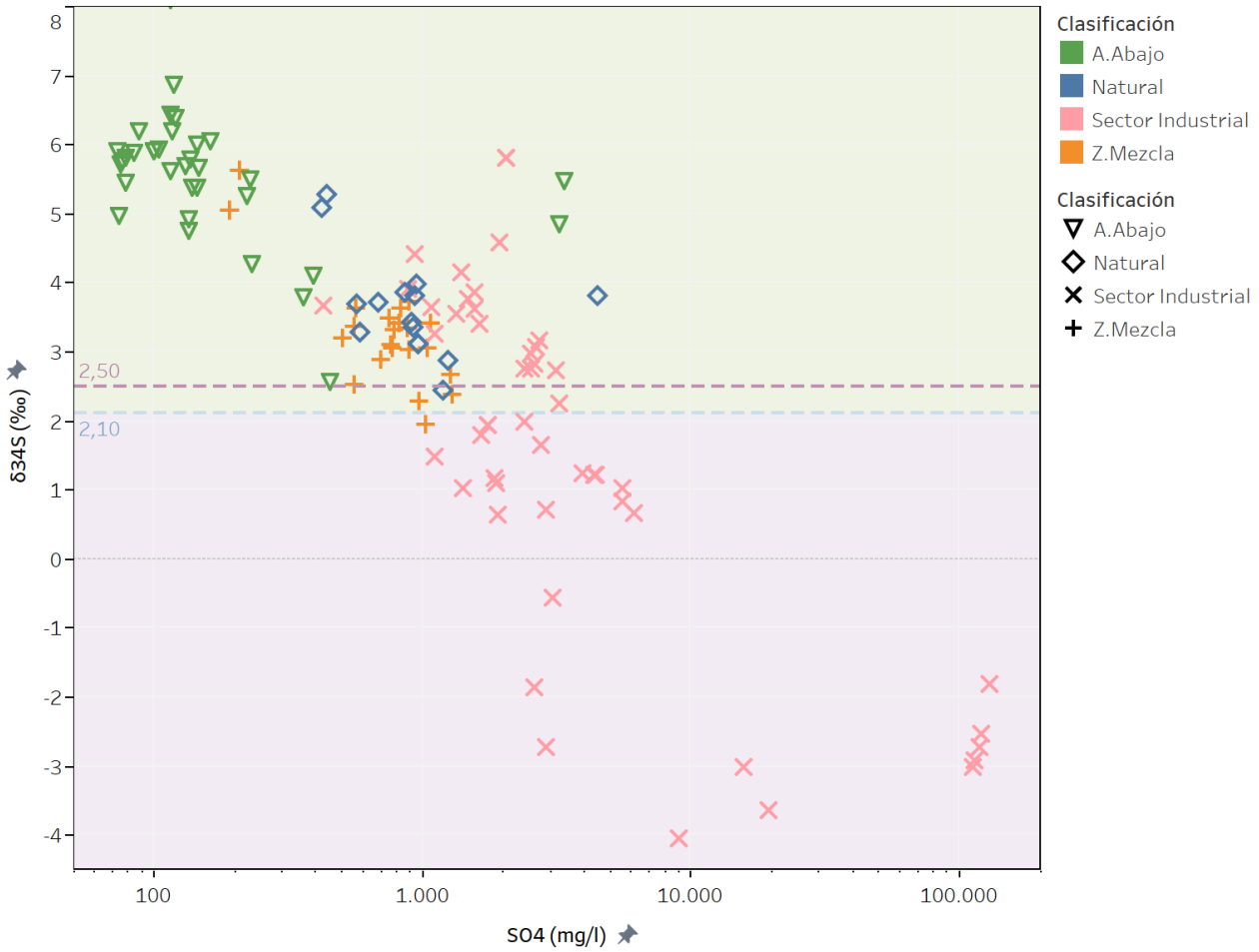
El pozo PCH-19 presenta valores de relativamente bajos de $\delta^{34}S$, variable entre 0,7 a 1,48‰, y concentraciones de sulfato variable entre 1.000 a 2.800 reflejaría el efecto de la oxidación de sulfuros primarios. Esto podría ser producto a que se encuentra habilitado en roca y que tendría una influencia desde las aguas del rajo de RT, según el modelo conceptual (Hídrica, 2023).

Los pozos ubicados cercanos a los botaderos aguas arriba (PCH-2 y PCH-20) y hacia el oeste del sector industrial (PCH-12, PCH-13) presentan valores de $\delta^{34}S$ de 0,66 a 3,85 ‰ con valores de sulfato variable entre 1.000 mg/l a 6.178 mg/l. Esta signatura isotópica refleja una mezcla de azufre de distinto origen, donde por un extremo tenemos azufre proveniente de sulfuros asociados a rocas del yacimiento y por otro lado tenemos azufre procedente de rocas del suelo del entorno.

Las aguas de la zona de mezcla (PCH-14, PCH-16B y PCH-18) presentan un comportamiento del contenido de $\delta^{34}S$ similar al sector descrito anteriormente, sin embargo, el contenido de sulfato es menor a 1.300 mg/l. Por otra parte, las aguas subterráneas de los pozos P-7, P-8 y PCAR-1 presentaron valores levemente menos enriquecidos que el grupo anterior, pero dentro del rango de sulfatos.

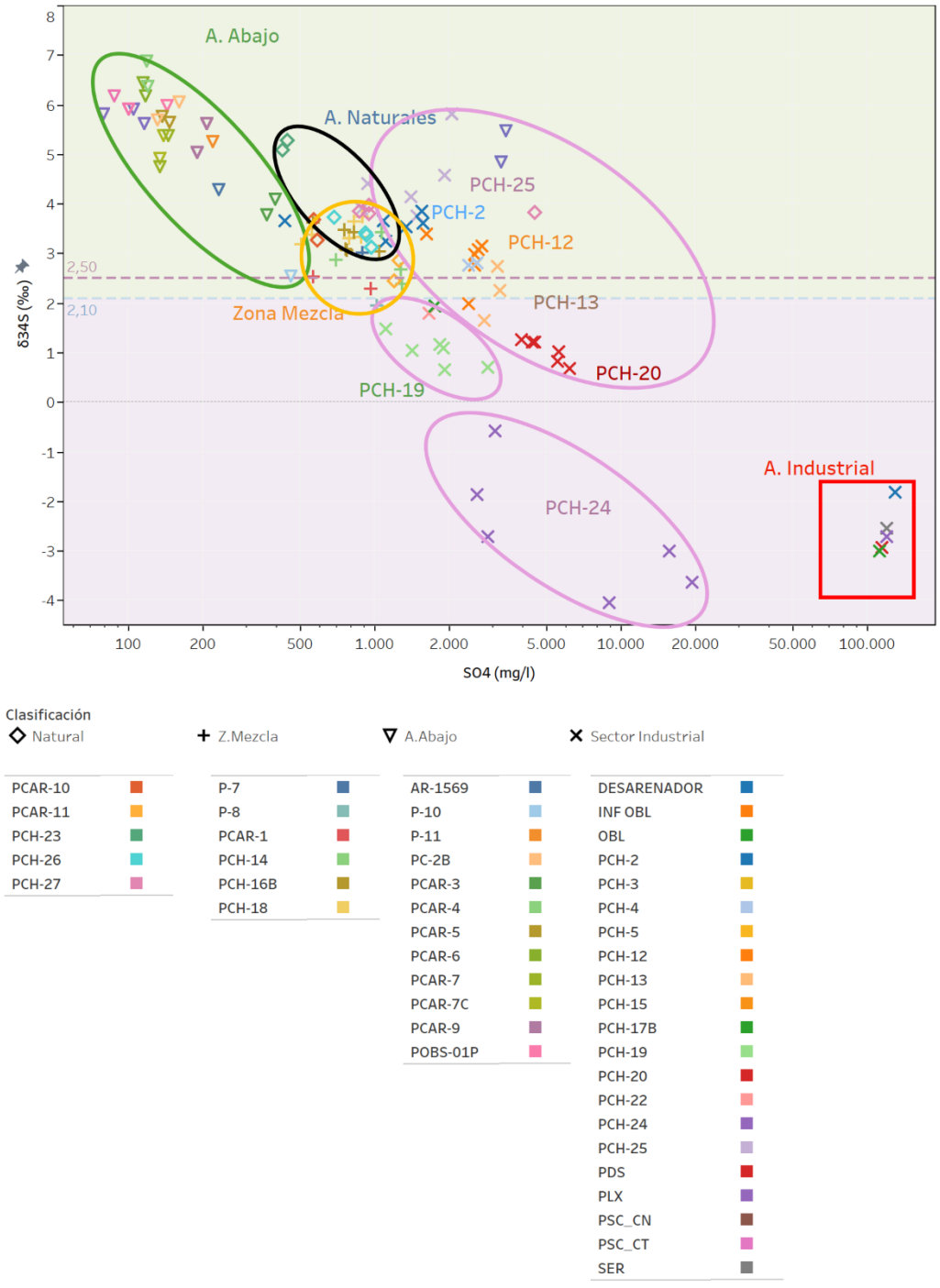
Las aguas subterráneas naturales de la subcuenca 8 se encuentran en el mismo rango de $\delta^{34}S$ y sulfatos que la aguas de la zona de mezcla ($\delta^{34}S$ en el rango entre 1,02 y 3,02 ‰). Es importante destacar en la zona del norte de Chile se reconocen la presencia de salares relictos en unidades estratigráficas, las cuales podrían dar origen a salmueras recicladas, causantes de altas salinidades en las aguas subterráneas (Kidder, 2020).

Por último, las aguas subterráneas aguas abajo de la zona de mezcla son más enriquecidas en $\delta^{34}S$, con rango variable entre 3,78 a 6,86 ‰ y valores más bajos de sulfato, variable entre 118 a 362 mg/l. Los contenidos altos de $\delta^{34}S$ reflejaría la presencia de niveles evaporíticos en la zona de Pampa Cere. Análisis mineralógicos de los suelos al sur de la zona de estudio indicó una abundancia de sulfatos entre 0 a 40,8 % p/p, siendo los principales minerales yeso, seguido de anhidrita, basanita y glauberita (Amphos21, 2022).



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-15: Contenido de $\delta^{34}S$ en sulfato de muestras de agua versus concentración de sulfato según la clasificación de las aguas definido en el análisis hidroquímico



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-16: Contenido de $\delta^{34}S$ en sulfato de muestras de agua versus concentración de sulfato según la clasificación de las aguas definido en el análisis hidroquímico

3.7 ANÁLISIS MULTIVARIABLE

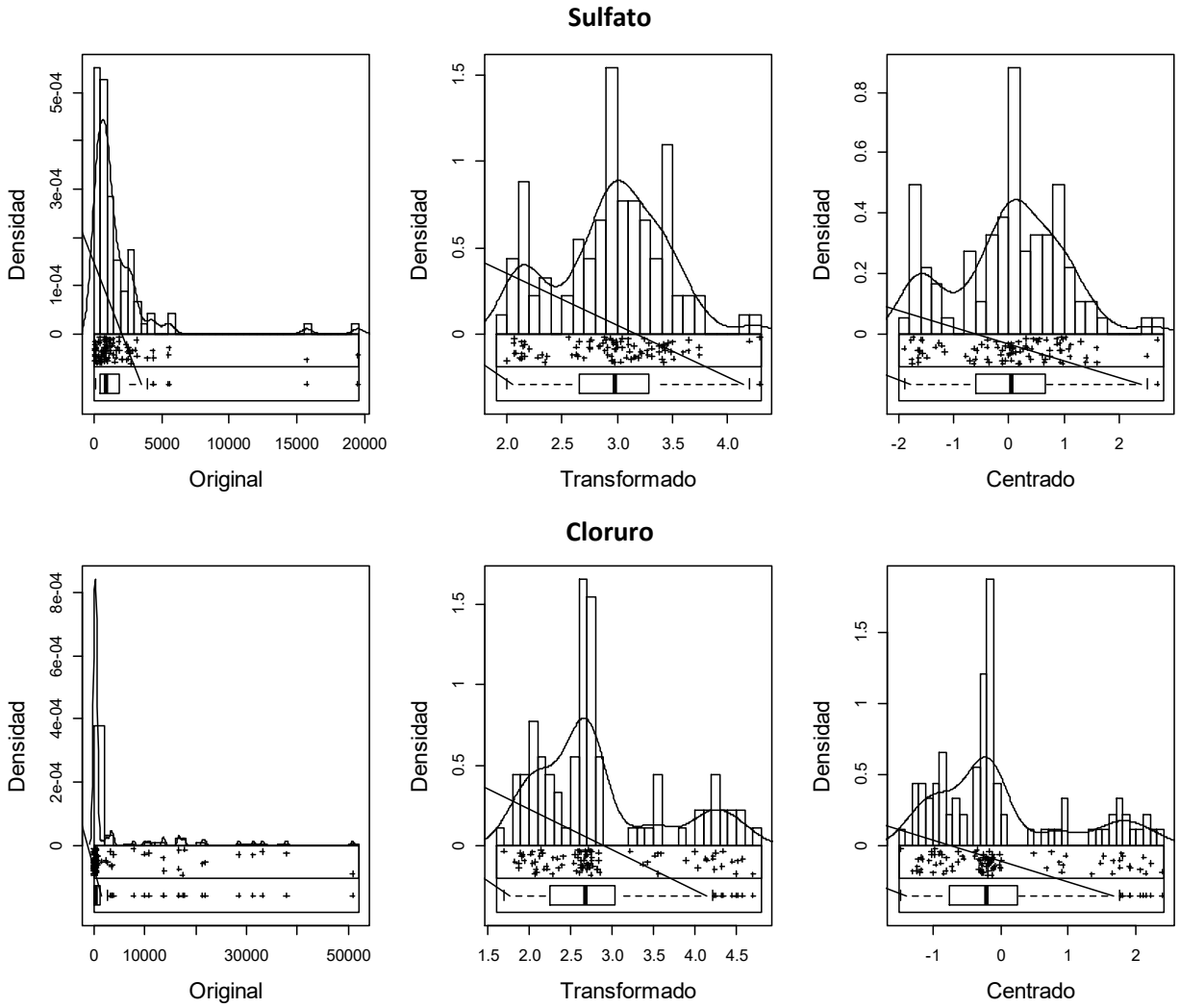
El objetivo del análisis multivariable fue determinar los diferentes procesos geoquímicos que controlan la calidad química e isotópica de las aguas de la zona de mezcla con el fin de definir un indicador que permita identificar la pluma proveniente de las infiltraciones del complejo industrial RT.

3.7.1 Análisis Univariable

Para el análisis estadístico se ha considerado un set de datos homogéneo de datos químicos e isotópicos, es decir, que todas las muestras contengan valores de concentraciones para todos los analitos considerados. Se cuenta con una base de datos de 91 muestras con 21 variables con más del 50% de los valores por sobre los diferentes límites de detección: pH, Al, B, Br, Ca, Cl, Fe, HCO_3, K, Li, Mg, Mn, Na, NO_3, PO_4, Si, SO_4, $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$, $\delta^{34}S$ y $\delta^{18}O$ en sulfato.

Se revisó los estadísticos de cada variable junto con los histogramas y gráficos de cajas. Se observó que todas los analíticos químicos presentan un fuerte sesgo positivo y con valores atípicos que una distribución normal (Tabla 3-5 y Figura 3-17). Por lo tanto, estas fueron transformadas para mejorar la distribución estadística utilizando la transformación logaritmo. Posteriormente, cada variable fue centrada utilizando la mediana y escalada o normalizada utilizando el promedio con el fin de comparar los elementos mayores, menores, trazas e isótopos (Figura 3-17). A partir de las variables transformadas, se distingue en la mayoría de las variables la presencia de al menos 2 poblaciones de datos representados (curva bi-normal), por lo que se puede inferir preliminarmente que existen al menos dos procesos geoquímicos que controlan la calidad química.

Dado el reducido número de muestras con química e isotopía, se analizó la matriz de correlación estimada a partir del determinante de covarianza mínima, un estimador robusto (no paramétrico) de la covarianza. Este tipo de correlación es menos influenciada por valores extremos que existen en la base de datos (Filzmoser, 2008). La Tabla 3-6 presenta la matriz de correlación, donde se destacan las correlaciones mayores a ± 0,8. Los pares que tiene estas características corresponden a B-Na, Cl-Mg, K-Mg, NO_3-SO_4, NO_3- $\delta^{34}S_{sulfato}$., SO_4- $\delta^{18}O$, SO_4- $\delta^{2}H$ y SO_4-$\delta^{34}S_{sulfato}$.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-17: Transformación de las variables químicas para análisis multivariable

Tabla 3-5: Resumen estadístico de variables consideradas en análisis multivariable

Parámetro	Unidad	Promedio	Desv. Estand.	RIQ	Sesgo	Curtosis	Min	P25	P50	P75	Max
Al	mg/l	0,70	1,06	0,50	3,16	10,48	0,01	0,18	0,39	0,68	5,89
B	mg/l	23,17	39,31	14,87	2,72	6,56	1,37	4,69	7,93	19,56	180,00
Br	mg/l	1,83	5,79	2,25	6,66	51,06	0,01	0,05	0,25	2,30	49,10
Ca	mg/l	980,8	2.148,2	409,3	3,57	12,59	26,40	144,94	221,59	554,21	10.680
Cl	mg/l	4.335	9.459	1.017	2,85	8,50	49,31	176,55	484,76	1.193,05	50.834
Fe	mg/l	1,74	3,30	0,93	2,81	7,70	0,01	0,15	0,44	1,08	16,95
HCO_3	mg/l	169,1	191,1	223,5	2,13	5,58	0,60	49,05	83,00	272,55	1.025
K	mg/l	41,86	63,09	25,68	2,59	6,49	1,31	9,97	15,40	35,65	303,69
Li	mg/l	2,61	7,49	0,42	3,58	12,36	0,01	0,11	0,25	0,53	38,40
Mg	mg/l	374,2	902,6	79,3	3,88	17,62	6,66	19,26	35,63	98,58	5.486
Mn	mg/l	0,26	0,87	0,16	5,91	35,82	0,01	0,03	0,05	0,18	5,98
Na	mg/l	3.099	5.684	1.267	2,20	3,80	119,14	297,13	431,00	1.563,85	22.086
NO_3	mg/l	3.751	8.070	1.180	2,52	6,12	0,01	16,57	99,80	1.196,44	39.564
pH	mg/l	7,60	0,83	0,95	-1,19	5,01	3,65	7,15	7,70	8,10	9,43
PO_4	mg/l	0,60	0,68	0,60	2,06	4,05	0,07	0,10	0,40	0,70	3,20
Si	mg/l	15,96	10,11	10,60	1,00	0,49	1,50	9,50	13,40	20,10	42,90
SO_4	mg/l	1.671	2.694	1.461	4,94	28,45	99,60	446,35	942,00	1.907,27	19.475
$\delta^{18}O_{agua}$	‰	-5,54	3,41	5,52	0,27	-0,82	-10,32	-8,48	-4,81	-2,96	2,71
$\delta^{2}H_{agua}$	‰	-54,70	13,07	22,68	-0,31	-1,29	-75,52	-66,20	-53,30	-43,52	-35,08
$\delta^{34}S_{sulfato}$	‰	3,25	2,00	1,86	-1,05	2,25	-3,65	2,48	3,36	4,34	6,86
$\delta^{18}O_{sulfato}$	‰	7,24	1,41	1,91	-0,02	-0,26	3,70	6,34	7,13	8,25	10,58

Nota: RIQ es rango Inter cuartil; P25 percentil 25, P50 mediana y P75 percentil 75.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-6: Matriz de correlación utilizando el determinante de covarianza mínima

	Al																			
B	0,002	**B**																		
Br	0,32	0,21	**Br**																	
Ca	0,18	0,48	0,13	**Ca**																
Cl	-0,11	0,47	-0,09	0,69	**Cl**															
Fe	0,66	-0,03	0,36	-0,10	-0,16	**Fe**														
HCO_3	-0,10	0,00	-0,21	0,01	0,38	-0,30	**HCO_3**													
K	-0,20	0,26	-0,31	0,40	0,75	-0,28	0,67	**K**												
Li	-0,20	0,42	-0,17	0,25	0,67	-0,17	0,65	0,76	**Li**											
Mg	-0,01	0,47	-0,10	0,71	0,85	-0,12	0,45	0,82	0,65	**Mg**										
Mn	0,54	0,25	0,12	0,14	0,20	0,62	-0,01	0,14	0,10	0,30	**Mn**									
Na	-0,06	0,94	0,18	0,59	0,58	-0,02	0,00	0,38	0,49	0,59	0,24	**Na**								
NO_3	0,21	0,64	0,29	0,66	0,33	0,12	-0,33	0,02	0,00	0,36	0,15	0,67	**NO_3**							
pH	-0,12	-0,28	-0,12	-0,51	-0,42	0,09	-0,29	-0,33	-0,29	-0,45	0,01	-0,27	-0,31	**pH**						
PO_4	-0,32	-0,34	-0,50	-0,31	0,07	-0,38	0,36	0,29	0,17	0,02	-0,18	-0,34	-0,58	0,26	**PO_4**					
Si	0,20	-0,18	-0,30	0,27	0,29	-0,22	0,59	0,51	0,29	0,37	-0,07	-0,16	-0,15	-0,34	0,34	**Si**				
SO_4	0,21	0,73	0,37	0,55	0,15	0,17	-0,47	-0,08	-0,06	0,28	0,25	0,76	0,83	-0,15	-0,60	-0,35	**SO_4**			
$\delta^{18}O_{agua}$	0,21	0,63	0,30	0,63	0,10	0,06	-0,51	-0,15	-0,11	0,19	0,08	0,64	0,76	-0,19	-0,53	-0,18	0,88	**$\delta^{18}O$**		
$\delta^{2}H_{agua}$	0,21	0,52	0,35	0,46	-0,10	0,13	-0,61	-0,32	-0,23	0,00	0,02	0,53	0,69	-0,08	-0,54	-0,28	0,84	0,97	**$\delta^{2}H$**	
$\delta^{34}S_{sul}$	-0,16	-0,61	-0,42	-0,50	-0,22	-0,20	0,42	0,04	0,06	-0,33	-0,20	-0,68	-0,83	0,12	0,53	0,35	-0,90	-0,71	-0,67	**$\delta^{34}S$**
$\delta^{18}O_{sul}$	-0,16	-0,31	-0,27	-0,18	0,08	-0,22	0,24	0,13	0,21	-0,09	-0,19	-0,35	-0,54	0,00	0,36	0,31	-0,63	-0,41	-0,42	0,68

Nota: correlaciones destacadas > ± 0.8.

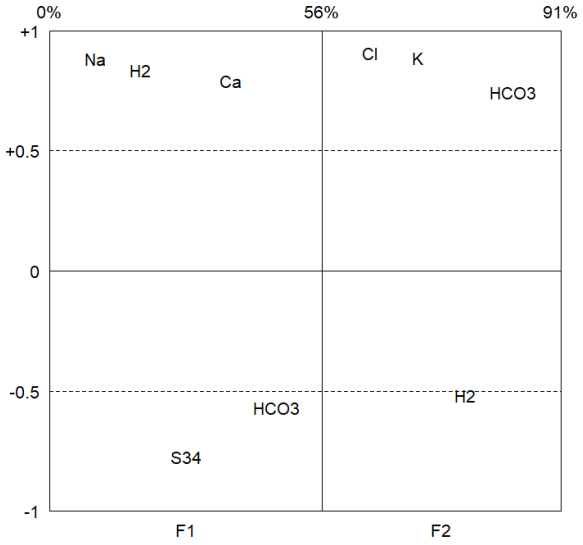
Fuente: Elaboración propia

3.7.2 Análisis de Factores Principales

Dado el número de muestras, se requiere un set de máximo de 11 variables para realizar el análisis de factores principales (AFP) considerando la recomendación $n > p^2$, donde n es el número de muestras y p la cantidad de variable, asi evitar la pérdida de grados de libertad. A partir de matriz de correlación revisada (Tabla 3-6), se selección las siguientes variables para el AFP:

Na	Cl	K	Ca	HCO_3	δ^2H	$\delta^{34}S_{sulfato}$

El análisis de factores principales se realizó considerando una rotación del tipo varimax y se utilizó el determinante de covarianza mínima como matriz de correlación y el puntaje para cada factor se estimó utilizando un modelo de regresión. Se consideró 2 factores, los cuales explican en su totalidad un 91% de la varianza de los datos (Figura 3-18), siendo del Factor 1 el que explica el 56% de la varianza de los datos, por lo tanto, el enfoque de la discusión se centra en este factor.



Fuente: Elaboración propia

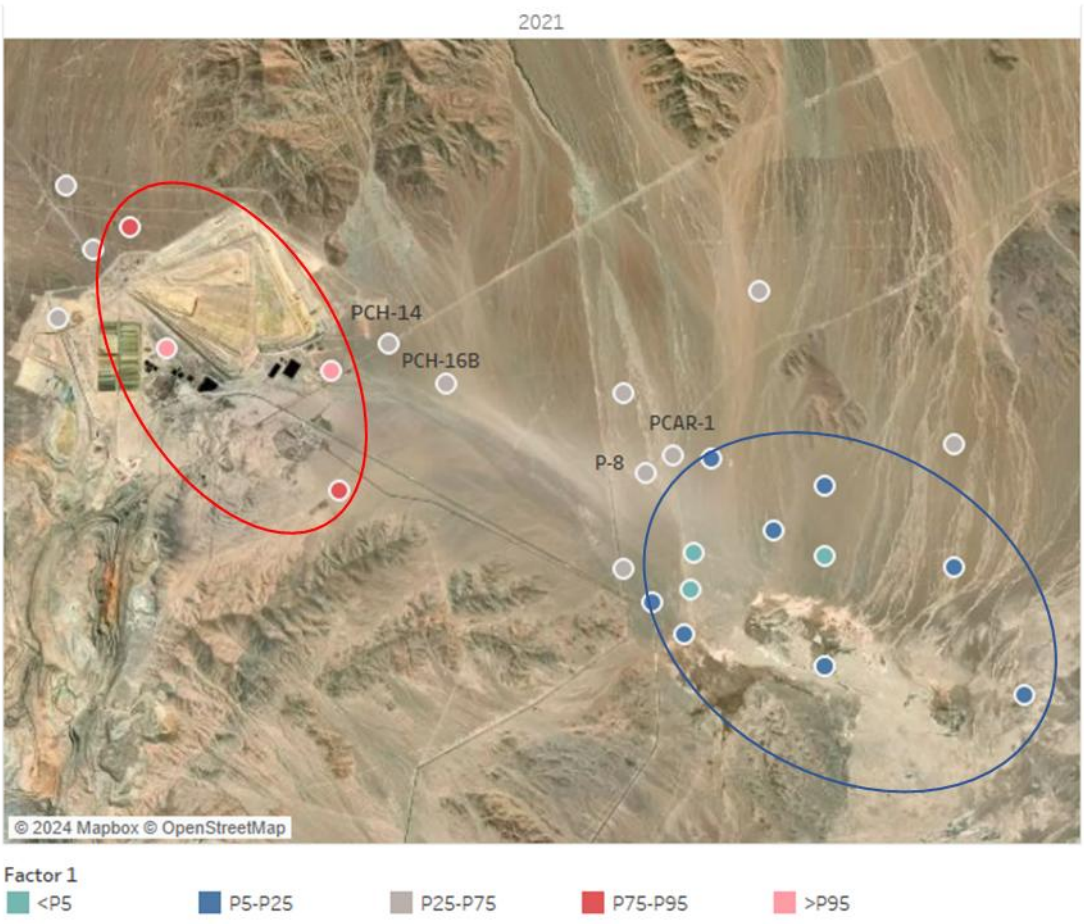
Figura 3-18: Distribución de variables con respecto a los 2 factores del AFP

El primer factor (Factor 1) se correlaciona positivamente con sodio, deuterio y calcio y negativamente con $\delta^{34}S_{sulfato}$ y bicarbonato (Figura 3-18). Por extrapolación de las correlaciones de las variables, este factor también se correlacionaría positivamente con nitrato, sulfato, $\delta^{18}O$ y boro. Según la distribución espacial de los puntajes de este factor (Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-19), se reconocen 2 procesos que controlan la calidad química: 1) meteorización de silicatos y sulfuros, caracterizada por aguas con una composición isotópica relativamente más enriquecida en $\delta^{18}O$; y 2) meteorización de rocas sedimentarias con niveles evaporíticos que involucra la disolución de yeso, calcita y/o haluros y con aguas empobrecidas con respecto a $\delta^{18}O$. La química e isotopía de las aguas en el sector de mezcla tienen una composición intermedia entre estos dos grupos.

El Factor 1 destaca el hecho que los analitos presentes en las aguas influenciadas por actividades históricas del sector industrial RT, tales como sulfatos, nitratos, calcio, etc también son aportados naturalmente por las rocas de los acuíferos aguas abajo, lo que dificulta la interpretación de las series de tiempo de las concentraciones de elementos. Por lo tanto, el uso de sulfato o cloruros, como un trazador de la pluma de infiltraciones, puede llevar a interpretaciones erróneas, ya que estos parámetros no son conservativos en la zona de RT.

El Factor 2 se correlaciona con cloruro, potasio y bicarbonato y negativamente con deuterio. Por extrapolación de las correlaciones de las variables, este factor también se correlacionaría positivamente con magnesio, silicio y litio. Este factor representa principalmente las características hidroquímicas observadas en determinados puntos del sector industrial RT (PCH-24, PCH-2 y PCH-20), además de PCH-19 y algunos puntos de la zona de mezcla, como PCH-14 y PCH-16B.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-19: Distribución espacial según percentiles del puntaje del factor 1 del análisis factores principales

3.7.3 Indicador Químico de Avance de las Infiltraciones

Con el objetivo de mejorar el entendimiento de los procesos geoquímicos que controlan la calidad química de las aguas subterránea se ha definido un indicador combinado que permita evaluar espacial y temporalmente la expresión hidroquímica de la pluma identificada aguas abajo del sector industrial RT. Como se ha dicho previamente, el sulfato y cloruro no son conservativos, ya que la geología presente en el sector de RT también reacciona con el agua produciendo aumentos en estas variables.

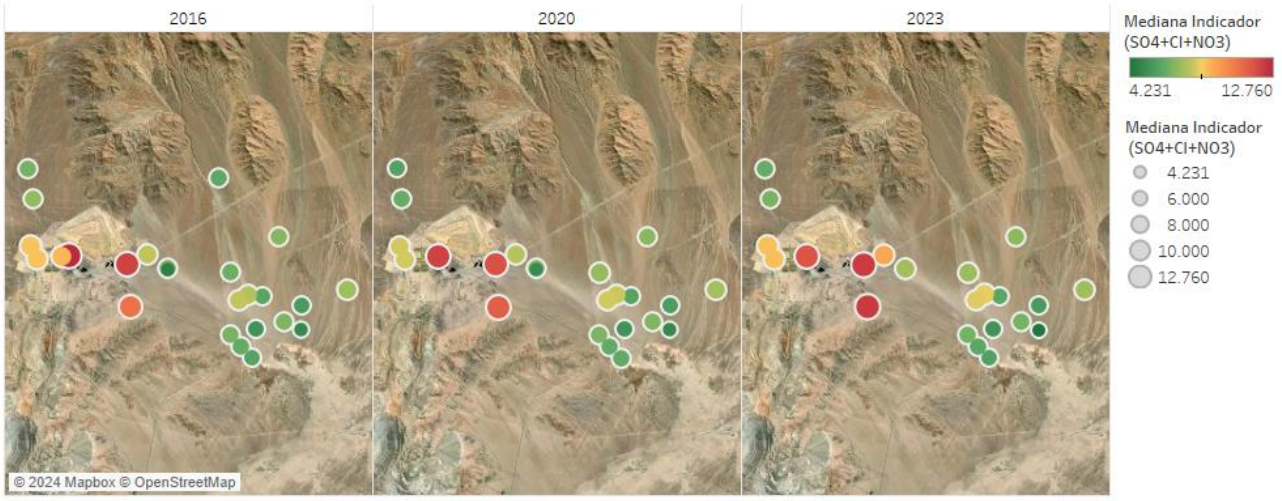
A partir del análisis multivariable realizado y la evolución en el tiempo de los parámetros, se consideró los siguientes parámetros como candidatos como trazadores: sulfato, cloruro, nitrato, sodio y potasio. Se evaluaron distintas combinaciones de ellos, optimizando el número de variables. El indicador químico considerado corresponde al siguiente:

$$\text{Indicador químico} = SO_4 + Cl + NO_3$$

Estudios indican que en la zona existirían salares relictos, sin embargo las series de tiempo del nitrato en los pozos P-8 y PCAR-1 no se podrían explicar por niveles naturales de las rocas circundantes.

La distribución espacial de este indicador químico es mostrada en la Figura 3-20. Para mejorar la representación gráfica, se transformó cada variable a logaritmo:

$$\text{Indicador químico} = \log_{10}(SO_4) + \log_{10}(Cl) + \log_{10}(NO_3)$$



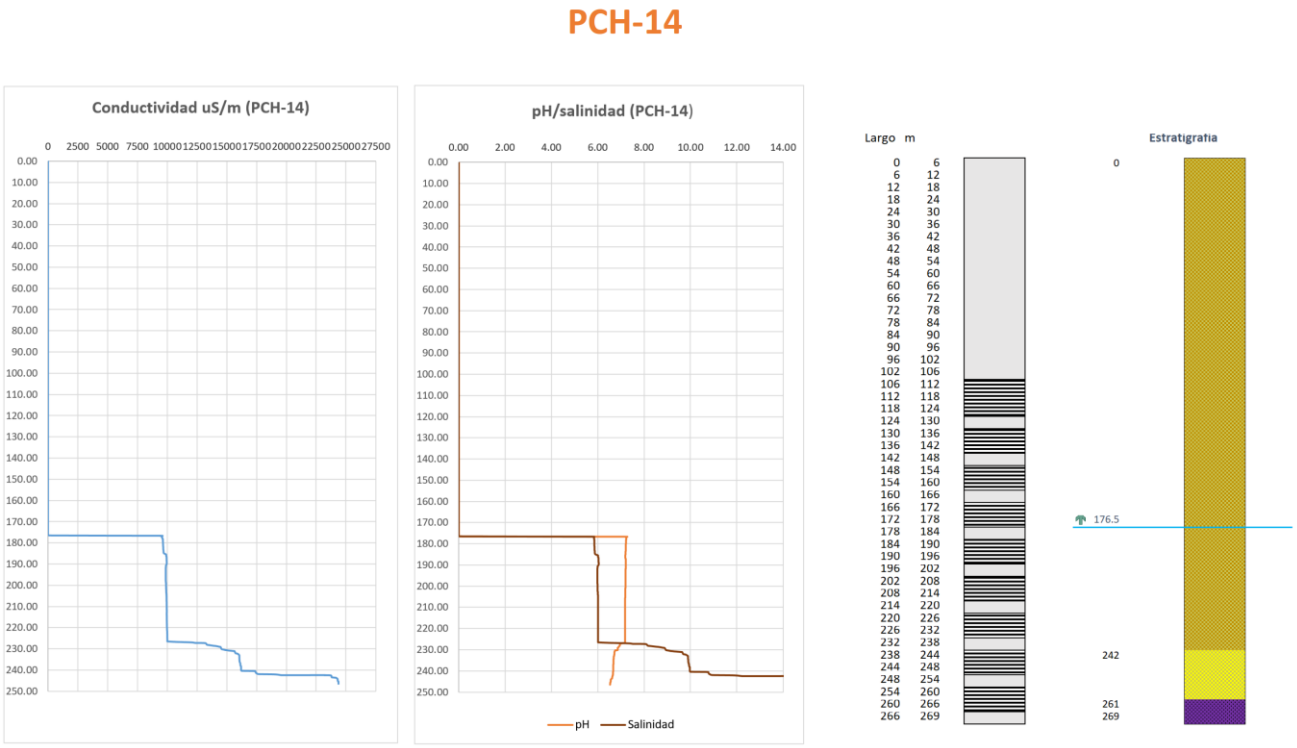
Fuente: Elaboración propia

Figura 3-20: Distribución espacial del indicador de la pluma para los años 2016, 2020 y 2023

La Figura 3-20 permite identificar la evolución de la pluma en 3 años considerados 2016, 2020 y 2023. Se observa que el avance de la pluma se detecta en el pozo P-8 y PCAR-1 desde el 2016, pero no es evidente en los pozos PCH-16B y PCH-18 previo al 2023, año en el cual ya se detecta la pluma en el PCH-14 y en menor medida el PCH-16B y PCH-18. Esto podría dar cuenta de que 1) existe una estratificación de la pluma ubicada en el acuífero

principal (inferior; Figura 3-21), que si bien produce aumento de niveles, esta no logra alcanzar niveles más superficiales (nivel freático) sino hasta el 2023, nivel donde se sacan las muestras de pozos a través de bailer; y/o 2) existe un cambio en la toma de muestra que permite observar concentraciones más altas de los parámetros indicadores.

Finalmente, la instalación de la barrera hidráulica se debería evaluar en la cercanía del pozo PCH-14, pozo para el cual se cuenta con evidencia clara de afectación química e isotópica de las infiltraciones.



Fuente: Codelco, 2023

Figura 3-21: Perfilaje de pozo PCH-14

4 CONCLUSIONES

De acuerdo con los antecedentes revisados, se cuenta con 3 monitoreos que consideran química e isotopía en la mayoría de las estaciones consideradas (septiembre del 2014, julio del 2016 y diciembre del 2021), a partir de los cuales se realizó la interpretación de la evolución en el tiempo de las aguas subterráneas naturales y de las aguas subterráneas en la zona de mezcla. Además, a partir de la información estratigráfica, litológica y de habilitación de los pozos disponible, se caracterizó geoquímicamente el entorno.

Las estaciones de monitoreo de aguas fueron seleccionadas y categorizadas según la distribución espacial y relación con la posible pluma en 4 grupos: aguas naturales, aguas en el sector industrial, zona de mezcla y aguas abajo. Las características principales de los diferentes tipos de aguas se detallan a continuación:

- Las **aguas naturales** de la zona de estudio presentan características hidroquímicas e isotópicas variadas, dependiendo de su ubicación de subcuenca donde se encuentran. Las aguas naturales presentaron una evolución en su composición hidroquímica, desde aguas sulfatas/cloruradas-sódico/cálcicas a sulfatadas-sódico/cálcicas o sulfatadas-cálcicas, con concentraciones de sulfato que varían entre 400-1.200 mg/l, indicando en algunos casos la disolución de minerales sulfatados y con ello contribuciones naturales de sulfatos al acuífero, mientras que en otros caso se observaron altas concentraciones de cloruro y sodio, con valores promedio de 700 mg/l y 600 mg/l respectivamente, indicando contribuciones naturales de estos elementos a la zona de mezcla.
- La signatura isotópica ($\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$) de las aguas naturales fueron diferente dependiendo de la subcuenca en la cual se ubican los puntos de monitoreo, debido principalmente a la diferente altura de recarga de las aguas en dichas subcuencas. Esto genera un empobrecimiento de las aguas que se recargan a menor altura en comparación con aquellas que se recargan a mayor altura.
- Las **aguas en el sector industrial** evidenciaron una evolución en su composición hidroquímica, pasando de sulfatadas/cloruradas-sódicas a cloruradas-sódico/cálcicas, con concentraciones de sulfatos que varían entre 500 y 30.000 mg/l, cloruros entre 700 y 45.000 mg/l y nitrato entre 100 y 55.000 mg/l, siendo estos parámetros indicadores útiles, para caracterizar las diferencias hidroquímicas entre las aguas del sector industrial y aquellas observadas aguas abajo, considerando simultáneamente los aportes naturales existentes.
- La isotopía de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de las aguas del sector industrial en los pozos PCH-24 y PCH-25 indican que son empobrecidas en $\delta^{2}H$ con respecto a las aguas naturales del PCH-26 y PCH-27, indicando por una parte, la mezcla que se realiza en manejo de agua, para lo cual se ocupa una pequeña fracción de agua provenientes desde Estanque de Agua de San Pedro, Colana e Inacaliri, con una isotopía más empobrecida; y por otra parte, proceso de evaporación. Además, las aguas representativas de sectores históricamente intervenidos dentro del sector industrial presentan concentraciones elevadas de sulfato y valores relativamente empobrecidos de $\delta^{34}S$, características compatibles con procesos de oxidación y disolución de minerales sulfurados.

- Las aguas subterráneas de la **zona de mezcla** se agruparon en proximales (PCH-14, PCH-16B y PCH-18) y distales (P-7, P-8 y PCAR-1) según la distribución de los pozos respecto del complejo industrial. Las aguas subterráneas proximales, presentaron en general una evolución pasando de sulfatadas-sódicas a sulfatadas/cloruradas-sódico/cálcicas, con concentraciones de sulfato, cloruro y nitratos entre 500-2.000 mg/l, 80-1.400 mg/l y 1-1.300 mg/l respectivamente. Las aguas subterráneas distales evidenciaron una evolución en general pasando de cloruradas-sódicas a sulfatadas-calco sódicas, con concentraciones de sulfato, cloruro y nitratos entre 400-1.000 mg/l, 150-700 mg/l y 50-350 mg/l respectivamente
- Las aguas subterráneas de la zona de mezcla reflejan, al igual que las aguas naturales, la marcada diferencia en su signatura isotópica debido a los aportes de las subcuencas donde se encuentran. Por lo tanto, no es posible utilizar los isótopos de la molécula de agua como trazadores del avance de la pluma para determinar del porcentaje de mezcla de aguas frescas y del sector industrial, enfoque clásico de dilución hacia aguas abajo.

A partir del análisis de relaciones iónicas, índices de saturación y análisis multivariable, se evidencia 2 procesos que controlan principalmente la calidad química en la zona de estudio: 1) meteorización de silicatos y sulfuros de las aguas del sector industrial enriquecida en $\delta^{18}O$ y empobrecida en $\delta^{34}S$; y 2) meteorización de rocas sedimentarias con niveles evaporíticos que involucra la disolución de yeso, calcita y/o haluros y con aguas empobrecidas con respecto a $\delta^{18}O$, con una posible recarga a mayor altura que las aguas industriales. El análisis de factores principales destaca el hecho que los analitos que caracterizan las aguas de los sectores históricamente intervenidos en el sector industrial de RT, tales como sulfatos, nitratos, calcio, etc también son aportados naturalmente por las rocas de los acuíferos aguas abajo, lo que dificulta la interpretación de las series de tiempo de las concentraciones de elementos. Por lo tanto, el uso de sulfato o cloruros, como un trazador de la pluma de infiltraciones históricas, puede llevar a interpretaciones erróneas ya que estos parámetros no son conservativos en la zona de RT.

El análisis multivariable realizado y la evolución en el tiempo de los parámetros permitió seleccionar un indicador químico, compuesto por sulfato, cloruro y nitrato. La distribución espacial y temporal de este indicador permitió observar que la pluma se detecta en el pozo P-8 y PCAR-1 desde el 2016, pero no es evidente en los pozos PCH-16B y PCH-18 previo al 2023, año en el cual ya se detecta la pluma histórica en el PCH-14 y en menor medida el PCH-16B y PCH-18. Esto podría dar cuenta de que existe una estratificación de la pluma ubicada en el acuífero principal que si bien produce aumento de niveles, esta no logra alcanzar niveles más superficiales (nivel freático) sino hasta el 2023, nivel donde se sacan las muestras de pozos a través de bailer.

Finalmente, la instalación de la barrera hidráulica se debería evaluar aguas abajo del sector industrial, en el cual se ha demostrado una afectación histórica.

5 REFERENCIAS

Amphos21 (2020). Plan de Vigilancia Ambiental Sector Radomiro Tomic, Informe Anual de Monitoreo Periodo diciembre 2019-octubre 2020. Informe A21_980_IN05_vB.

Amphos21 (2022). Plan de Vigilancia Ambiental Sector Radomiro Tomic, Informe Anual de Monitoreo Periodo enero-diciembre 2021. Informe A21_980_IN41_vB.

Amphos21 (2022). Servicio Hidrogeológico Estudio Depósito de Relaves Talabre. Actualización modelo conceptual. Versión D. A21_1011_IN06_vD.

Amphos21 (2023). Aguas de contacto complejo Chuquicamata. Revisión y análisis de la hidrogeología e hidrogeoquímica. Rev B. Septiembre

Aravena R, Suzuki O, Peña H, Pollastri A, Fuenzalida H, Grilli A (1999). Isotopic composition and origin of the precipitation in Northern Chile. Applied Geochemistry, páginas 411-422.

Craig H. (1961) Isotopic Variations in Meteoric Waters. Science.133(3465):1702-3.

Hídrica (2022). ODS N°12 Estudio de Infiltraciones Complejo Industrial División Radomiro Tomic, Descripción pormenorizada del funcionamiento hídrico e histórico de los procesos industriales relacionados. Informe HID-22-10 Rev B. Diciembre.

Hídrica (2023). ODS N°12 Estudio de Infiltraciones Complejo Industrial División Radomiro Tomic, Informe Final. Informe HID-22-10 Rev 0. Agosto.

Hounslow, A. (1995). Water Quality Data: Analysis and Interpretation.

Kidder, James & Leybourne, Matthew & Layton-Matthews, Daniel. (2022). Using groundwater in the hyper-arid Atacama Desert to discover buried hydrothermal mineral deposits. International Geology Review. 10.1080/00206814.2022.2037022.

Merkel, Broder & Planer-Friedrich, Britta & Nordstrom, Darrell. (2008). Groundwater Geochemistry: A Practical Guide to Modeling of Natural and Contaminated Aquatic Systems. 10.1007/978-3-540-74668-3. Parkhurst y Appelo, 2013

Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J. (2013) Description of Input and Examples for PHREEQC Version 3—A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. US Geological Survey Techniques and Methods, Book 6, Chapter A43, 497 p. http://pubs.usgs.gov/tm/06/a43.

Piper, A,M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses, Transactions. American Geophysical Union 25:914-23.

Rech, J.; Quade, J.; Hart, W. (2002). Isotopic evidence for the source of Ca and S in soil gypsum, anhydrite and calcite in the Atacama Desert, Chile. Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 67, No. 4, pp. 575–586, 2003

Reimann, C. & Filzmoser, P., Garrett, R.G., Dutter, R..(2008). Statistical data analysis explained. Applied Environmental Statistics with R.

SGA (2019). Anexo 2-8 Caracterización Ambiental de Hidrogeología y Calidad de Agua, DIA "Actualización Proyecto Minero División Radomiro Tomic".

SM -1030 (2018). Standard Methods Committee of the American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation. 1030 Data Quality In: Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater. Lipps WC, Baxter TE, Braun-Howland E, editors. Washington DC: APHA Press. DOI: 10.2105/SMWW.2882.006

WSP (2017). Actualización Evaluación Hidroquímica RT-Cere-Loa, Contrato N°4400145018. Memorandum técnico WSP-56626-MEM-HDQ-0002.

WSP (2018). Servicio Hidrogeológico y Control Técnico para la Perforación y la Construcción de Pozos Hidrogeológicos. Informe Final Modelo de Flujo y Transporte RT-Cere-Loa. Junio.

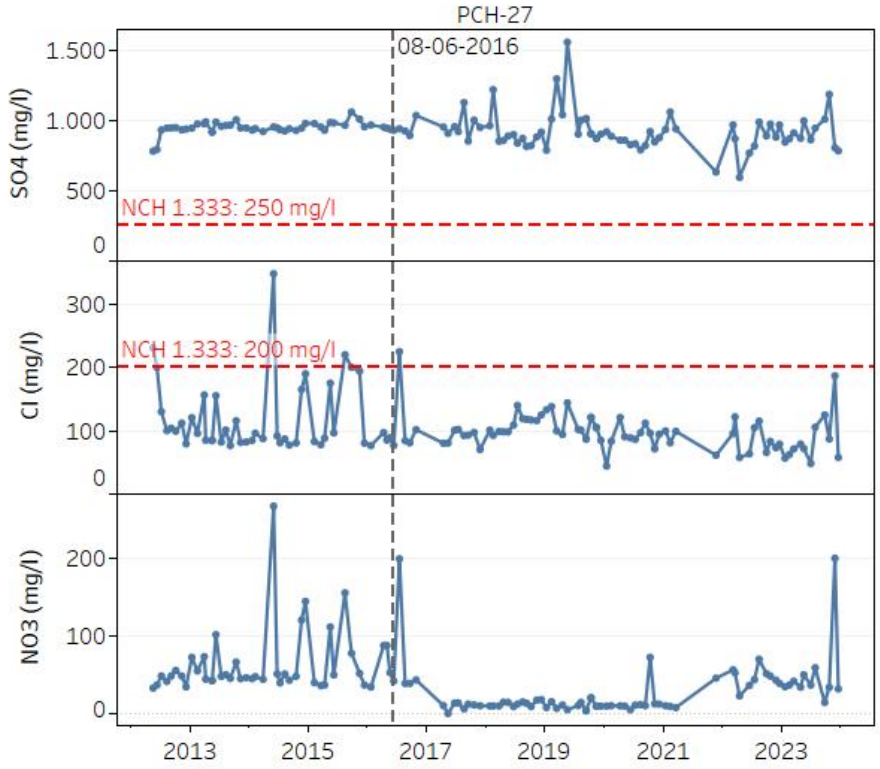
Zentilli, M; Leiva, G.; Rojas de la R., J.; Graves, M. (1994). The Chuquicamata Porphyry Copper System Revised. 7° Congreso Geológico Chileno. Actas Volumen II. Páginas 1647-1651.

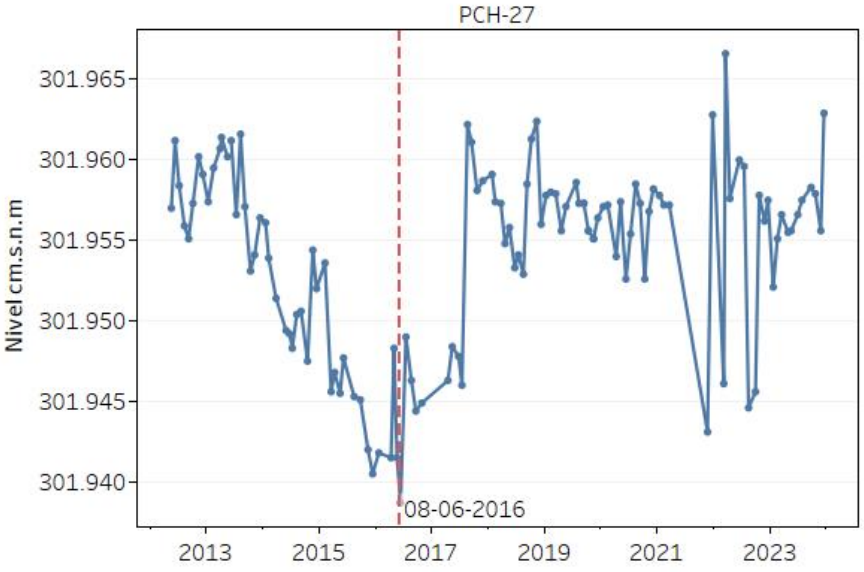
ANEXOS

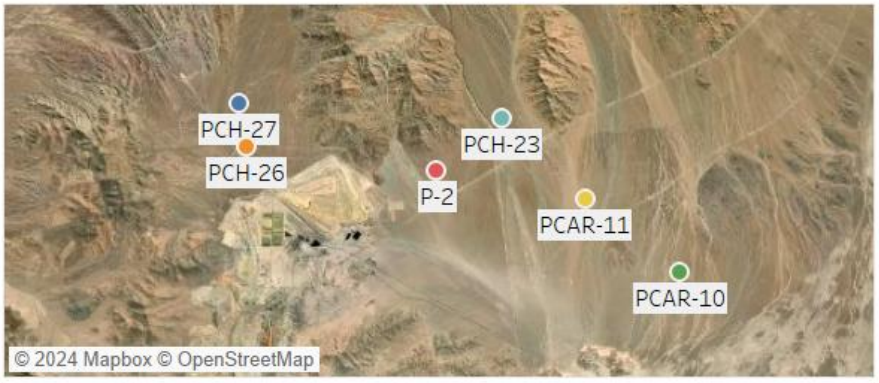
Flow
Hydro Consulting

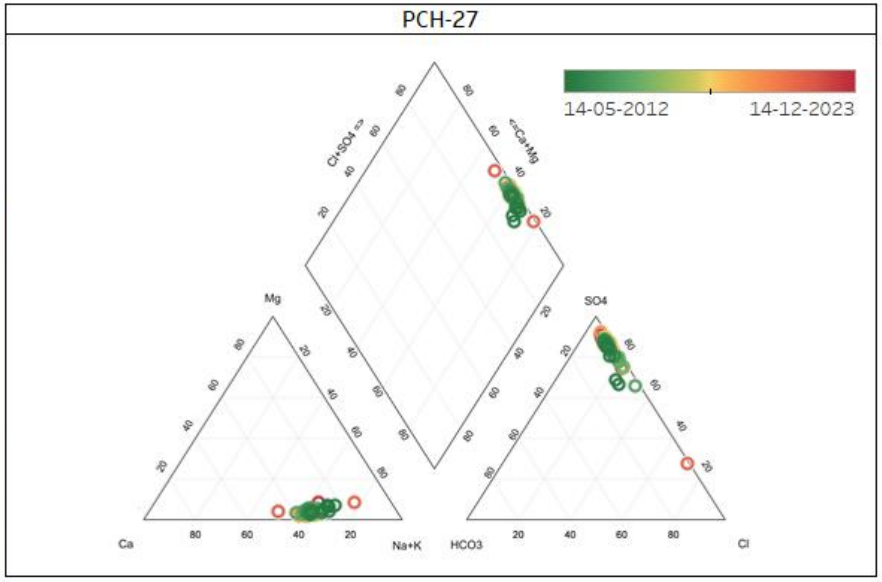
ANEXO A

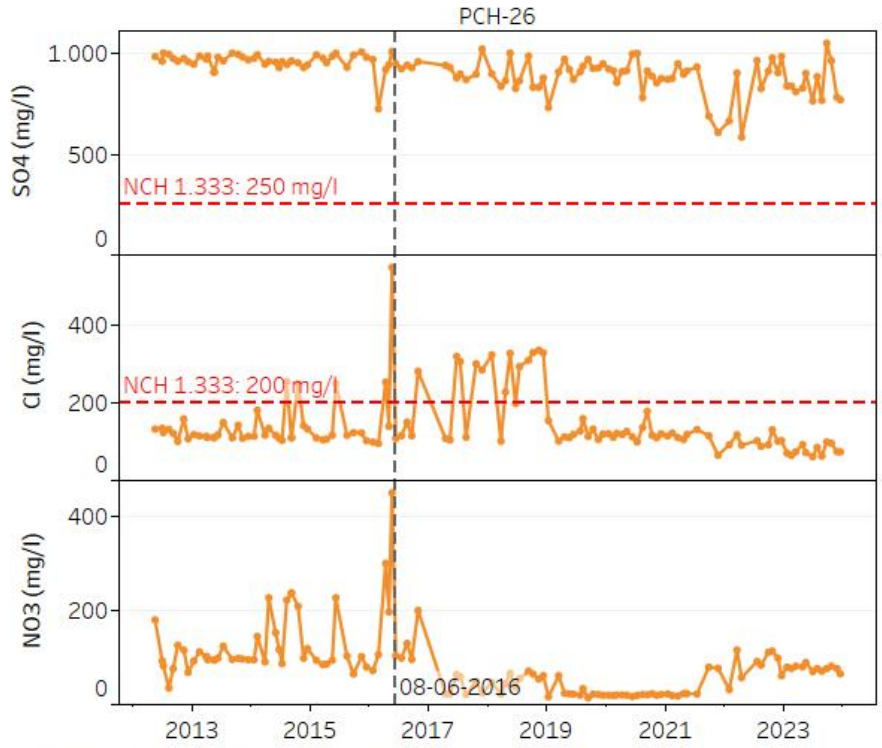
Evolución Temporal de Calidad Química

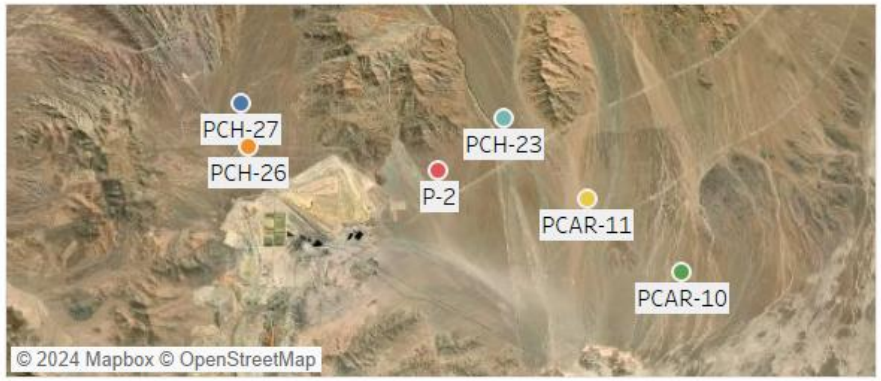

PCH-27
08-06-2016
SO4 (mg/l)
NCH 1.333: 250 mg/l
Cl (mg/l)
NCH 1.333: 200 mg/l
NO3 (mg/l)
2013
2015
2017
2019
2021
2023

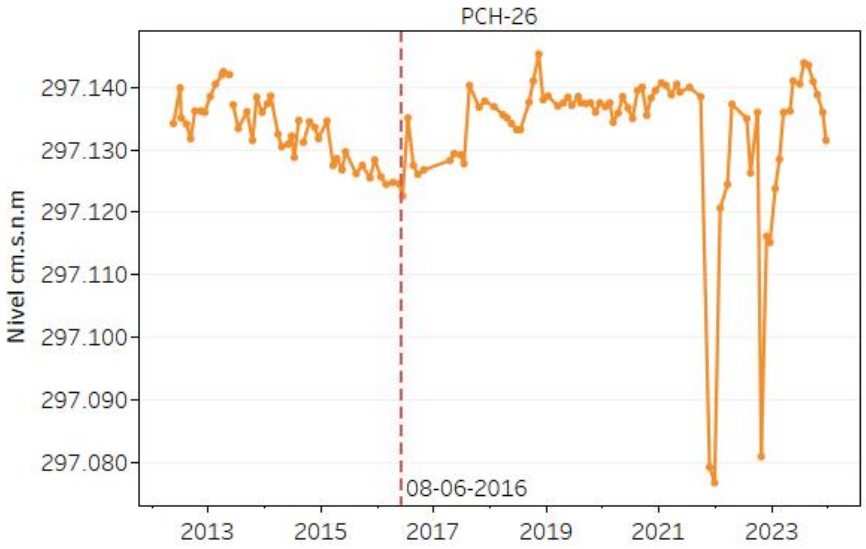

PCH-27
Nivel cm.s.n.m
08-06-2016
2013
2015
2017
2019
2021
2023

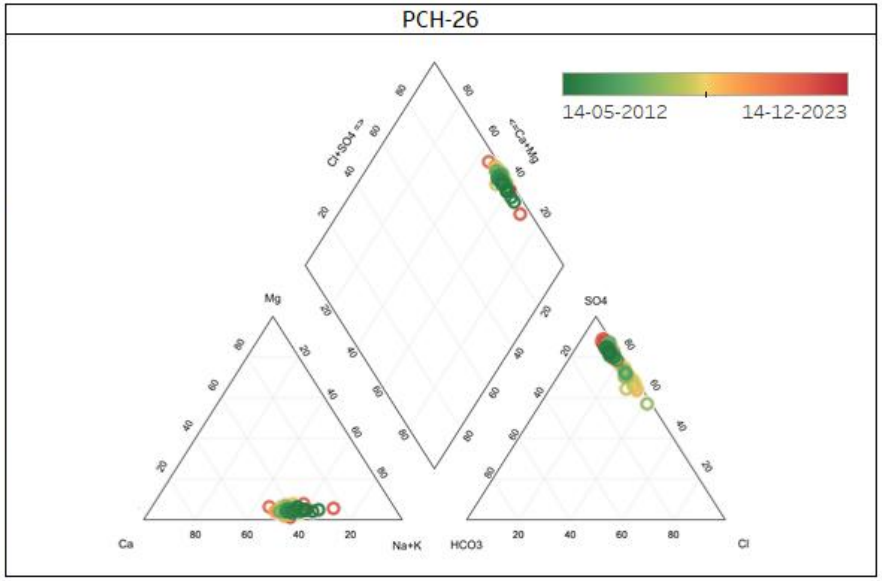

PCH-27
PCH-26
PCH-23
P-2
PCAR-11
PCAR-10
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap

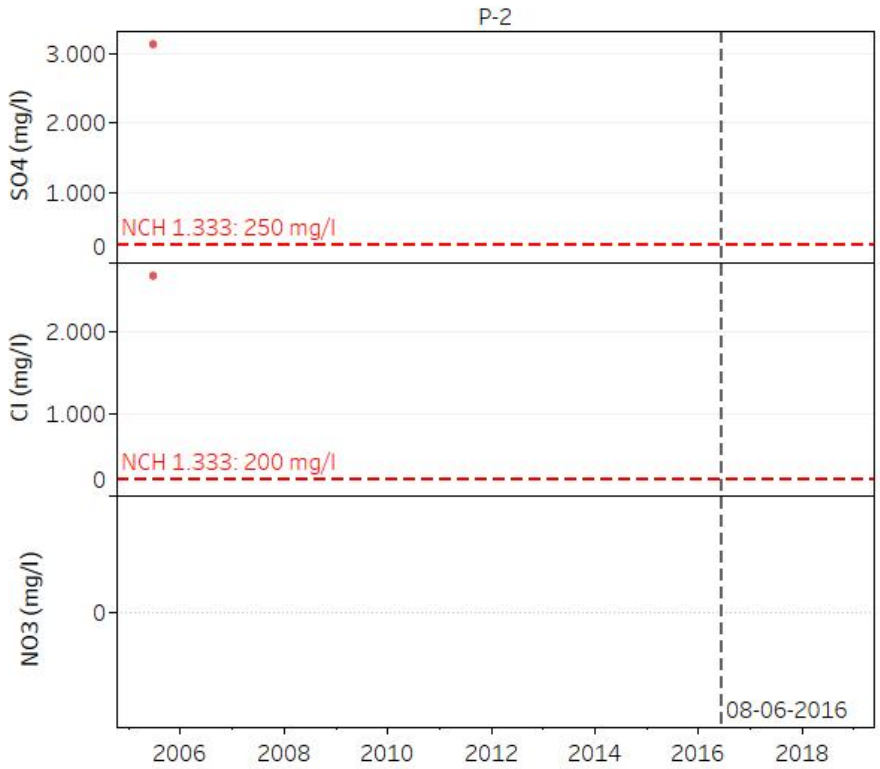

PCH-27
14-05-2012
14-12-2023
Ca
Mg
Na+K
HCO3
SO4
Cl


PCH-26
SO4 (mg/l)
1.000
500
0
NCH 1.333: 250 mg/l
Cl (mg/l)
400
200
0
NCH 1.333: 200 mg/l
NO3 (mg/l)
400
200
0
08-06-2016
2013
2015
2017
2019
2021
2023

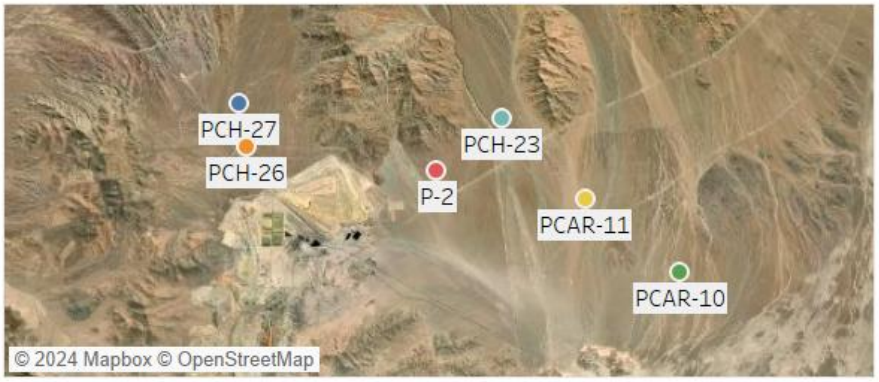

PCH-27
PCH-26
PCH-23
P-2
PCAR-11
PCAR-10
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap

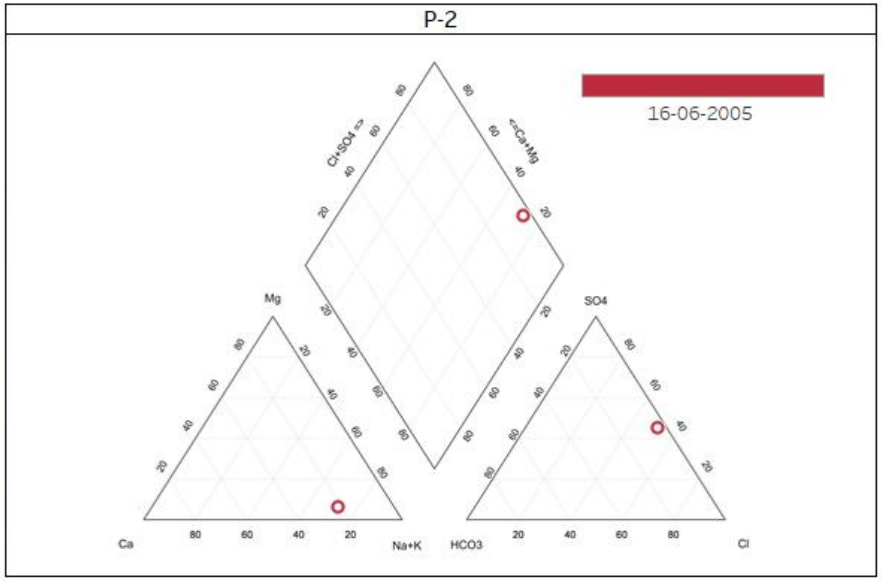

PCH-26
Nivel cm.s.n.m
297.140
297.130
297.120
297.110
297.100
297.090
297.080
08-06-2016
2013
2015
2017
2019
2021
2023

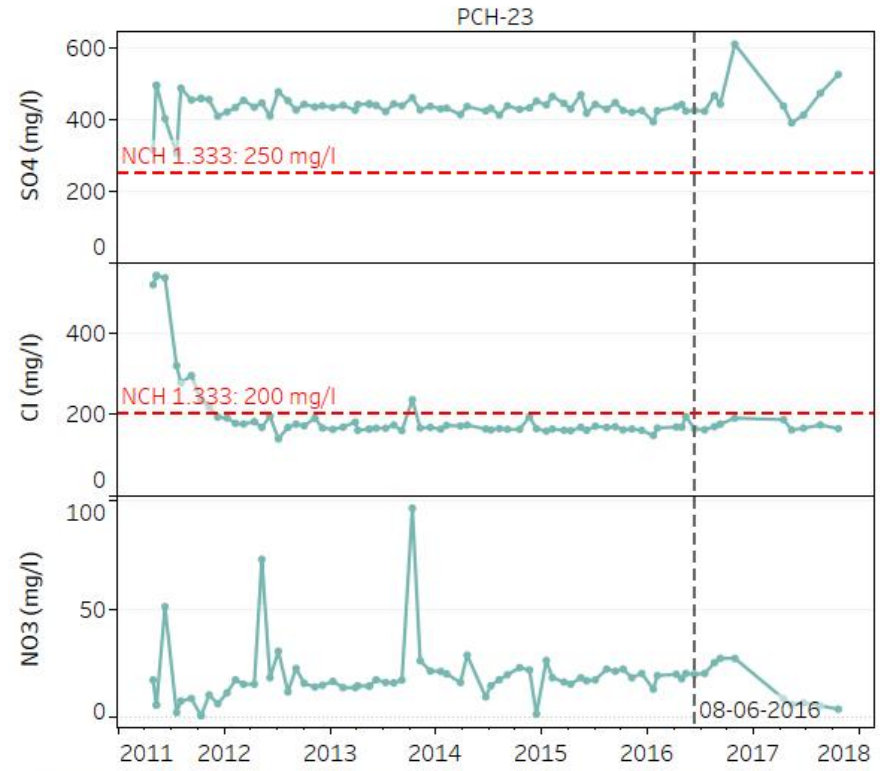

PCH-26
14-05-2012
14-12-2023
Ca
Mg
Na+K
HCO3
SO4
Cl

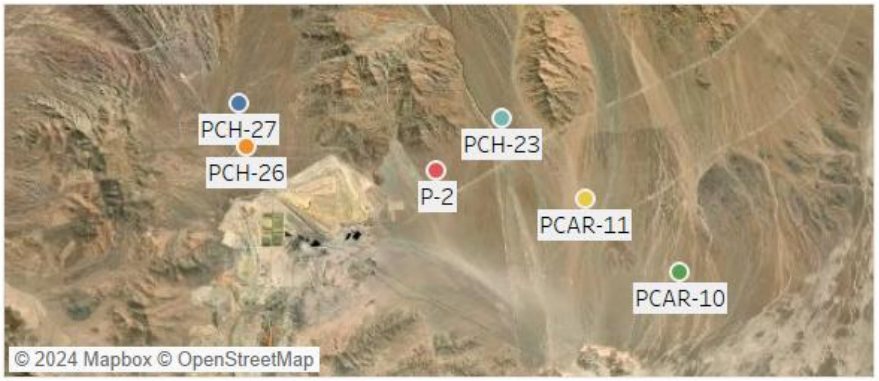

P-2
SO4 (mg/l)
3.000
2.000
1.000
0
NCH 1.333: 250 mg/l
Cl (mg/l)
2.000
1.000
0
NCH 1.333: 200 mg/l
NO3 (mg/l)
0
08-06-2016
2006
2008
2010
2012
2014
2016
2018

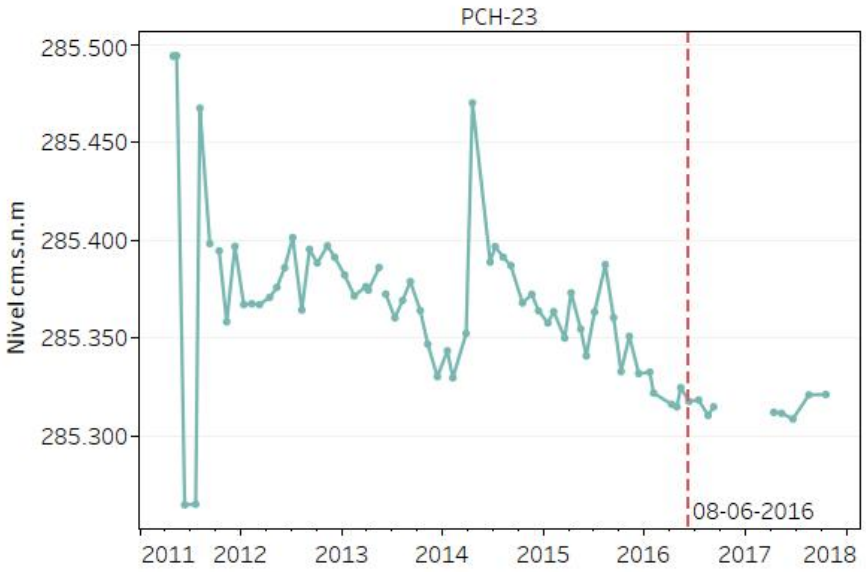

P-2
Nivel cm.s.n.m
0
2005

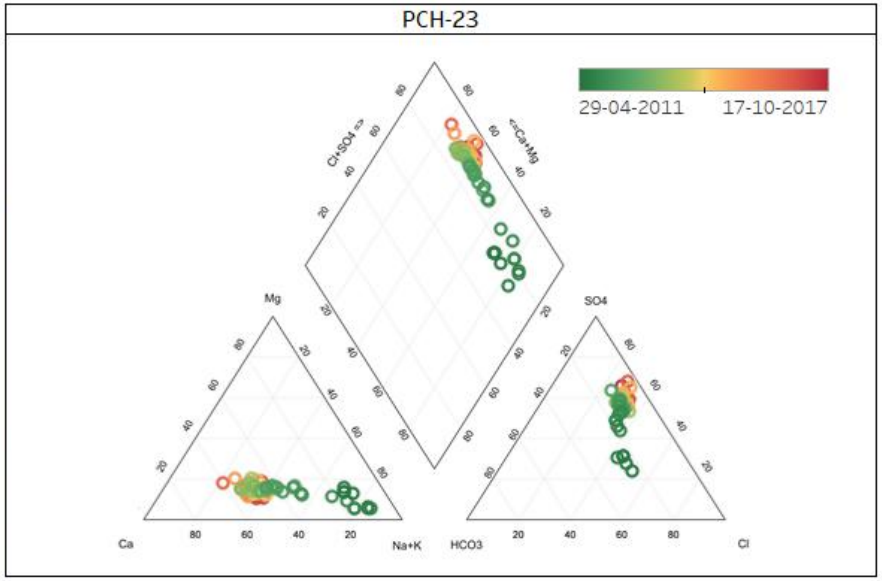

PCH-27
PCH-26
PCH-23
P-2
PCAR-11
PCAR-10
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap

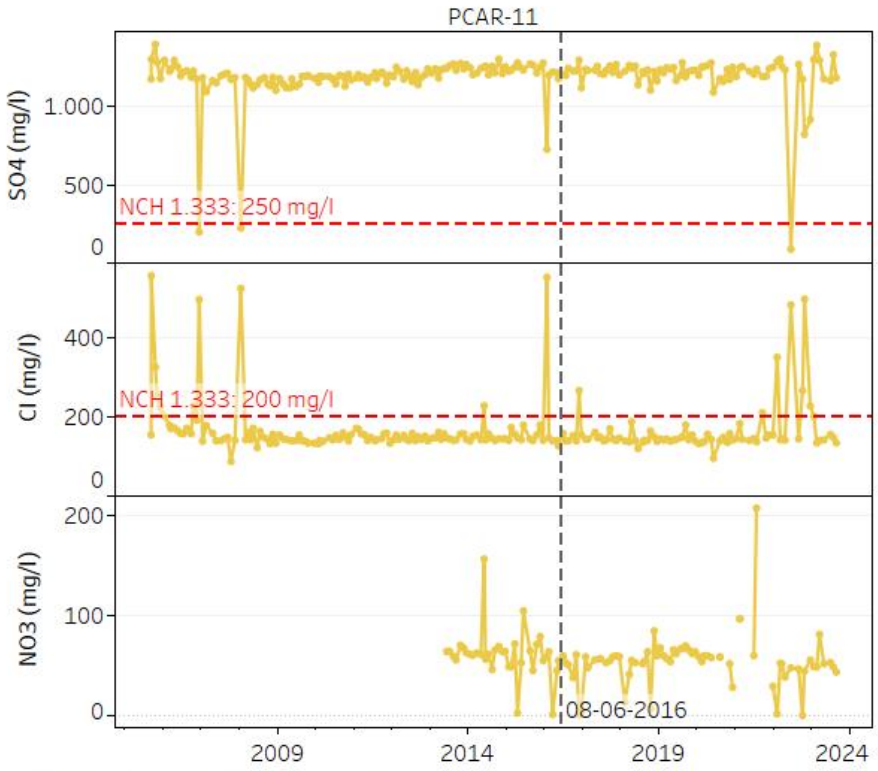

P-2
16-06-2005
Ca
Mg
Na+K
HCO3
SO4
Cl

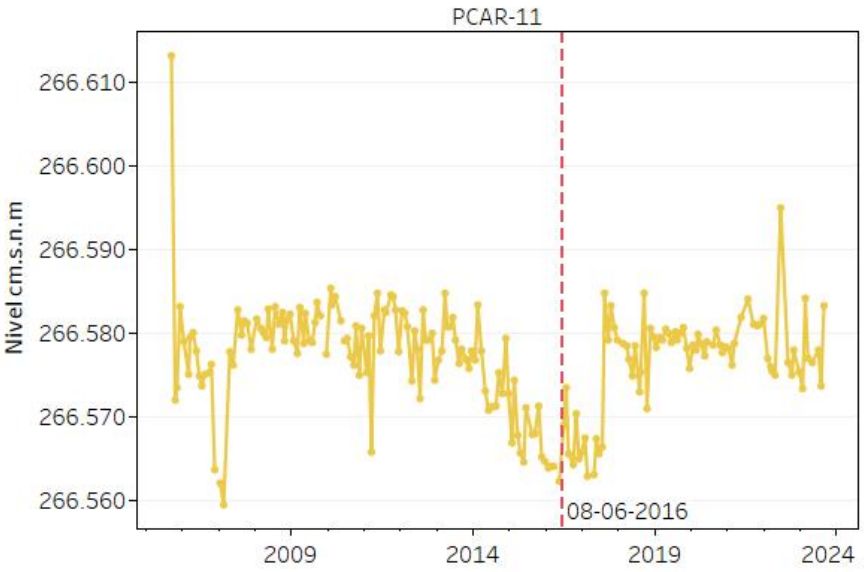

PCH-23
SO4 (mg/l)
600
400
200
0
NCH 1.333: 250 mg/l
Cl (mg/l)
400
200
0
NCH 1.333: 200 mg/l
NO3 (mg/l)
100
50
0
08-06-2016
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018

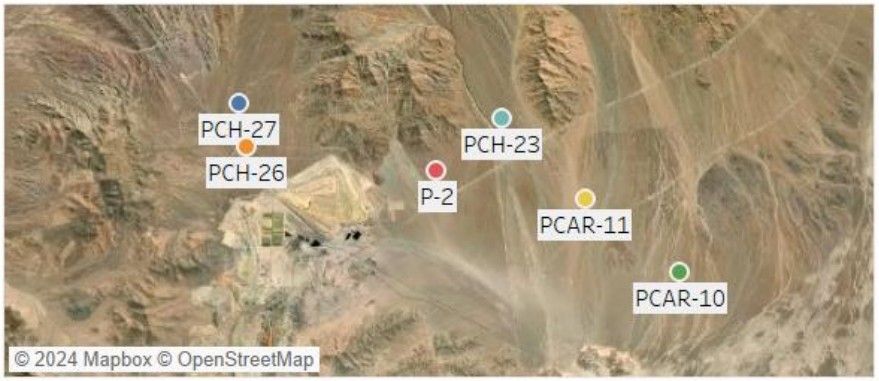

PCH-27
PCH-26
PCH-23
P-2
PCAR-11
PCAR-10
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap

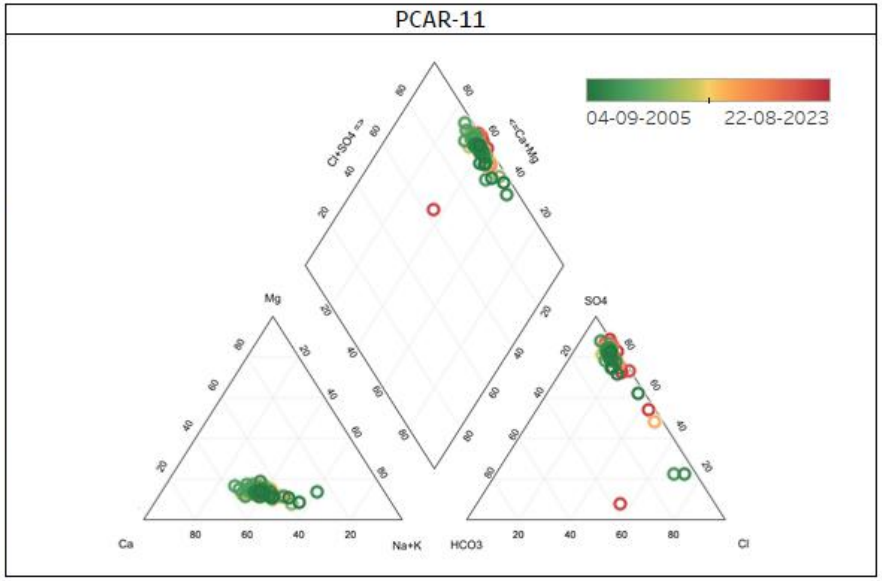

PCH-23
Nivel cm.s.n.m
285.500
285.450
285.400
285.350
285.300
08-06-2016
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018

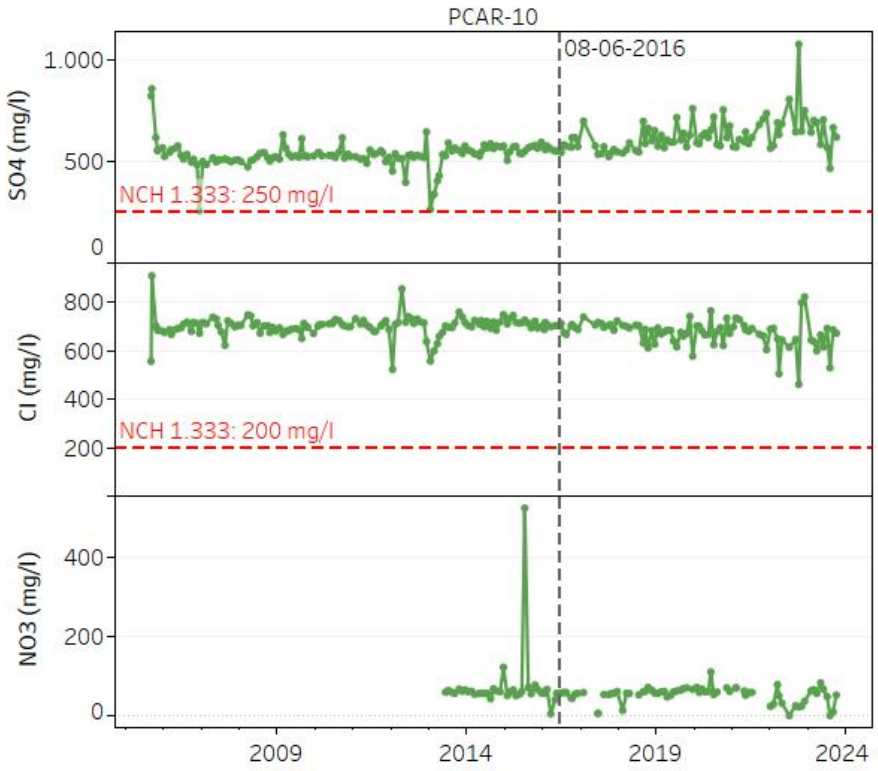

PCH-23
29-04-2011
17-10-2017
Ca
Mg
Na+K
HCO3
SO4
Cl

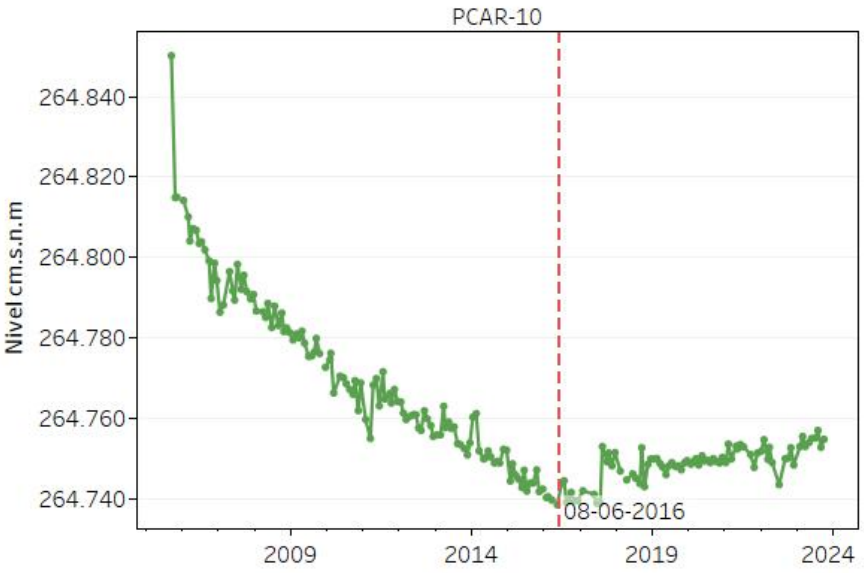

PCAR-11
SO4 (mg/l)
1.000
500
0
NCH 1.333: 250 mg/l
Cl (mg/l)
400
200
0
NCH 1.333: 200 mg/l
NO3 (mg/l)
200
100
0
08-06-2016
2009
2014
2019
2024

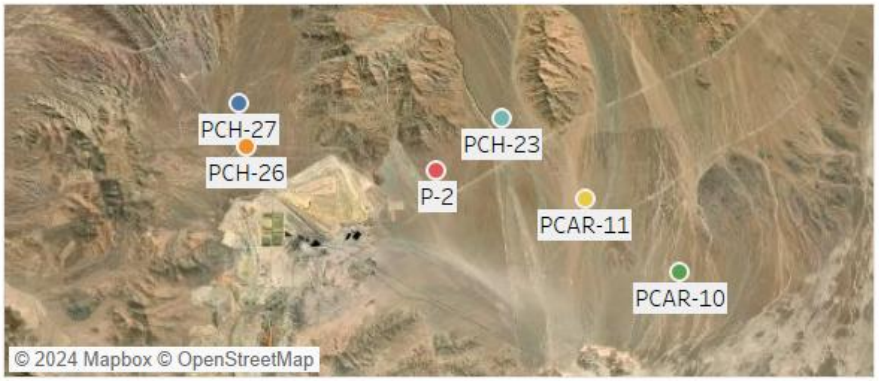

PCAR-11
Nivel cm.s.n.m
266.610
266.600
266.590
266.580
266.570
266.560
08-06-2016
2009
2014
2019
2024

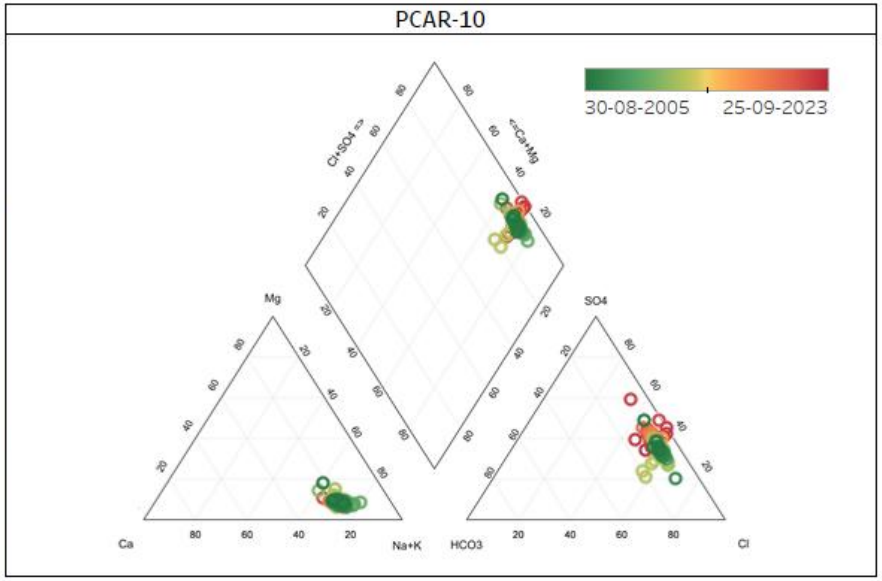

PCH-27
PCH-26
PCH-23
P-2
PCAR-11
PCAR-10
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap

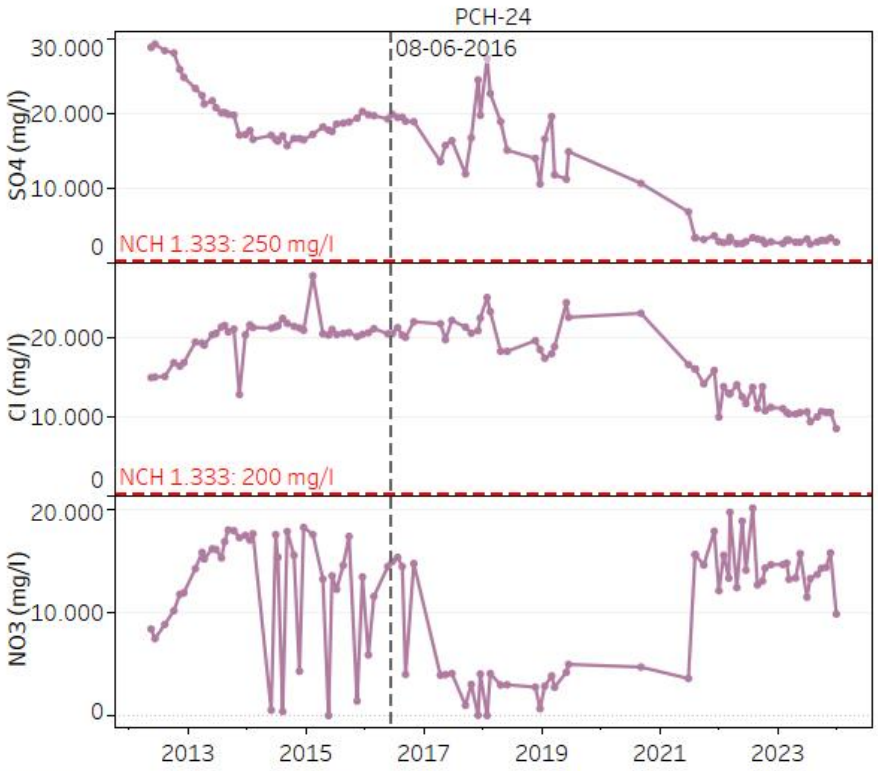

PCAR-11
04-09-2005
22-08-2023
Ca
Mg
Na+K
HCO3
SO4
Cl

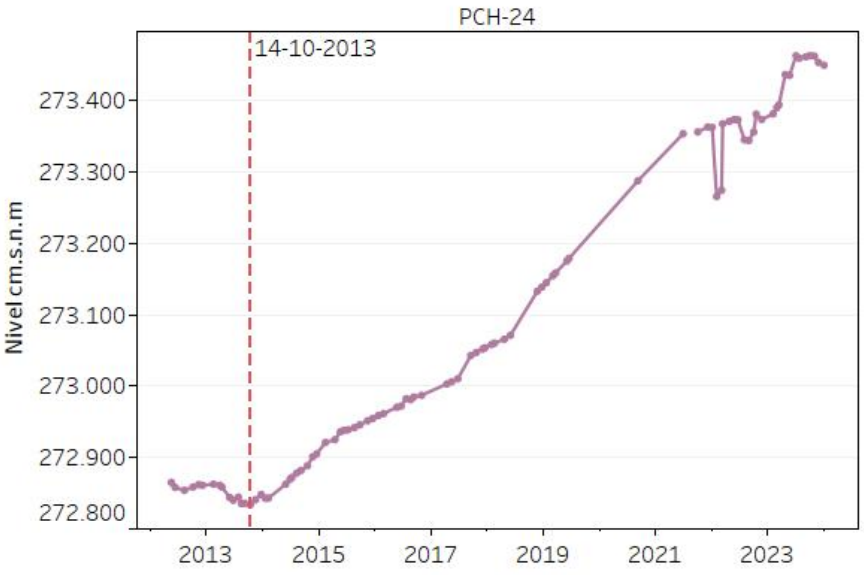

PCAR-10
08-06-2016
SO4 (mg/l)
1.000
500
0
NCH 1.333: 250 mg/l
Cl (mg/l)
800
600
400
200
NCH 1.333: 200 mg/l
NO3 (mg/l)
400
200
0
2009
2014
2019
2024

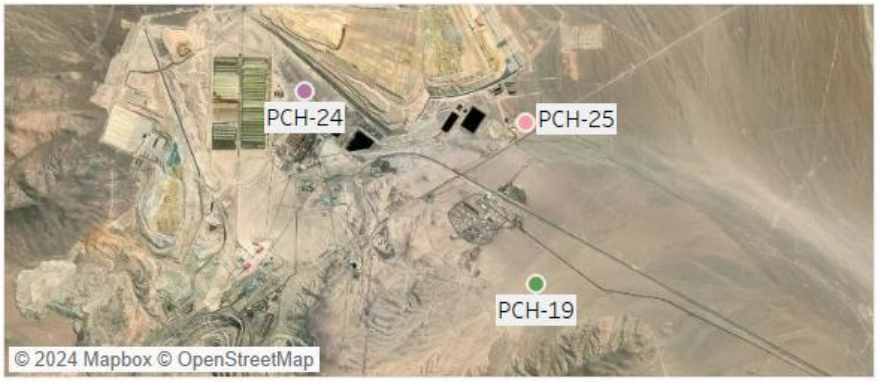

PCAR-10
Nivel cm.s.n.m
264.840
264.820
264.800
264.780
264.760
264.740
08-06-2016
2009
2014
2019
2024

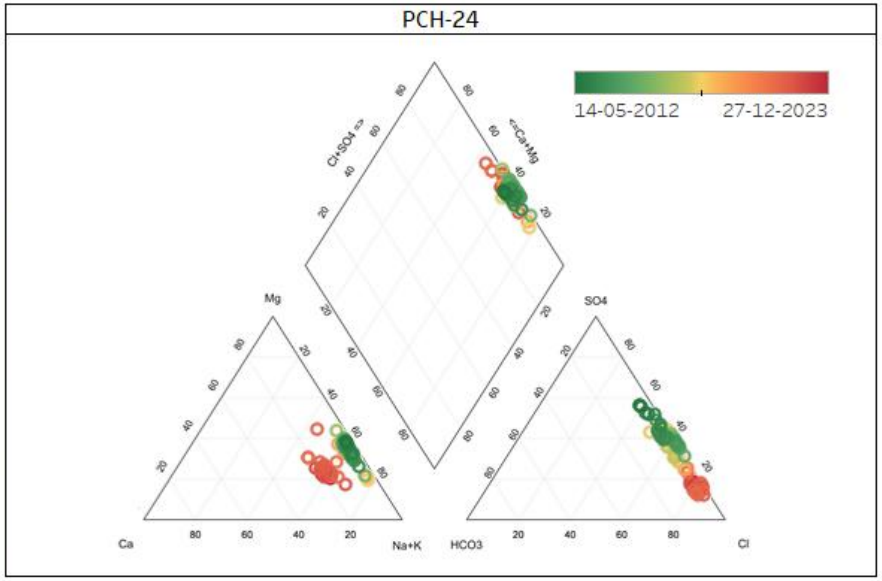

PCH-27
PCH-26
PCH-23
P-2
PCAR-11
PCAR-10
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap

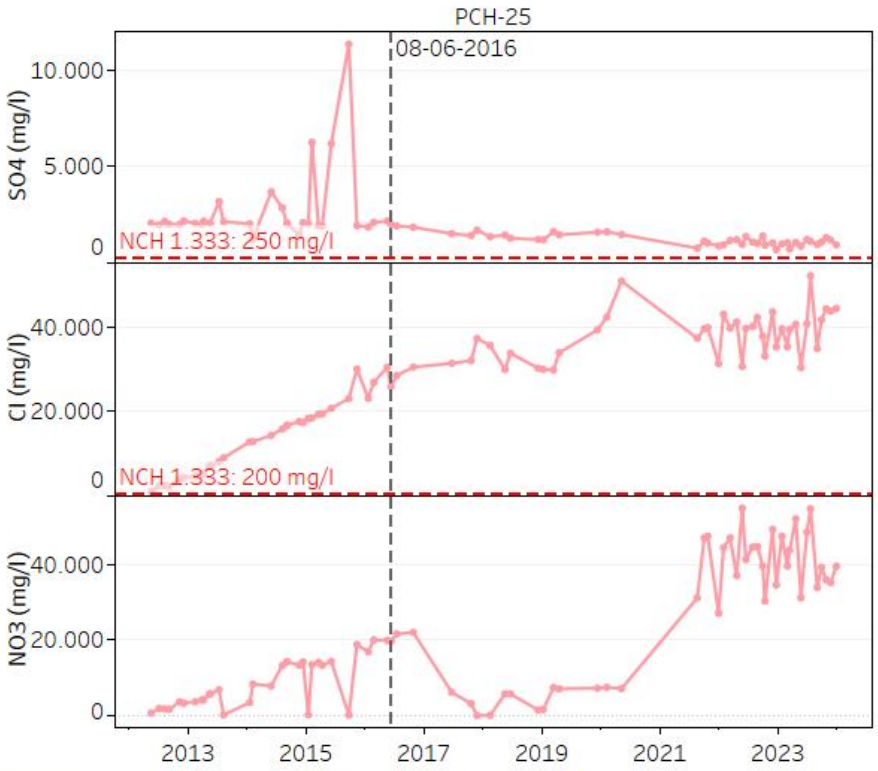

PCAR-10
30-08-2005
25-09-2023
Ca
Mg
Na+K
HCO3
SO4
Cl

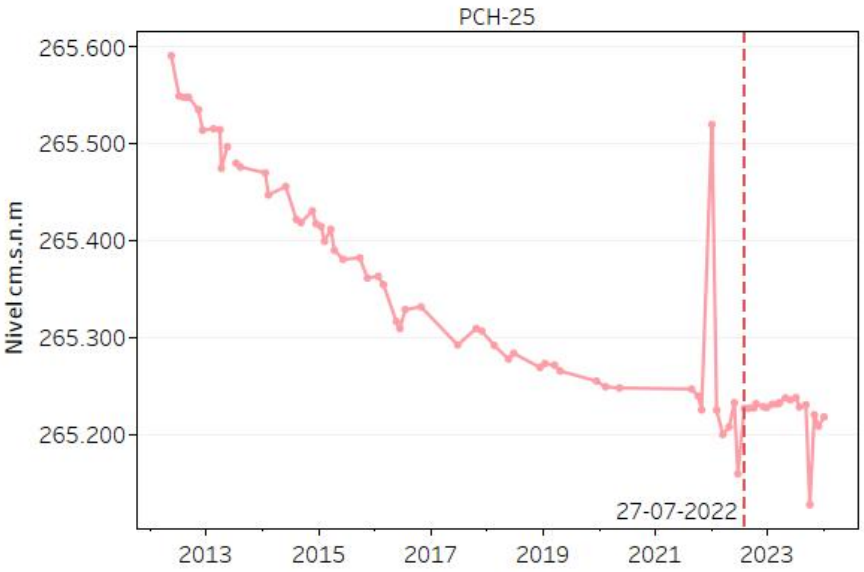

PCH-24
08-06-2016
SO4 (mg/l)
30.000
20.000
10.000
0
NCH 1.333: 250 mg/l
Cl (mg/l)
20.000
10.000
0
NCH 1.333: 200 mg/l
NO3 (mg/l)
20.000
10.000
0
2013
2015
2017
2019
2021
2023

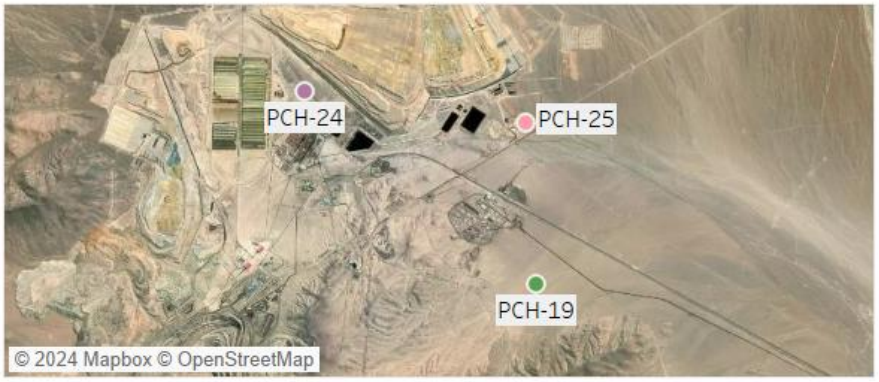

PCH-24
14-10-2013
Nivel cm.s.n.m
273.400
273.300
273.200
273.100
273.000
272.900
272.800
2013
2015
2017
2019
2021
2023

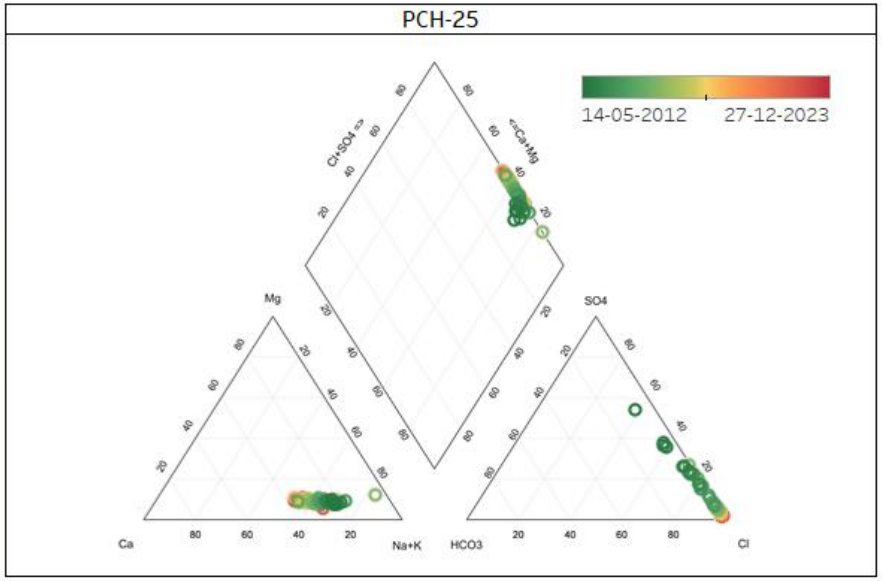

PCH-24
PCH-25
PCH-19
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap

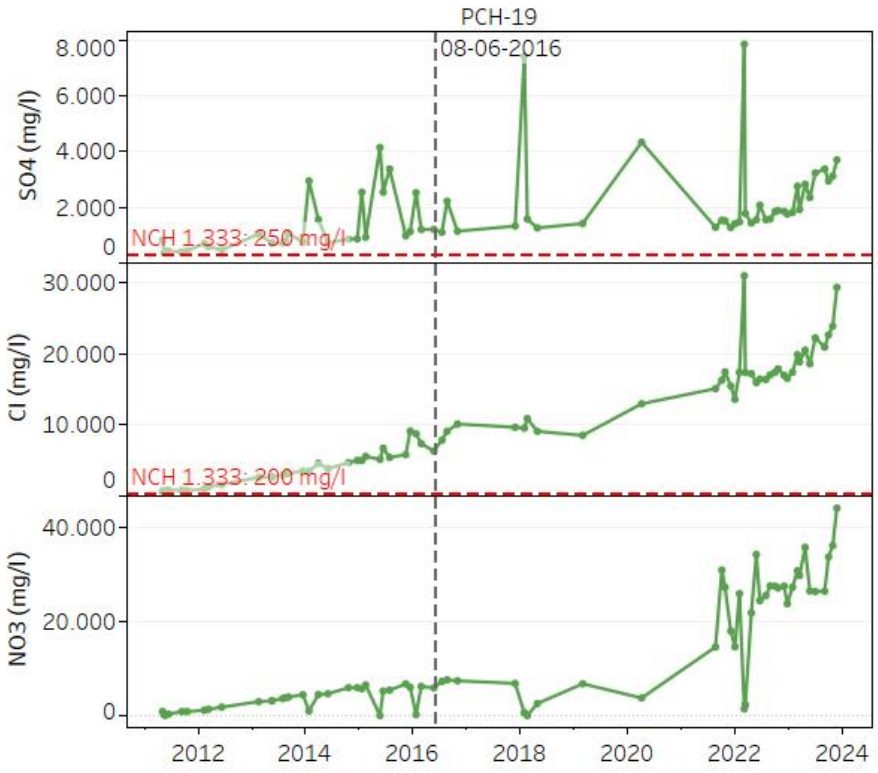

PCH-24
14-05-2012
27-12-2023
Ca
Mg
Na+K
HCO3
SO4
Cl

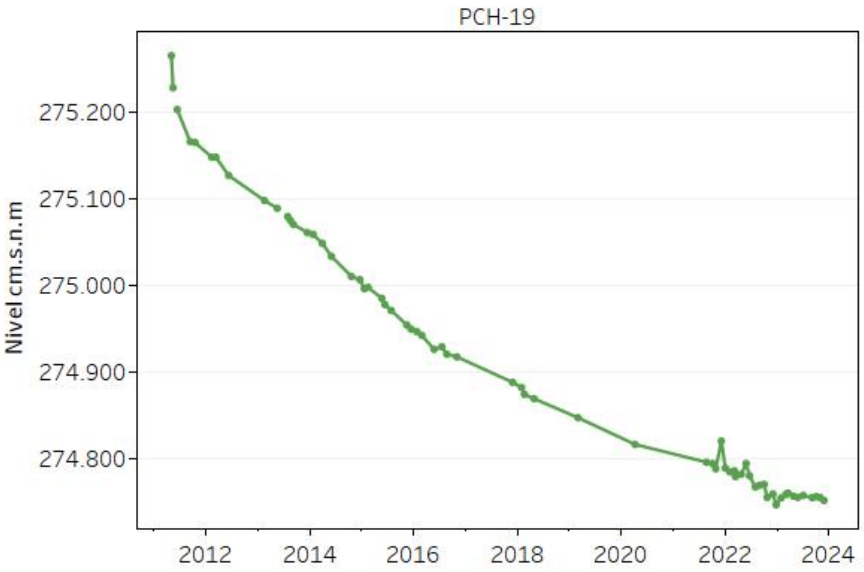

PCH-25
08-06-2016
SO4 (mg/l)
10.000
5.000
0
NCH 1.333: 250 mg/l
Cl (mg/l)
40.000
20.000
0
NCH 1.333: 200 mg/l
NO3 (mg/l)
40.000
20.000
0
2013
2015
2017
2019
2021
2023

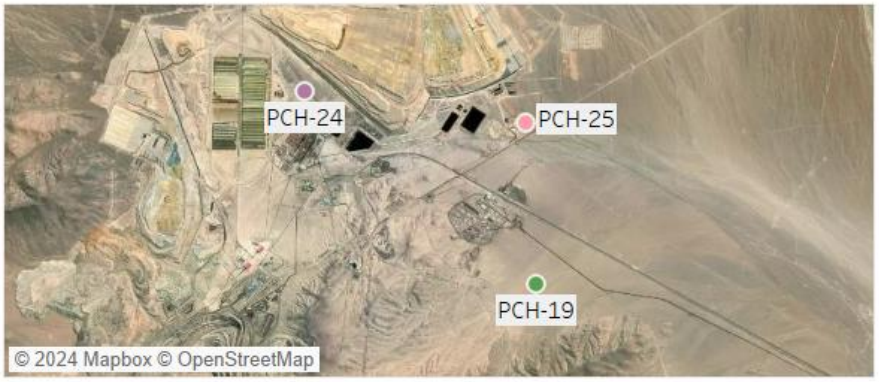

PCH-25
Nivel cm.s.n.m
265.600
265.500
265.400
265.300
265.200
27-07-2022
2013
2015
2017
2019
2021
2023

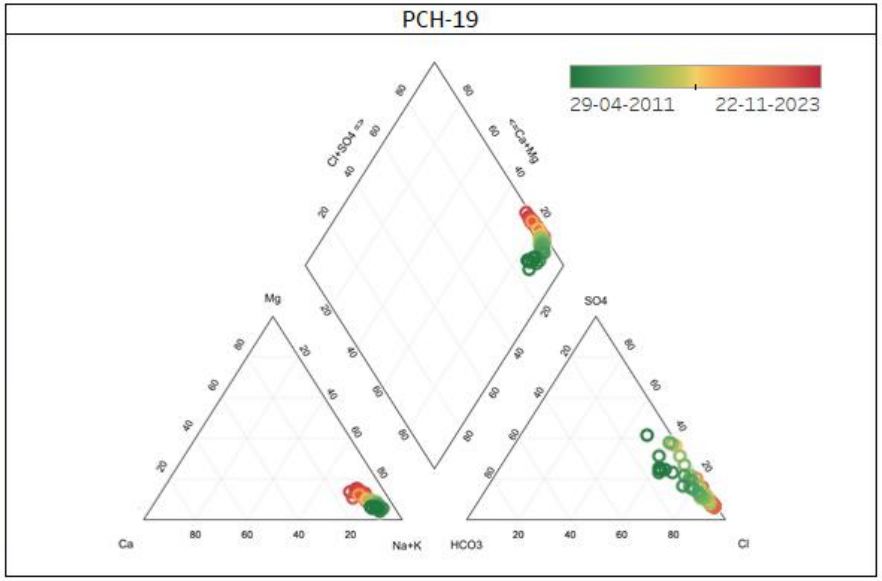

PCH-24
PCH-25
PCH-19
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap

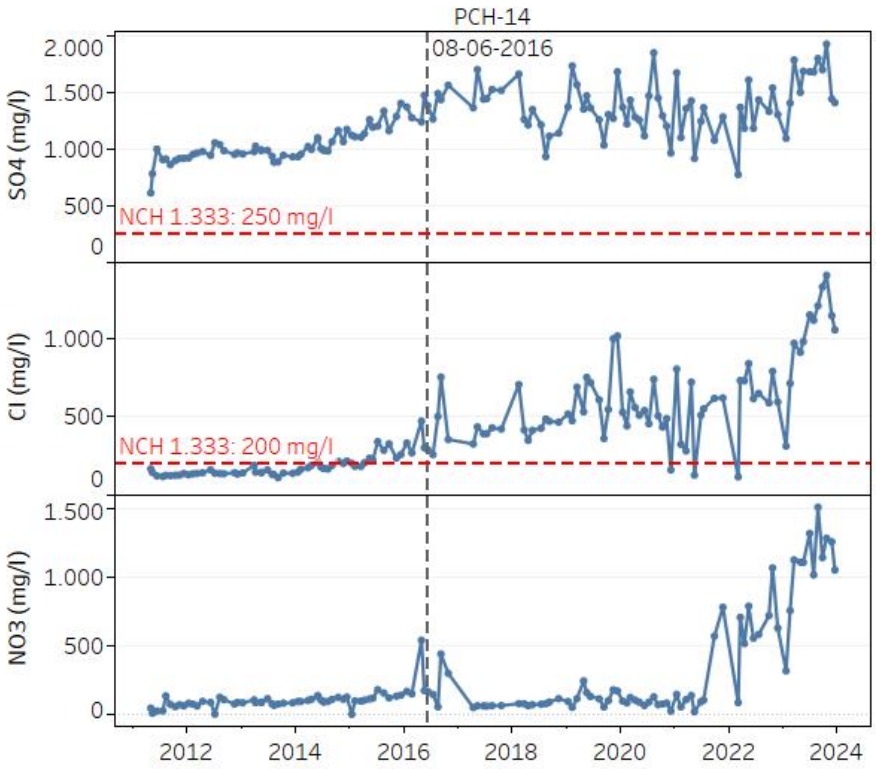

PCH-25
14-05-2012
27-12-2023
Ca
Mg
Na+K
HCO3
SO4
Cl

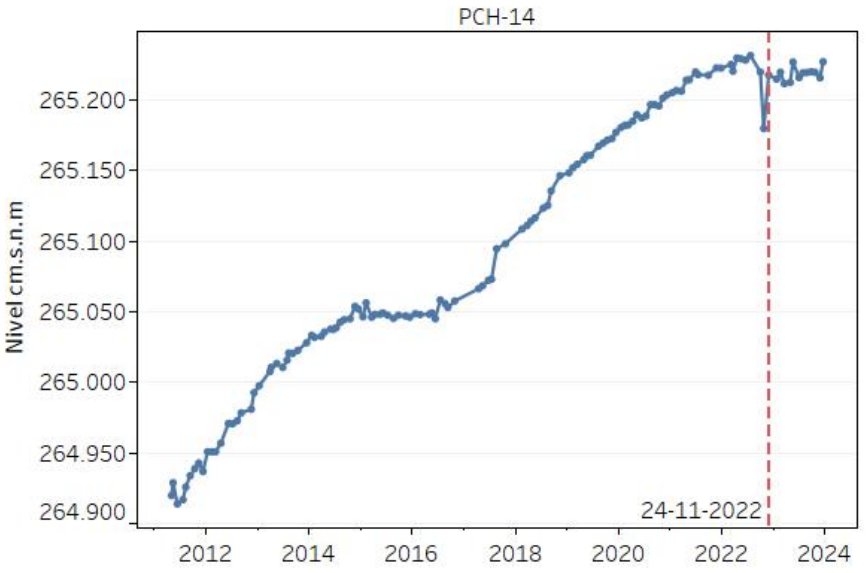

PCH-19
08-06-2016
SO4 (mg/l)
8.000
6.000
4.000
2.000
0
NCH 1.333: 250 mg/l
Cl (mg/l)
30.000
20.000
10.000
0
NCH 1.333: 200 mg/l
NO3 (mg/l)
40.000
20.000
0
2012
2014
2016
2018
2020
2022
2024


PCH-19
Nivel cm.s.n.m
275.200
275.100
275.000
274.900
274.800
2012
2014
2016
2018
2020
2022
2024

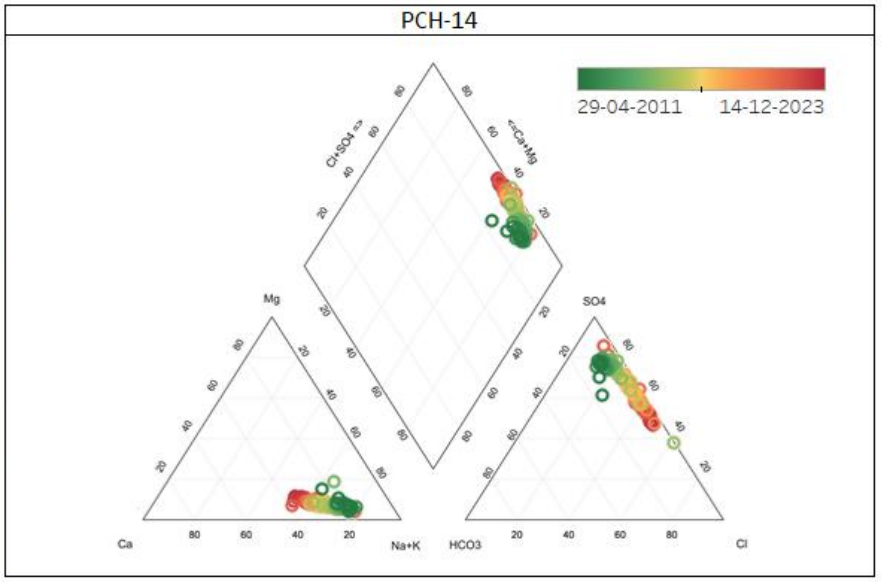

PCH-24
PCH-25
PCH-19
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap

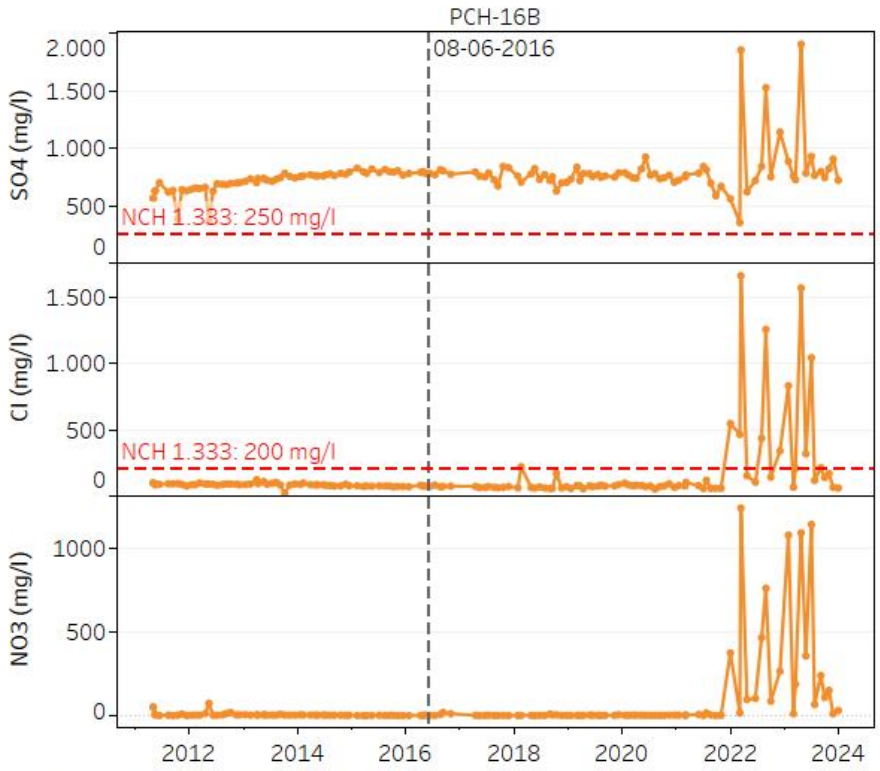

PCH-19
29-04-2011
22-11-2023
Ca
Mg
Na+K
HCO3
SO4
Cl

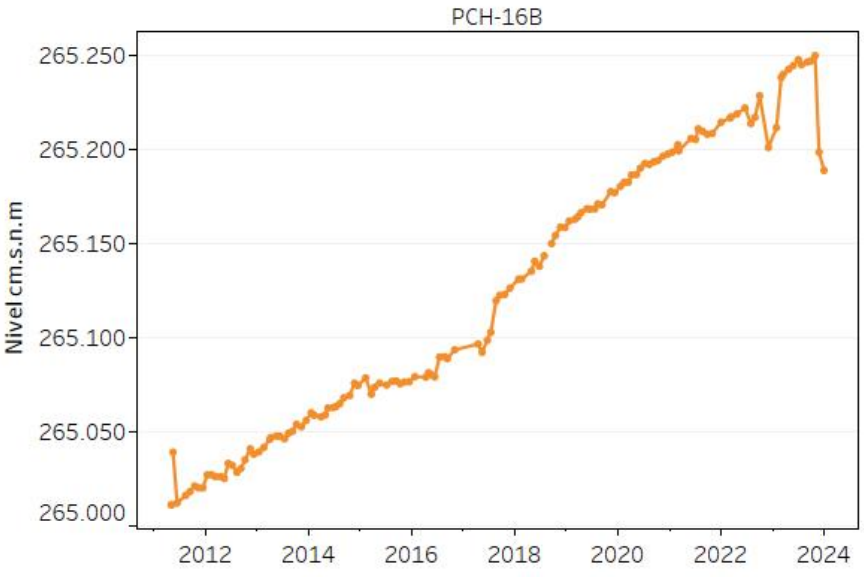

PCH-14
08-06-2016
SO4 (mg/l)
NCH 1.333: 250 mg/l
Cl (mg/l)
NCH 1.333: 200 mg/l
NO3 (mg/l)
2012
2014
2016
2018
2020
2022
2024


PCH-14
Nivel cm.s.n.m
24-11-2022
2012
2014
2016
2018
2020
2022
2024

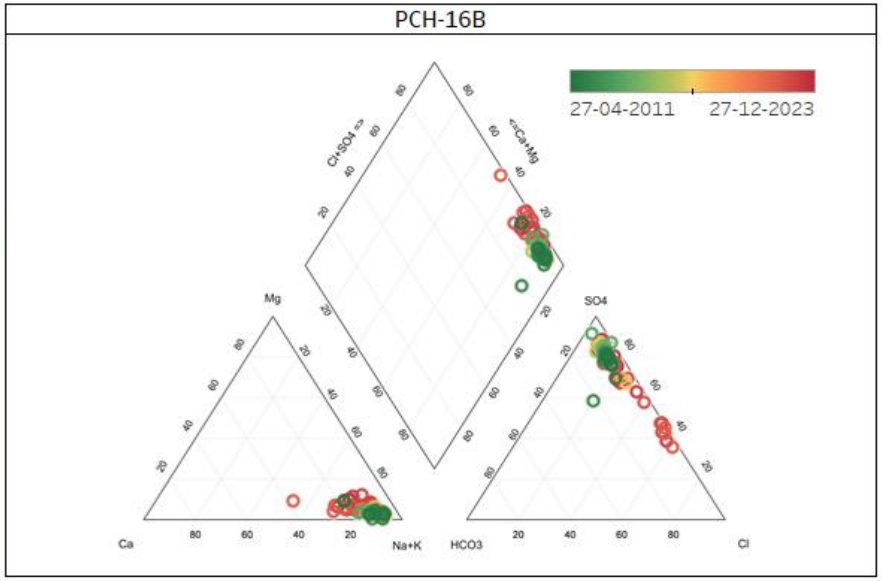

PCH-14
PCH-16B
PCH-18
P-7
PCAR-1
PCAR-9
P-8
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap

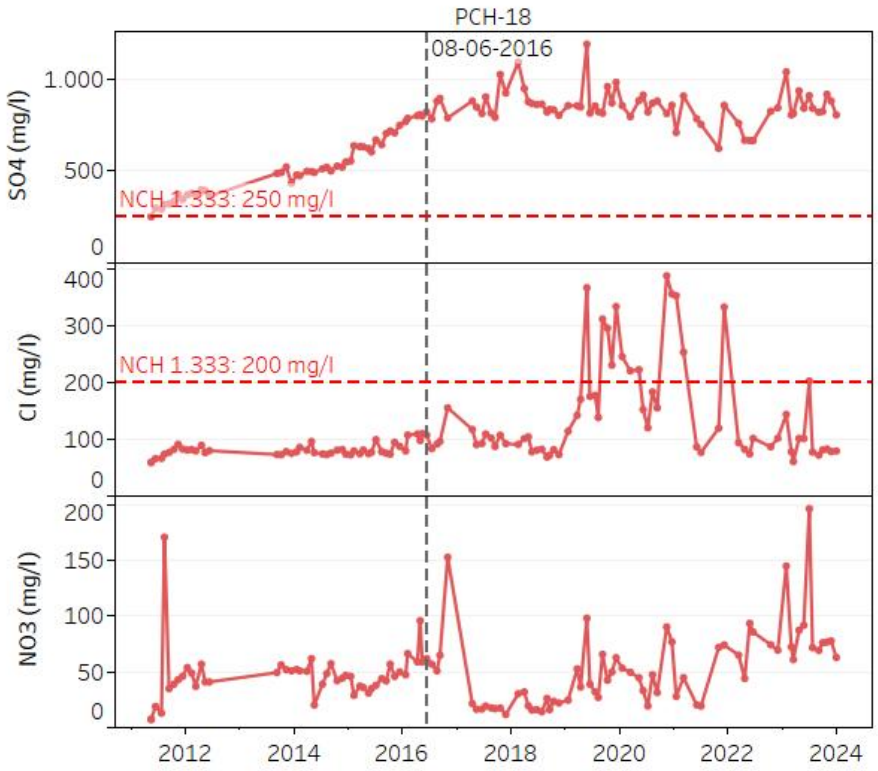

PCH-14
29-04-2011
14-12-2023
Ca
Mg
Na+K
HCO3
SO4
Cl

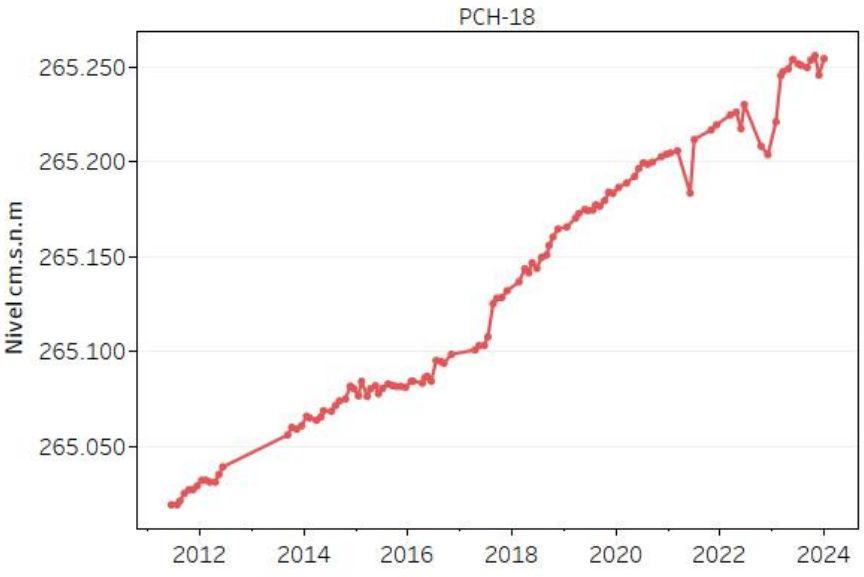

PCH-16B
08-06-2016
SO4 (mg/l)
NCH 1.333: 250 mg/l
Cl (mg/l)
NCH 1.333: 200 mg/l
NO3 (mg/l)
2012
2014
2016
2018
2020
2022
2024


PCH-16B
Nivel cm.s.n.m
265.250
265.200
265.150
265.100
265.050
265.000
2012
2014
2016
2018
2020
2022
2024

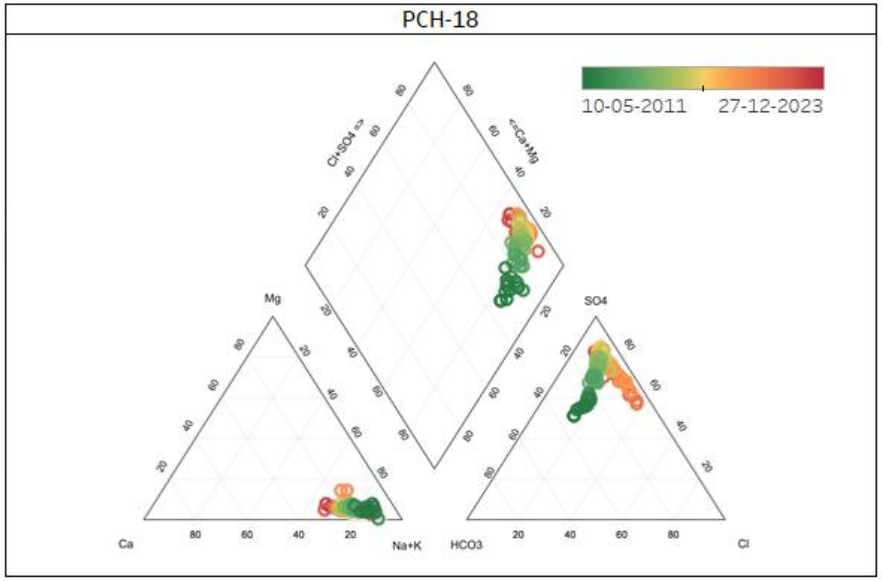

PCH-14
PCH-16B
PCH-18
P-7
PCAR-1
PCAR-9
P-8
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap

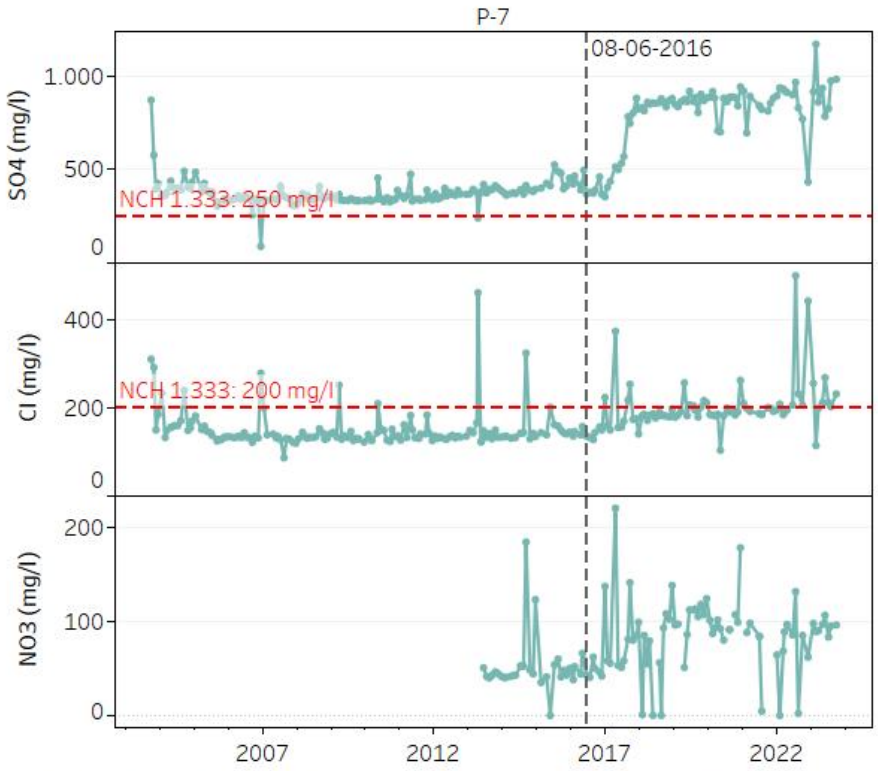

PCH-16B
27-04-2011
27-12-2023
Ca+Mg
Cl+SO4
Mg
SO4
Ca
Na+K
HCO3
Cl

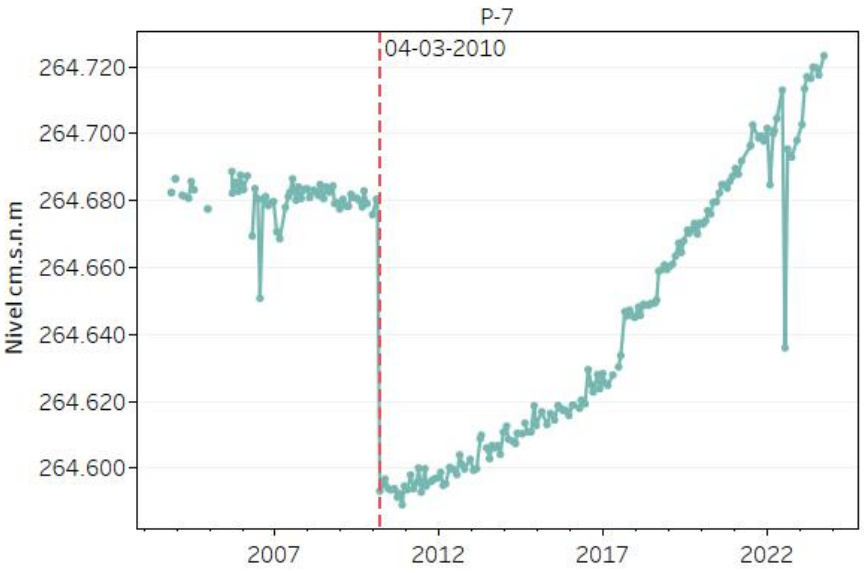

PCH-18
08-06-2016
SO4 (mg/l)
1.000
500
0
NCH 1.333: 250 mg/l
Cl (mg/l)
400
300
200
100
0
NCH 1.333: 200 mg/l
NO3 (mg/l)
200
150
100
50
0
2012
2014
2016
2018
2020
2022
2024


PCH-18
Nivel cm.s.n.m
265.250
265.200
265.150
265.100
265.050
2012
2014
2016
2018
2020
2022
2024

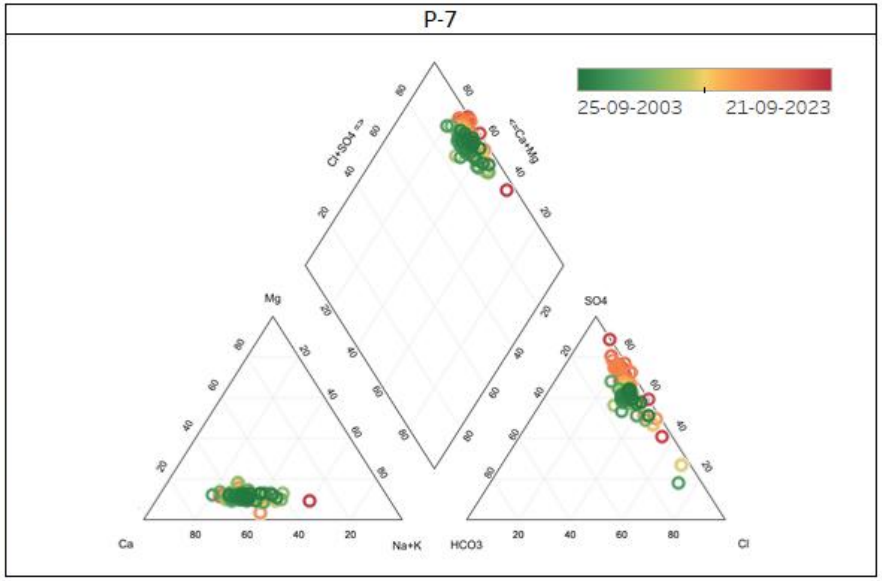

PCH-14
PCH-16B
PCH-18
P-7
PCAR-1
PCAR-9
P-8
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap

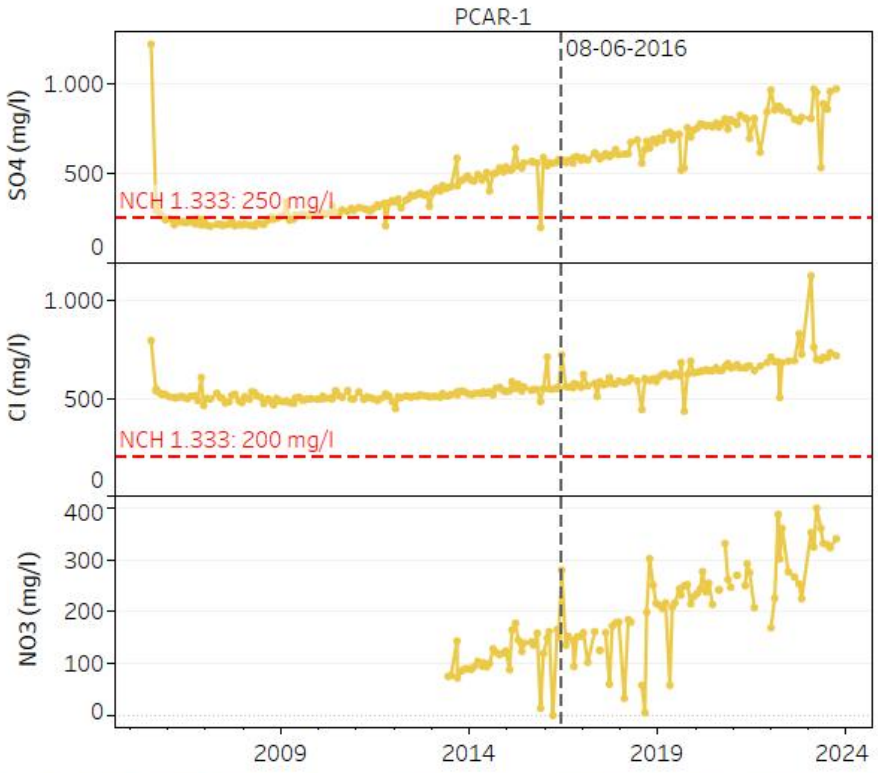

PCH-18
10-05-2011
27-12-2023
Ca
Mg
Na+K
HCO3
SO4
Cl

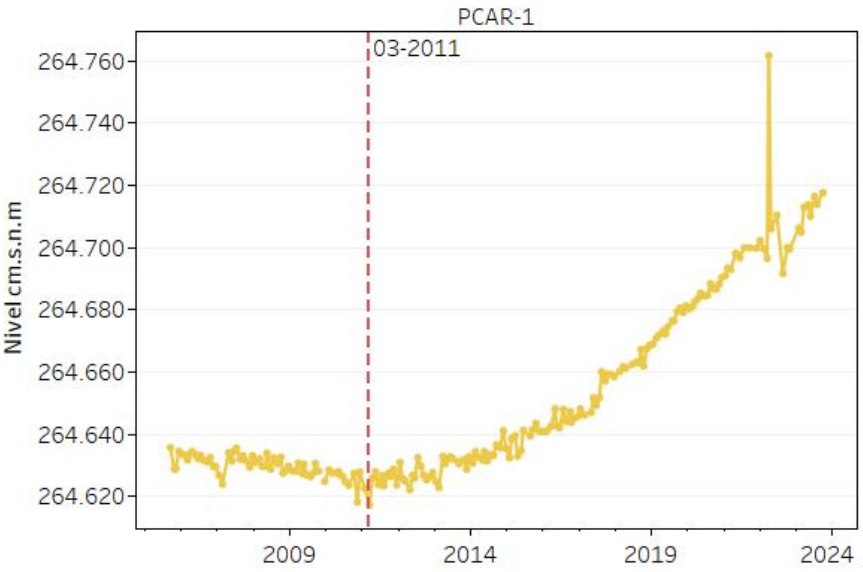

P-7
08-06-2016
SO4 (mg/l)
1.000
500
0
NCH 1.333: 250 mg/l
Cl (mg/l)
400
200
0
NCH 1.333: 200 mg/l
NO3 (mg/l)
200
100
0
2007
2012
2017
2022


P-7
04-03-2010
Nivel cm.s.n.m
264.720
264.700
264.680
264.660
264.640
264.620
264.600
2007
2012
2017
2022

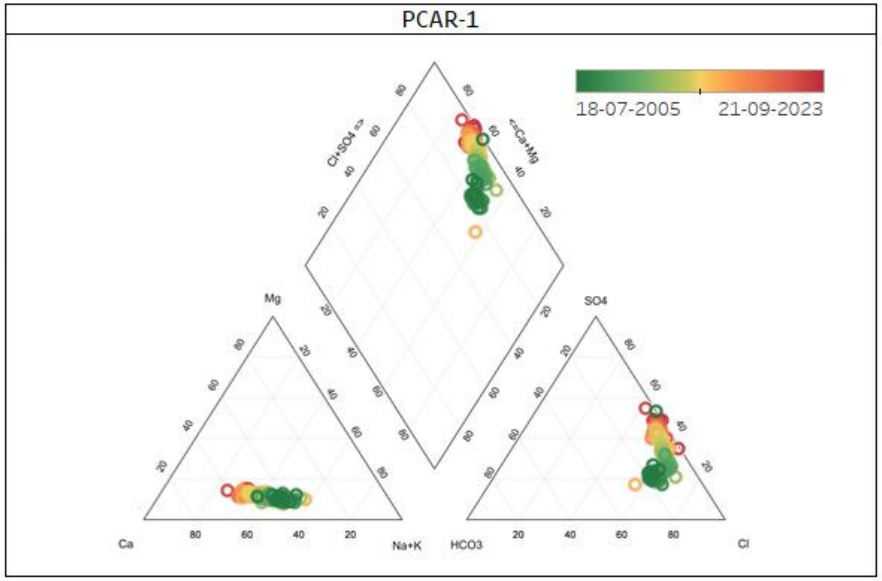

PCH-14
PCH-16B
PCH-18
P-7
PCAR-1
PCAR-9
P-8
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap

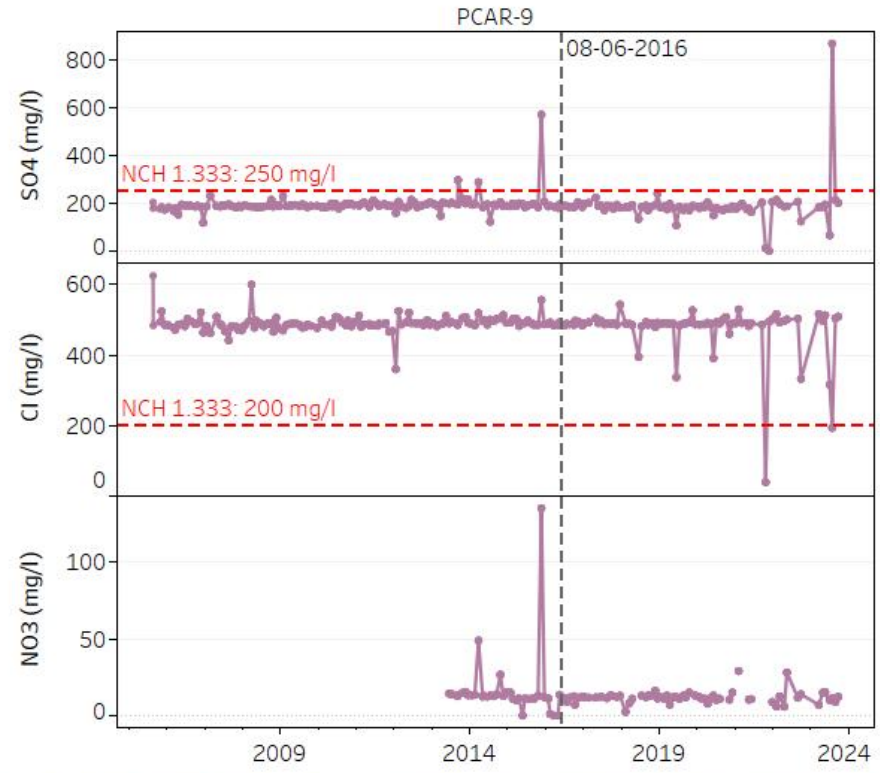

P-7
25-09-2003
21-09-2023
Ca
Mg
Na+K
HCO3
SO4
Cl

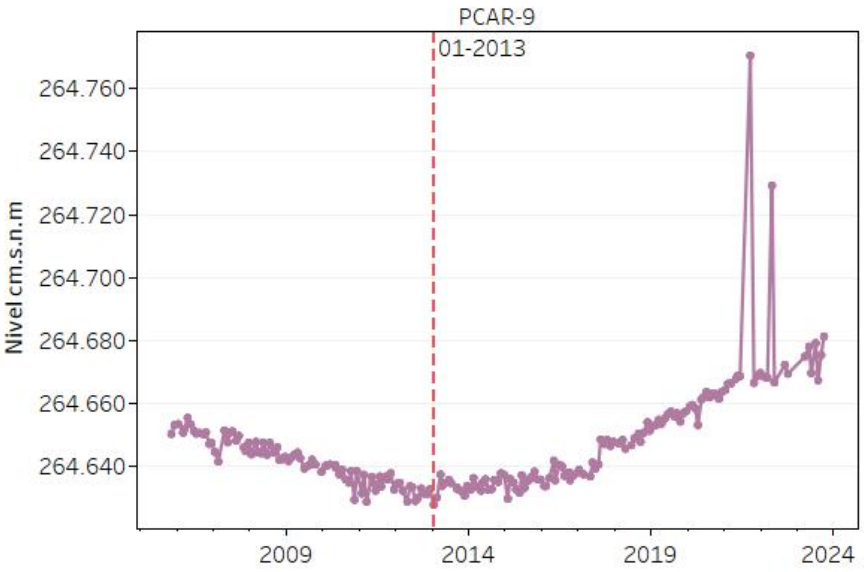

PCAR-1
08-06-2016
SO4 (mg/l)
1.000
500
0
NCH 1.333: 250 mg/l
Cl (mg/l)
1.000
500
0
NCH 1.333: 200 mg/l
NO3 (mg/l)
400
300
200
100
0
2009
2014
2019
2024


PCAR-1
03-2011
Nivel cm.s.n.m
264.760
264.740
264.720
264.700
264.680
264.660
264.640
264.620
2009
2014
2019
2024

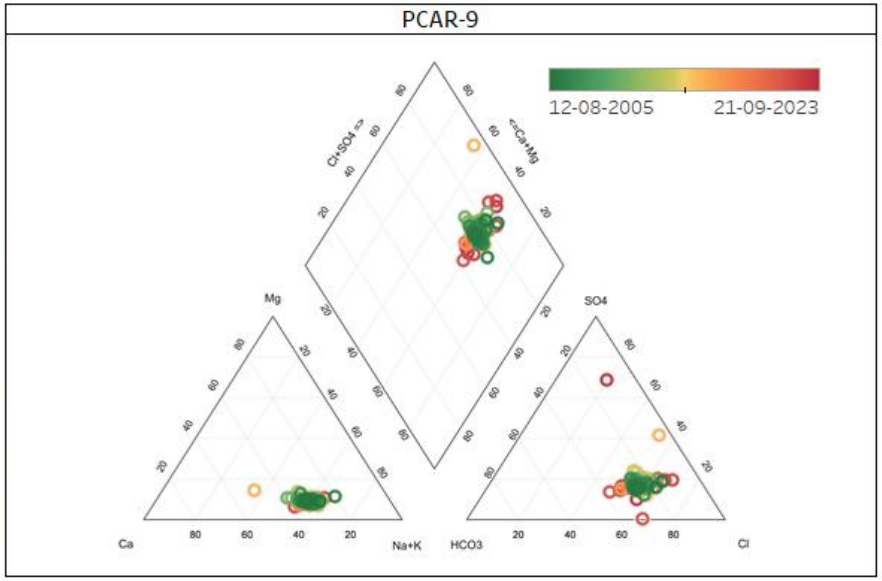

PCH-14
PCH-16B
PCH-18
P-7
PCAR-1
PCAR-9
P-8
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap

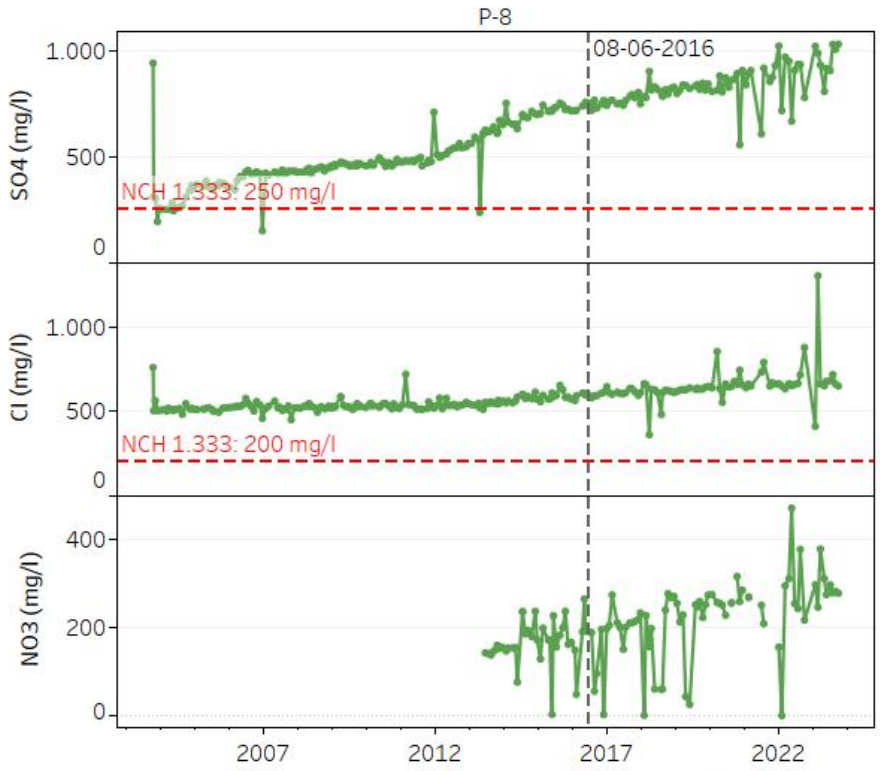

PCAR-1
18-07-2005
21-09-2023
Ca
Mg
Na+K
HCO3
SO4
Cl

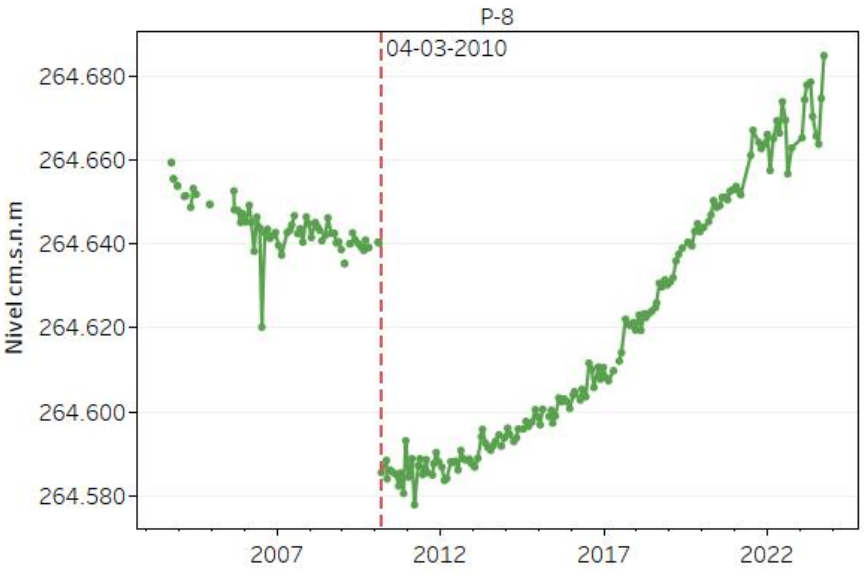

PCAR-9
08-06-2016
SO4 (mg/l)
NCH 1.333: 250 mg/l
Cl (mg/l)
NCH 1.333: 200 mg/l
NO3 (mg/l)
2009
2014
2019
2024


PCAR-9
01-2013
Nivel cm.s.n.m
264.760
264.740
264.720
264.700
264.680
264.660
264.640
2009
2014
2019
2024

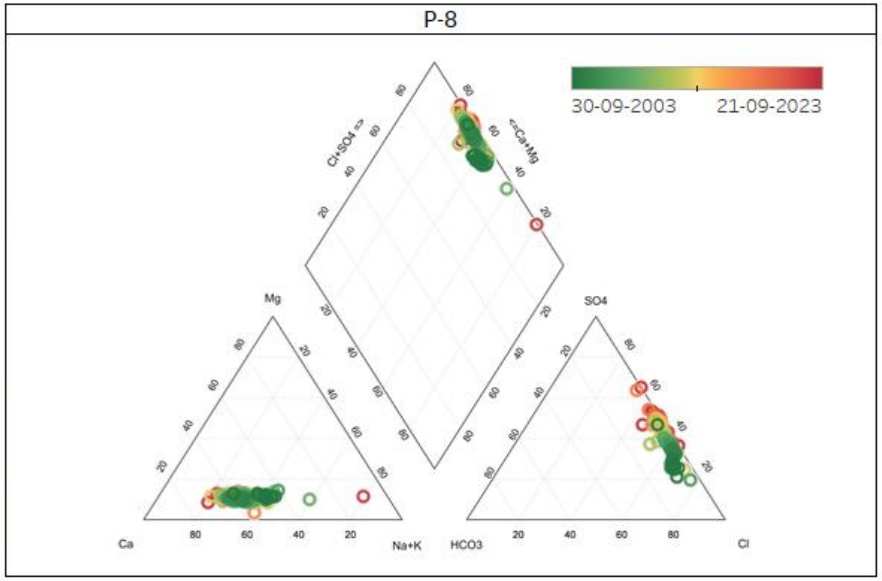

PCH-14
PCH-16B
PCH-18
P-7
PCAR-1
PCAR-9
P-8
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap

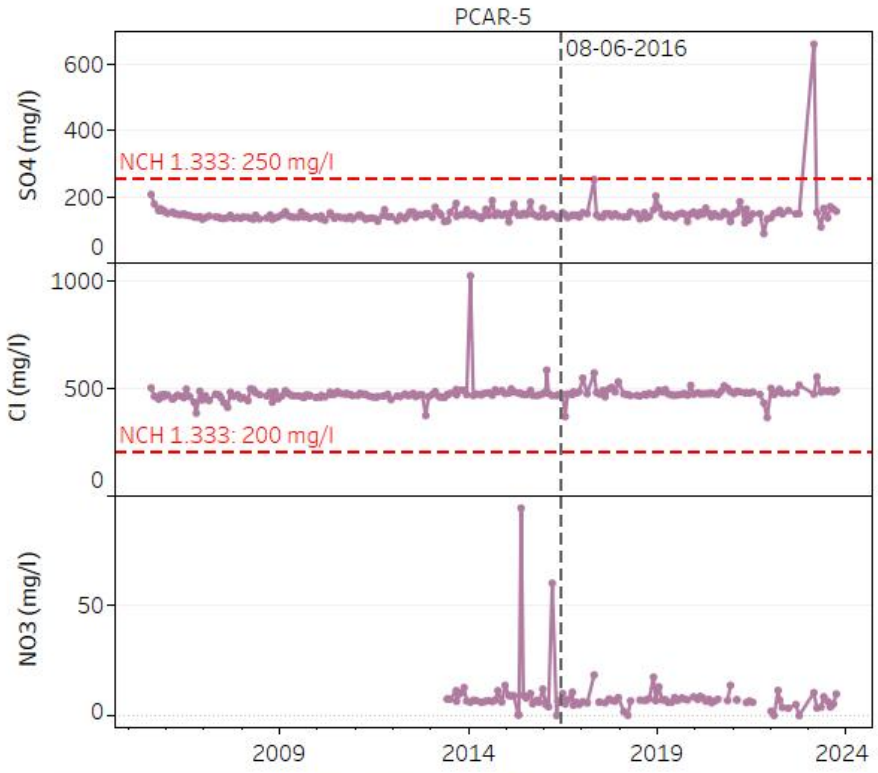

PCAR-9
12-08-2005
21-09-2023
Ca
Mg
Na+K
HCO3
SO4
Cl

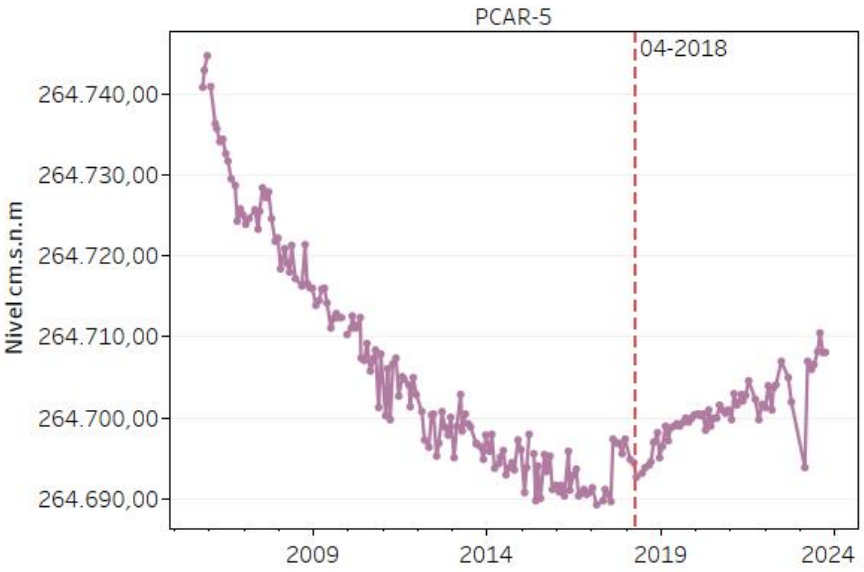

P-8
08-06-2016
SO4 (mg/l)
1.000
500
0
NCH 1.333: 250 mg/l
Cl (mg/l)
1.000
500
0
NCH 1.333: 200 mg/l
NO3 (mg/l)
400
200
0
2007
2012
2017
2022

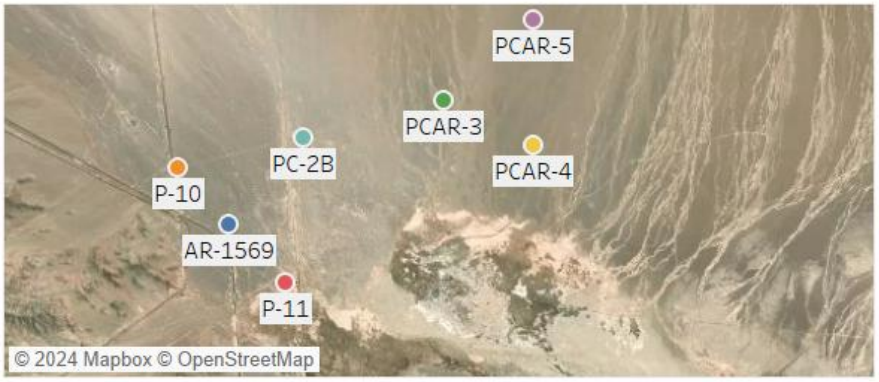

P-8
04-03-2010
Nivel cm.s.n.m
264.680
264.660
264.640
264.620
264.600
264.580
2007
2012
2017
2022

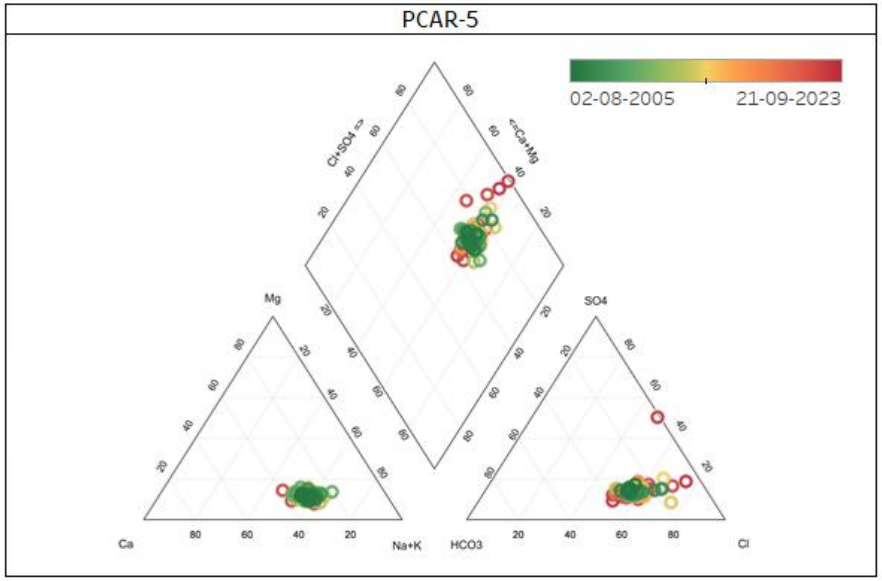

PCH-14
PCH-16B
PCH-18
P-7
PCAR-1
PCAR-9
P-8
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap

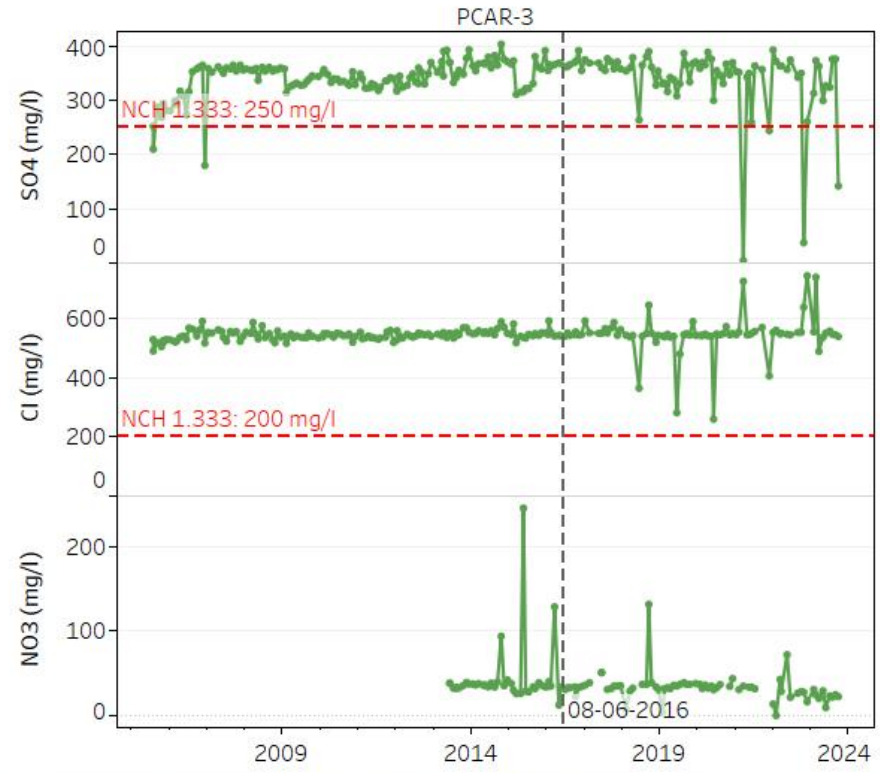

P-8
30-09-2003
21-09-2023
Ca
Mg
Na+K
HCO3
SO4
Cl

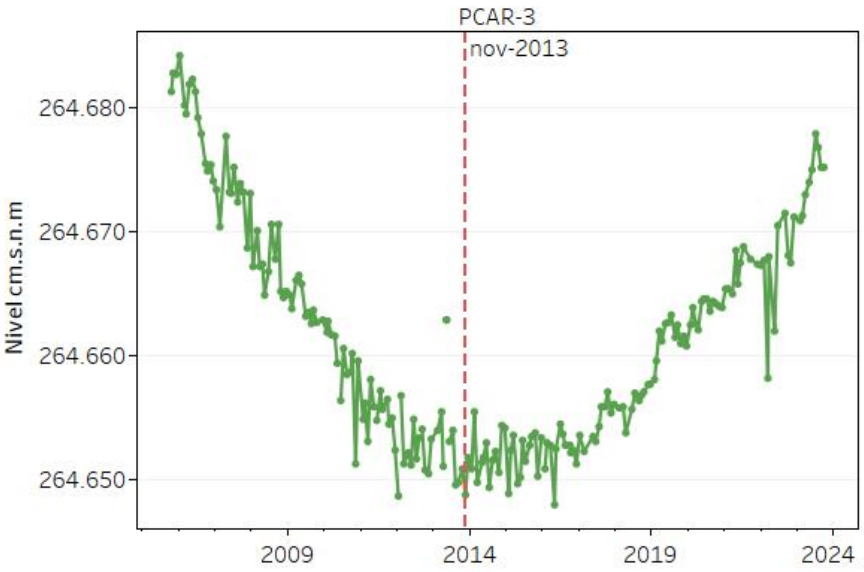

PCAR-5
08-06-2016
SO4 (mg/l)
600
400
200
0
NCH 1.333: 250 mg/l
Cl (mg/l)
1000
500
0
NCH 1.333: 200 mg/l
NO3 (mg/l)
50
0
2009
2014
2019
2024

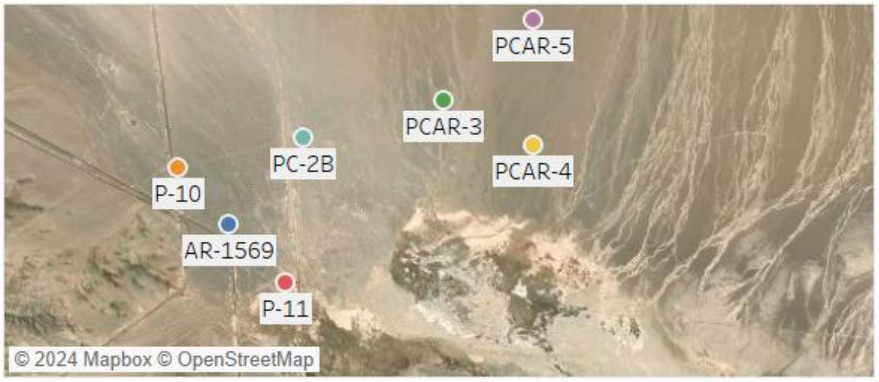

PCAR-5
04-2018
Nivel cm.s.n.m
264.740,00
264.730,00
264.720,00
264.710,00
264.700,00
264.690,00
2009
2014
2019
2024

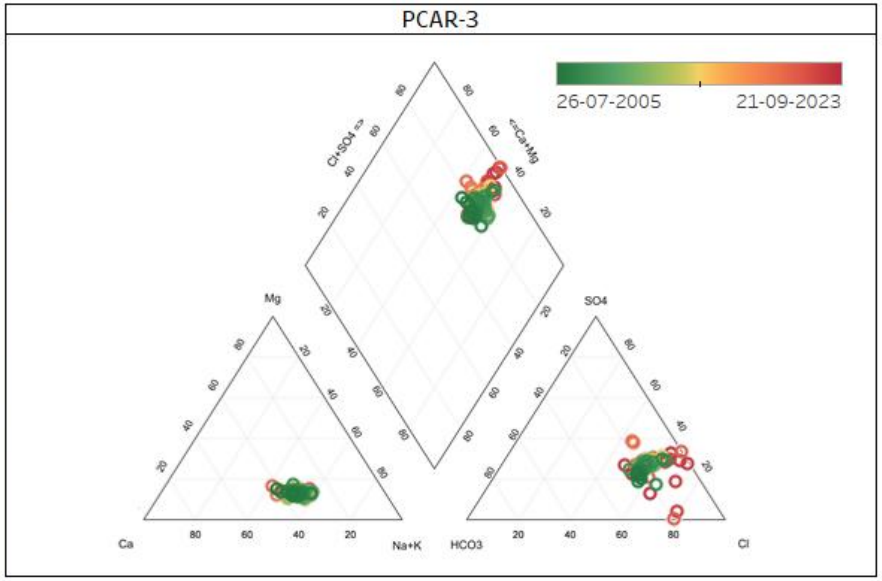

PCAR-5
PC-2B
PCAR-3
PCAR-4
P-10
AR-1569
P-11
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap

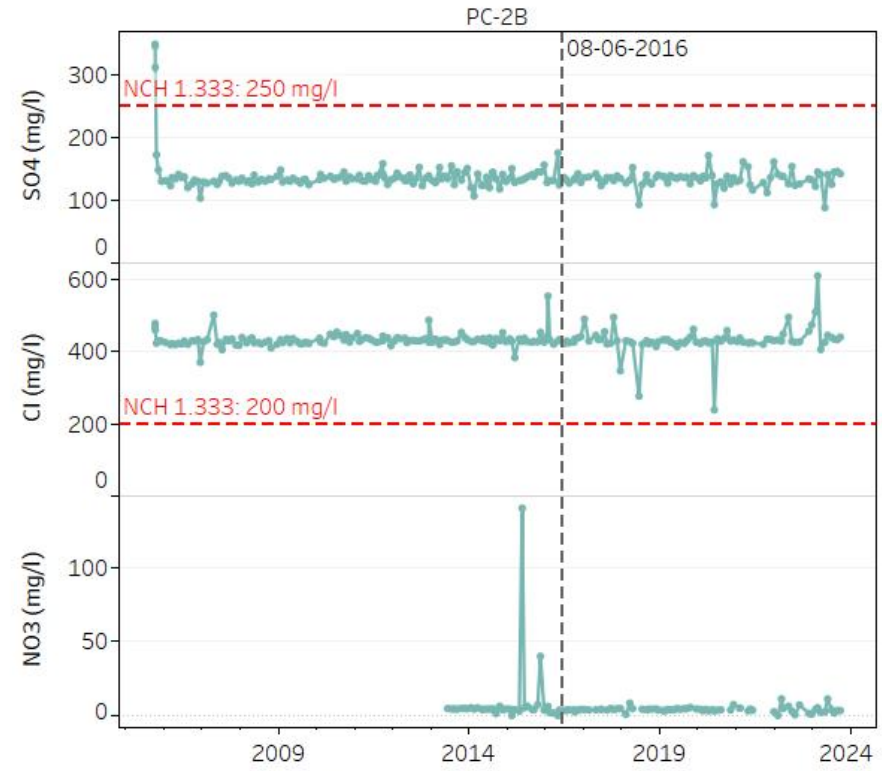

PCAR-5
02-08-2005
21-09-2023
Ca
Mg
Na+K
HCO3
SO4
Cl

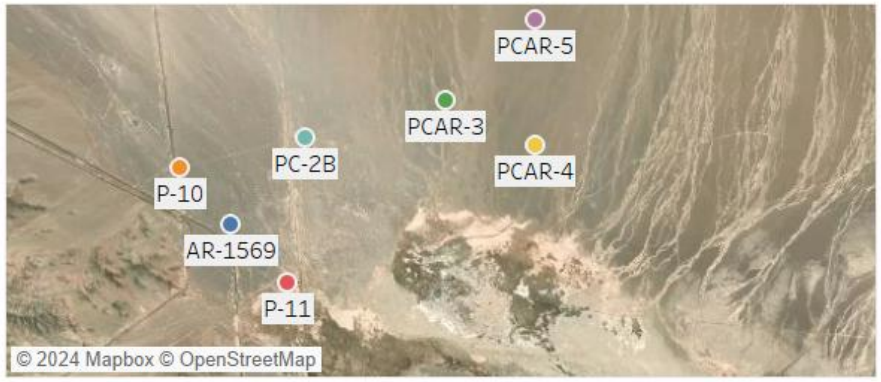

PCAR-3
SO4 (mg/l)
NCH 1.333: 250 mg/l
Cl (mg/l)
NCH 1.333: 200 mg/l
NO3 (mg/l)
08-06-2016
2009
2014
2019
2024

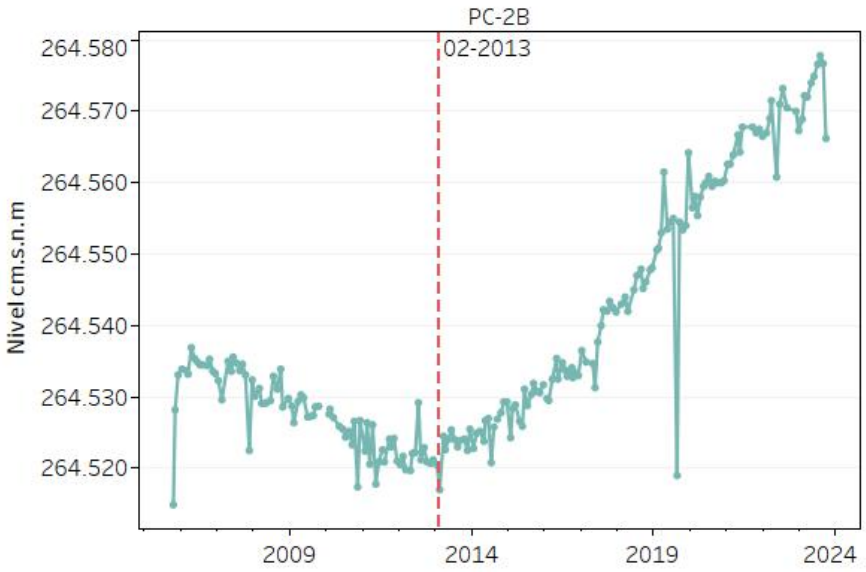

PCAR-3
nov-2013
Nivel cm.s.n.m
264.680
264.670
264.660
264.650
2009
2014
2019
2024

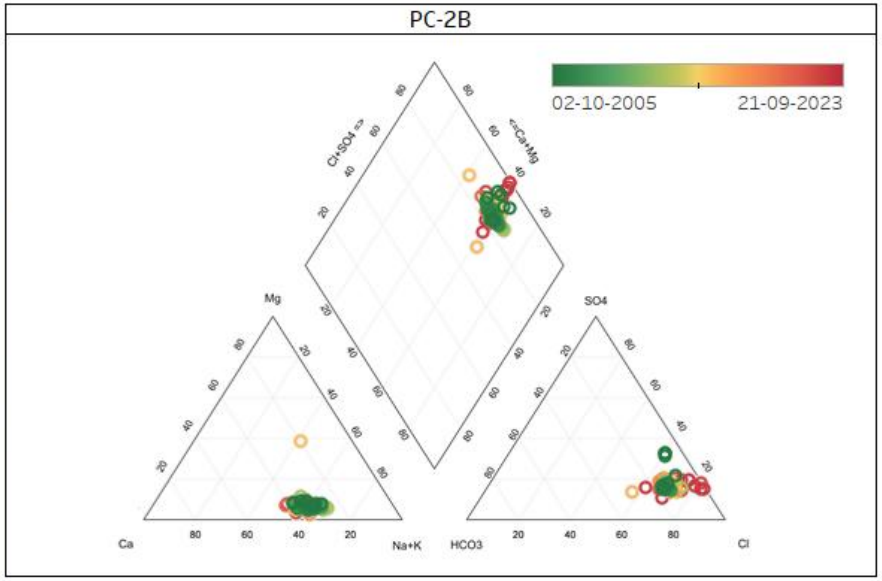

PCAR-5
PCAR-3
PC-2B
PCAR-4
P-10
AR-1569
P-11
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap

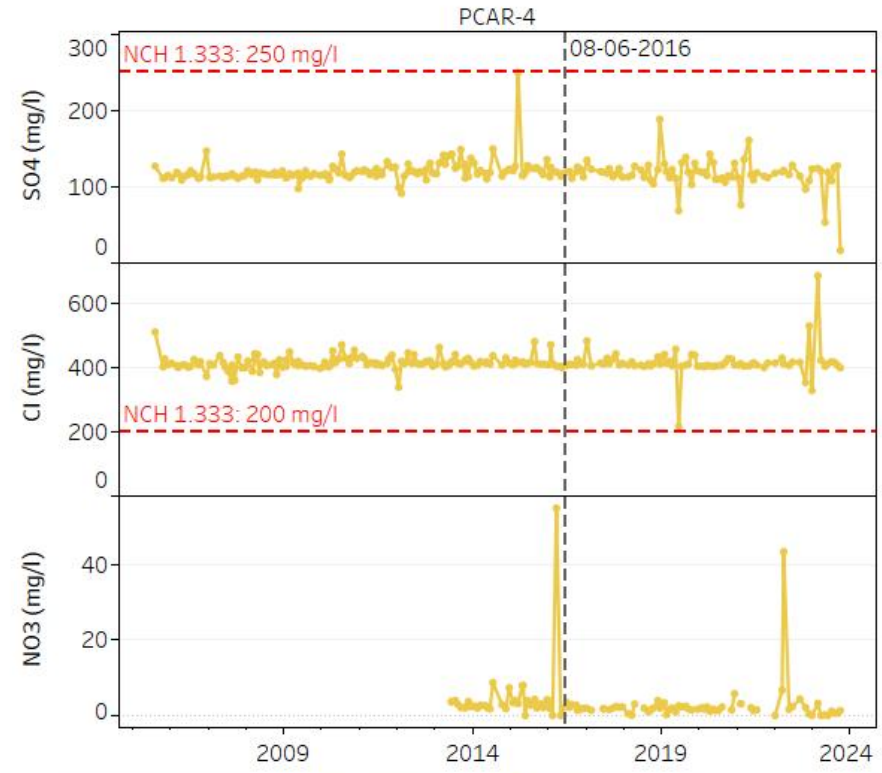

PCAR-3
26-07-2005
21-09-2023
Ca
Mg
Na+K
HCO3
SO4
Cl

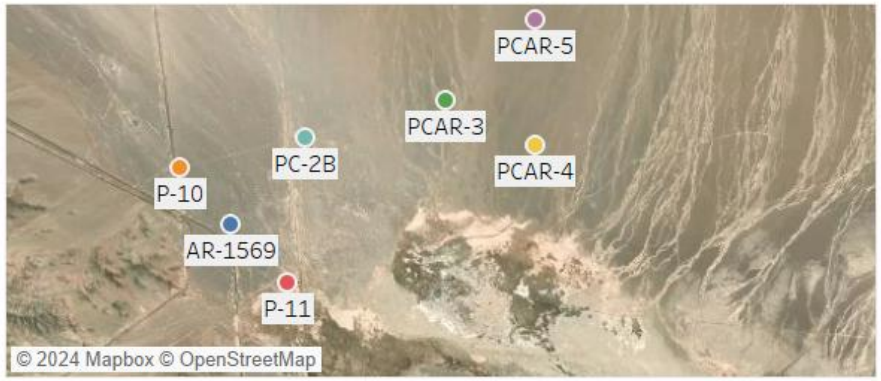

PC-2B
08-06-2016
NCH 1.333: 250 mg/l
SO4 (mg/l)
300
200
100
0
600
400
200
0
Cl (mg/l)
NCH 1.333: 200 mg/l
NO3 (mg/l)
100
50
0
2009
2014
2019
2024

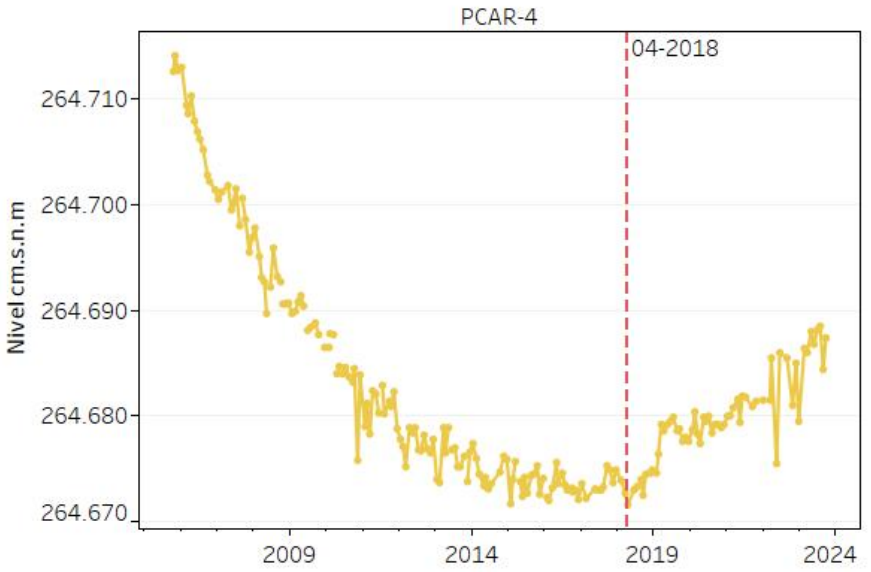

PCAR-5
PCAR-3
PC-2B
PCAR-4
P-10
AR-1569
P-11
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap

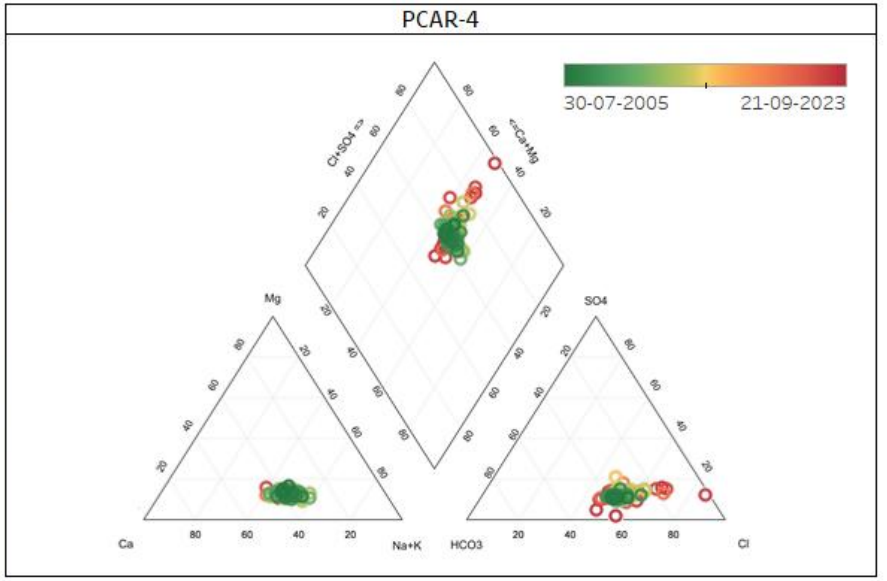

PC-2B
02-2013
Nivel cm.s.n.m
264.580
264.570
264.560
264.550
264.540
264.530
264.520
2009
2014
2019
2024

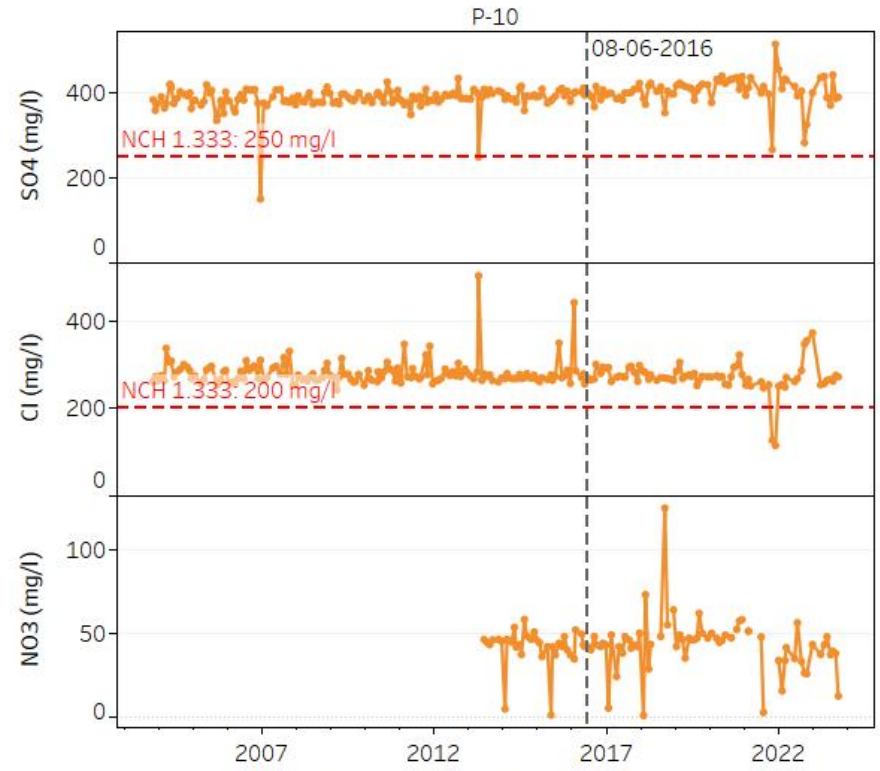

PC-2B
02-10-2005
21-09-2023
Ca
Mg
Na+K
SO4
HCO3
Cl

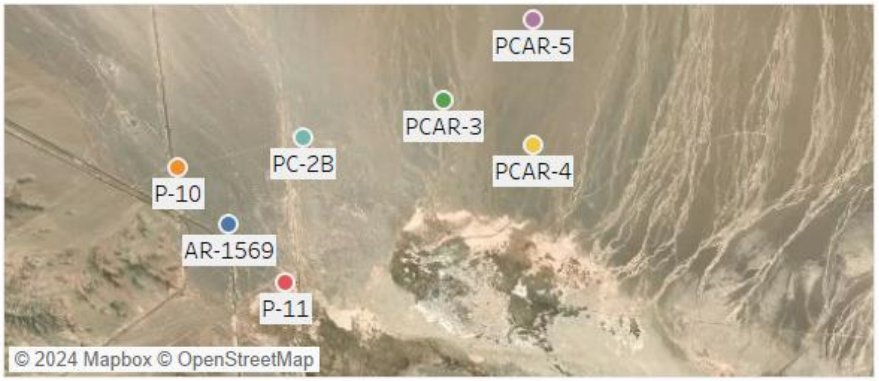

PCAR-4
NCH 1.333: 250 mg/l
08-06-2016
SO4 (mg/l)
300
200
100
0
Cl (mg/l)
600
400
200
0
NCH 1.333: 200 mg/l
NO3 (mg/l)
40
20
0
2009
2014
2019
2024

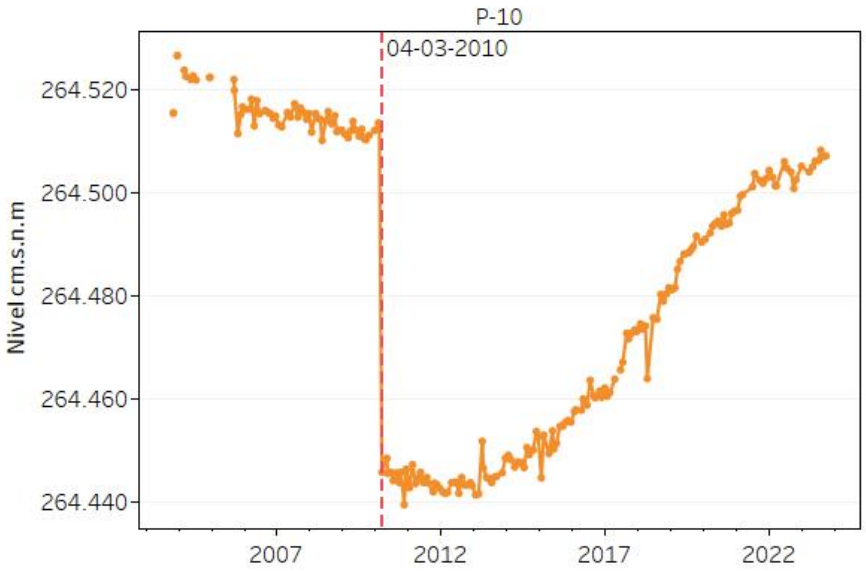

PCAR-5
PCAR-3
PC-2B
PCAR-4
P-10
AR-1569
P-11
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap

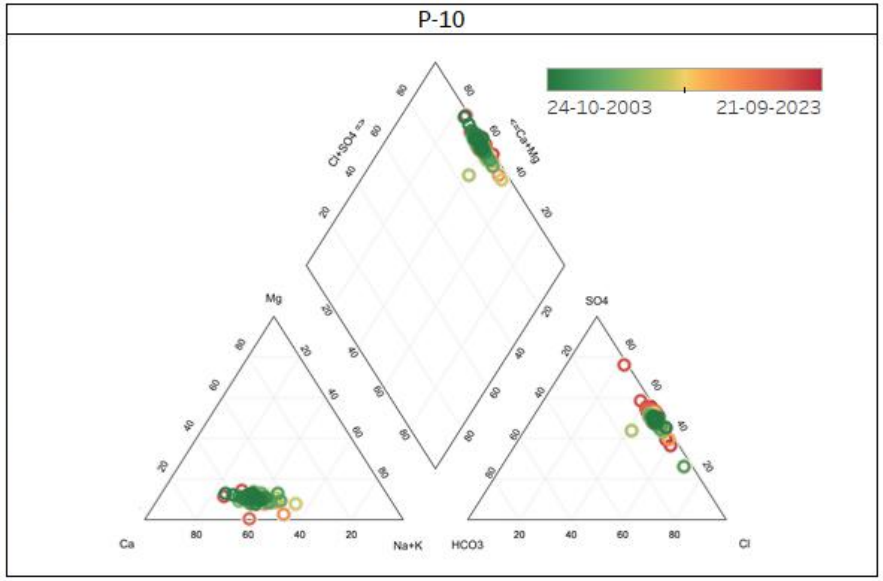

PCAR-4
04-2018
Nivel cm.s.n.m
264.710
264.700
264.690
264.680
264.670
2009
2014
2019
2024

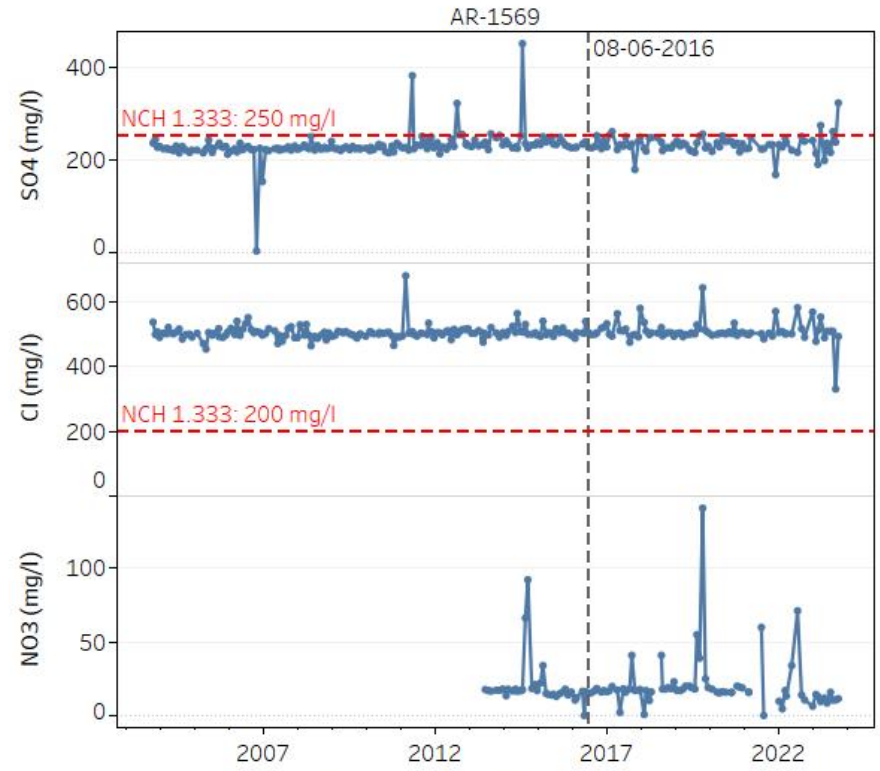

PCAR-4
30-07-2005
21-09-2023
Ca+SO4 =>
<=Ca+Mg
Mg
SO4
Ca
Na+K
HCO3
Cl

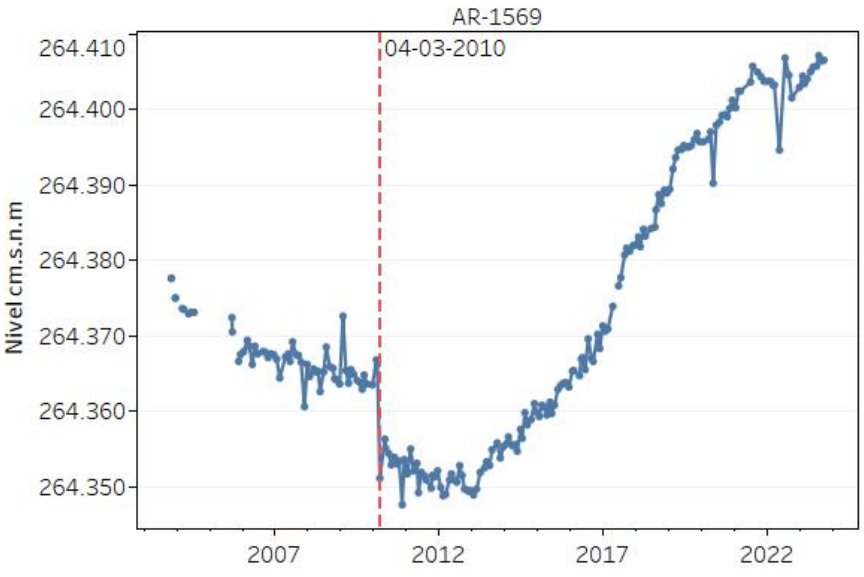

P-10
08-06-2016
SO4 (mg/l)
400
200
0
NCH 1.333: 250 mg/l
Cl (mg/l)
400
200
0
NCH 1.333: 200 mg/l
NO3 (mg/l)
100
50
0
2007
2012
2017
2022

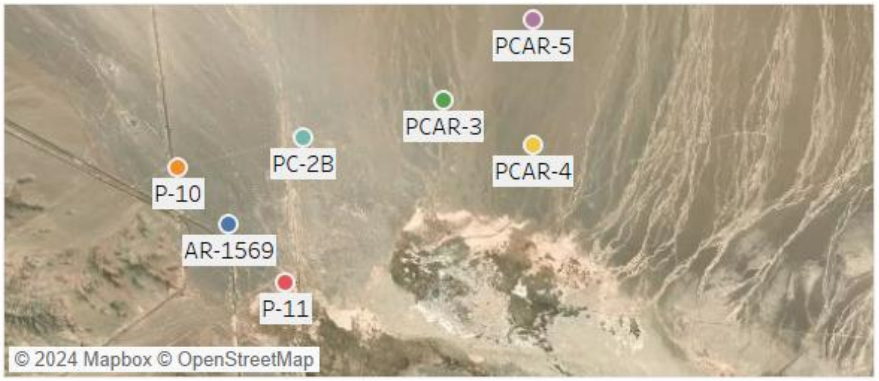

PCAR-5
PCAR-3
PC-2B
PCAR-4
P-10
AR-1569
P-11
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap

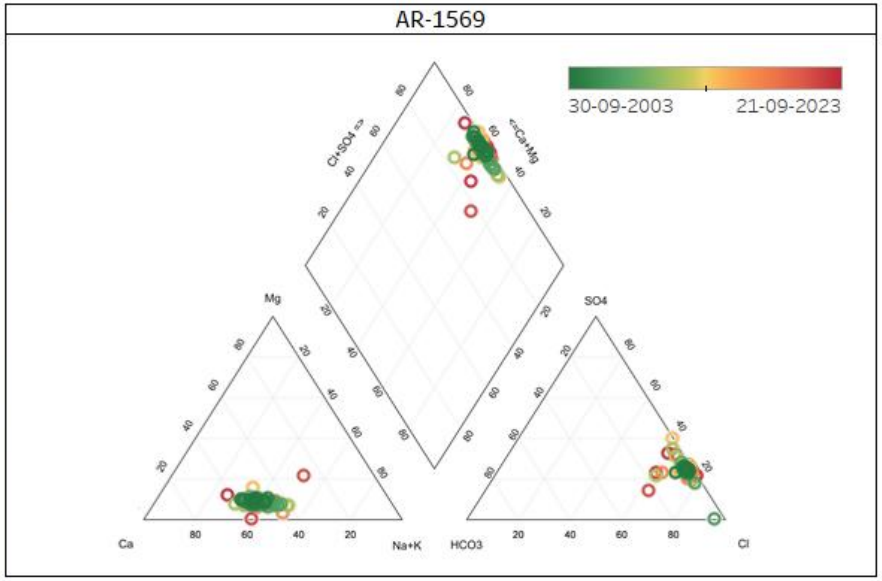

P-10
04-03-2010
Nivel cm.s.n.m
264.520
264.500
264.480
264.460
264.440
2007
2012
2017
2022

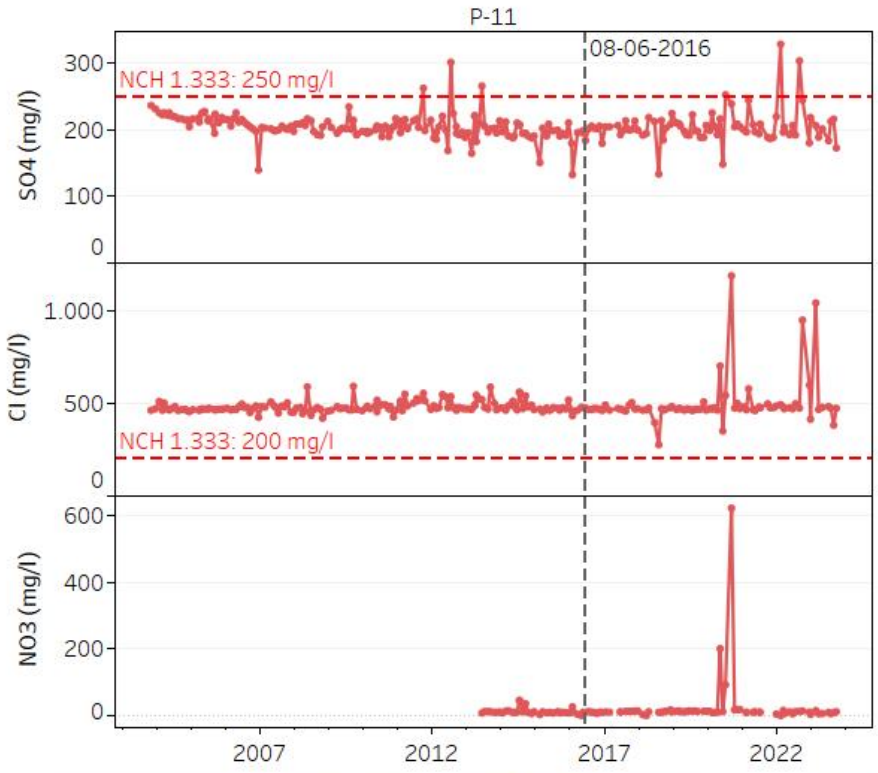

P-10
24-10-2003
21-09-2023
Ca
Mg
Na+K
SO4
HCO3
Cl

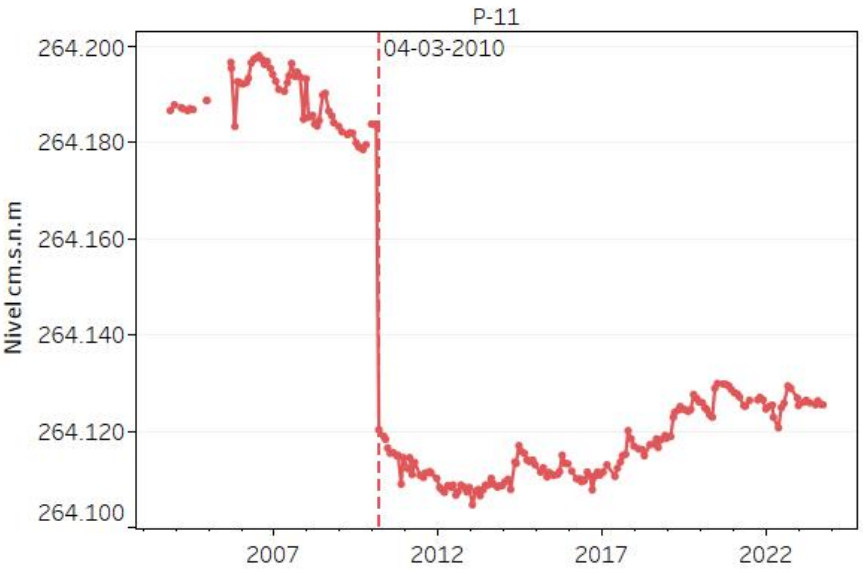

AR-1569
08-06-2016
SO4 (mg/l)
NCH 1.333: 250 mg/l
Cl (mg/l)
NCH 1.333: 200 mg/l
NO3 (mg/l)
2007
2012
2017
2022

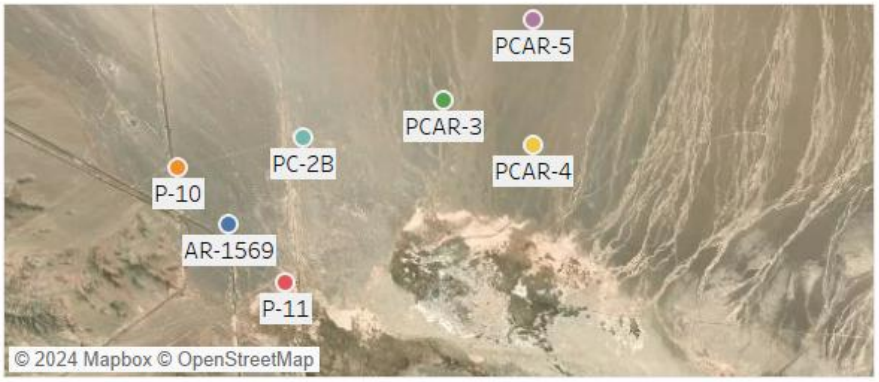

AR-1569
04-03-2010
Nivel cm.s.n.m
264.410
264.400
264.390
264.380
264.370
264.360
264.350
2007
2012
2017
2022

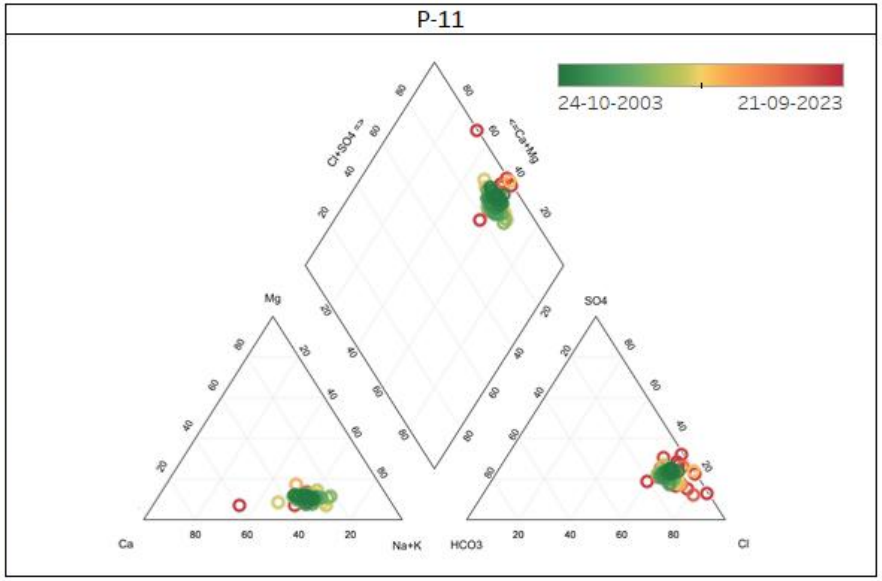

PCAR-5
PCAR-3
PC-2B
PCAR-4
P-10
AR-1569
P-11
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap


AR-1569
30-09-2003
21-09-2023
Ca
Mg
Na+K
HCO3
SO4
Cl


P-11
08-06-2016
NCH 1.333: 250 mg/l
SO4 (mg/l)
300
200
100
0
Cl (mg/l)
1.000
500
NCH 1.333: 200 mg/l
0
NO3 (mg/l)
600
400
200
0
2007
2012
2017
2022


P-11
04-03-2010
Nivel cm.s.n.m
264.200
264.180
264.160
264.140
264.120
264.100
2007
2012
2017
2022


PCAR-5
PCAR-3
PC-2B
PCAR-4
P-10
AR-1569
P-11
© 2024 Mapbox © OpenStreetMap


P-11
24-10-2003
21-09-2023
Ca+Mg
Cl+SO4
Mg
SO4
Ca
Na+K
HCO3
Cl