Flow Hydro Consulting

Memorándum Técnico

Para:	Manuel Bucci – Gerencia de Aguas y Relaves, Codelco.
De:	Flow Hydro Consulting Group
Fecha:	12 de noviembre de 2026
Ref.:	Plan de Alerta Temprana de Aguas Subterráneas, Codelco DRT

1 INTRODUCCIÓN

La División Radomiro Tomic de Codelco se encuentra evaluando ambientalmente el Proyecto "Continuidad del Proceso de Lixiviación y Adecuaciones al Proyecto Minero División Radomiro Tomic", el cual tiene como objetivo dar continuidad operacional a la línea de hidrometalurgia de la División Radomiro Tomic (DRT) durante 30 años (2029-2058), manteniéndose dentro de la vida útil aprobada en la RCA 022/2016. Esto implica extender la operación del proceso de lixiviación clorurada a una tasa promedio de 154 ktpd, así como la construcción de un nuevo botadero de ripios.

Por otra parte, el Proyecto considera un aumento en los movimientos de mina, pasando de 675 a 725 ktpd al año como promedio de la fase de operación con un máximo de 948 kptd. Para ello, se requiere expandir y profundizar el rajo de DRT, junto con la ampliación e incorporación de botaderos de lastre y acopios de mineral.

Respecto al procesamiento de minerales sulfurados, se actualizan los parámetros aprobados en la RCA N° 022/2016, contemplando el transporte mediante correa a una tasa anual promedio de 100 ktpd durante 22 años hacia la Concentradora de la División Chuquicamata (DCH) (denominada Fase 1), así como el envío inicial de 100 ktpd a la nueva concentradora de DRT, con el objetivo de aumentar progresivamente el procesamiento hasta alcanzar los 200 ktpd previamente aprobados. Además, se incorpora el transporte de mineral y/o lastre en camiones hacia la División Chuquicamata (DCH), a una tasa promedio de 20 ktpd durante 14 años de la fase de operación. Por otra parte, se otorga flexibilidad para el envío adicional de mineral mediante camiones, lo que permite alcanzar un transporte total promedio hacia DCH de hasta 55 ktpd durante 23 años de la fase de operación.

Finalmente, el Proyecto contempla la ampliación de instalaciones de soporte, como el relleno sanitario y el patio de neumáticos, la reubicación de infraestructura asociada al crecimiento del rajo y la incorporación de una barrera hidráulica preventiva para controlar el avance de infiltraciones históricas del sector industrial. Su configuración de referencia considera dos pozos de extracción y dos de inyección.

En este contexto se ha desarrollado el presente Plan de Alerta Temprana (PAT), cuyo objetivo es detectar un eventual avance de la pluma de sulfato existente en la División Radomiro Tomic, asociada a las primeras fases de los botaderos de ripios aprobadas mediante la RCA 015/96, y activar medidas preventivas para controlar su propagación aguas abajo en Pampa Cere y su acuífero protegido. La red de control se distribuye entre el frente de pluma interpretado con información actualizada a 2025 y el entorno del salar, de modo que el seguimiento permita reconocer cambios y evaluar la respuesta de la barrera hidráulica cuando corresponda su activación.

Este memorándum presenta el contexto hidrogeológico que sustenta el PAT, la ubicación y habilitación de sus puntos de control, los criterios de calidad de los datos y la definición de umbrales. A continuación, establece las condiciones de activación, las acciones de respuesta y su seguimiento, así como los criterios de desactivación y retorno al monitoreo basal.

2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UN PLAN DE ALERTA TEMPRANA (PAT)

Un Plan de Alerta Temprana en términos generales, es una herramienta de gestión ambiental que relaciona la observación de variables de estado con umbrales y acciones preventivas. Su finalidad es detectar desviaciones respecto de las condiciones evaluadas y actuar antes de que se materialicen efectos adversos sobre el objeto de protección. De acuerdo con el criterio de evaluación del SEA (2022), su diseño debe abordar los siguientes contenidos:

1. Ubicación de puntos de observación. En caso de pozos, se debe presentar el detalle constructivo.
2. Variables hidrogeológicas que serán monitoreadas, cuyo estado y evolución sean indicativos de la afectación del objeto de protección.
3. Umbrales límites que aseguren la no afectación de los objetos de protección. Se deben presentar los argumentos técnicos que sustentan la definición del umbral.
4. Umbrales intermedios que asegurarán no sobrepasar el umbral límite del objeto de protección.
5. Duración y frecuencia de monitoreo de cada variable.
6. Metodología de medición de cada variable.
7. Plan de acción ante la superación de los distintos umbrales, que permitan la no afectación de los objetos de protección.
8. Análisis de la eficacia del PAT mediante la modelación y simulación de escenarios de activación, que considere los puntos de monitoreo, los umbrales definidos para cada variable y las acciones ante la superación de estos.

El presente PAT utiliza concentraciones de sulfato, expresadas en mg/L, para definir la superación de umbrales en cada punto de control. La recuperación corresponde al restablecimiento de concentraciones inferiores al umbral aplicable. Cada condición se evalúa con los resultados y el criterio de persistencia temporal definido en la sección 4.4.

En este contexto, el PAT establece dos umbrales con sus respectivos niveles de respuesta:

Umbral intermedio: concentración de alerta que activa el seguimiento quincenal y la actualización de los modelos para analizar la desviación observada. Este nivel permite reconocer cambios antes de alcanzar el umbral límite y preparar la respuesta correspondiente, junto con las acciones para una eventual activación del umbral límite.

Umbral límite: concentración que activa las acciones de mayor intensidad, incluida la operación de la barrera hidráulica, una vez cumplida la condición de persistencia. Su evaluación considera la ubicación del punto de

control, el funcionamiento hidrogeológico y la respuesta prevista de las medidas para resguardar el objeto de protección.

Los umbrales se expresan como concentraciones medibles de sulfato (mg/L) y consideran los antecedentes históricos de cada punto (pozo). La activación requiere la superación en al menos uno de los seis pozos durante tres meses consecutivos. La desactivación exige la recuperación del conjunto de la red bajo el umbral aplicable durante al menos tres meses consecutivos, con evaluación técnica e información a la SMA y la DGA, según se precisa en la sección 4.4.

Los puntos de observación utilizados para el monitoreo de las variables deben cumplir los siguientes criterios:

- Estar ubicados dentro del área de influencia del proyecto.
- Tener una frecuencia de monitoreo que asegure la implementación de acciones preventivas.
- Ser representativos del objeto de protección, considerando la variable monitoreada y la ubicación de la fuente generadora de impacto.
- Estar ubicados a una distancia del objeto de protección tal que, considerando los tiempos de propagación de eventuales perturbaciones, la activación de las acciones sea preventiva y asegure la no afectación del objeto en cuestión.
- Se deben incluir puntos de monitoreo en las cercanías del objeto de protección, con la finalidad de verificar los umbrales y analizar la relación entre la variable y el objeto de protección.

3 CONTEXTO DEL FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DE LA DIVISIÓN RT

La división Radomiro Tomic cuenta con un modelo hidrogeológico conceptual y numérico, el cual ha sido actualizado para el presente proyecto, de manera de mejorar el conocimiento sobre el funcionamiento hidrodinámico en el Sector Aguas Arriba RT, Sector Industrial RT y Sector Pampa Cere, con especial énfasis en la caracterización y evolución de la pluma de sulfatos existente.

El dominio del estudio hidrogeológico abarca aproximadamente 579 km² e incluye las instalaciones RT, Pampa Cere, el Salar de Cere y Pampa Carbonatera, incorporando además el rajo Chuquicamata dentro del dominio de modelación, permitiendo evaluar potenciales interacciones hidráulicas entre ambas operaciones.

La actualización del modelo conceptual integra un catastro de 375 pozos y sondajes, con 243 registros estratigráficos, 184 puntos con niveles y 70 puntos con ensayos hidráulicos, además de antecedentes hidroquímicos, isotópicos y geofísicos (Flow, 2026). Los antecedentes disponibles permitieron generar un modelo robusto, con un adecuado entendimiento del funcionamiento hidrogeológico del sistema.

Se reconocen seis unidades hidrogeológicas, de las cuales la UH-5 y la UH-2 constituyen los principales acuíferos (Figura 1 y Figura 2). La UH-5, formada por gravas y arenas semiconsolidadas, constituye el acuífero inferior o principal y la vía de flujo y transporte de la pluma. La UH-2 corresponde al acuífero superior, de carácter cárstico-detrítico, vinculado al entorno del Salar de Cere. Ambos acuíferos están separados por las unidades acuitardo UH-3 y UH-4 en Pampa Carbonatera, estimándose al oeste del salar una conexión hidráulica local. El basamento

hidrogeológico corresponde a la UH-6, con sectores fracturados de mayor permeabilidad relativa y sectores de roca más competente de muy baja permeabilidad.

La recarga del sistema comprende aportes naturales laterales, pérdidas del río Loa hacia el acuífero superior y flujos subterráneos provenientes del norte, además de infiltraciones históricas de aguas de proceso en el sector industrial RT (primeras fases del botadero de ripios).

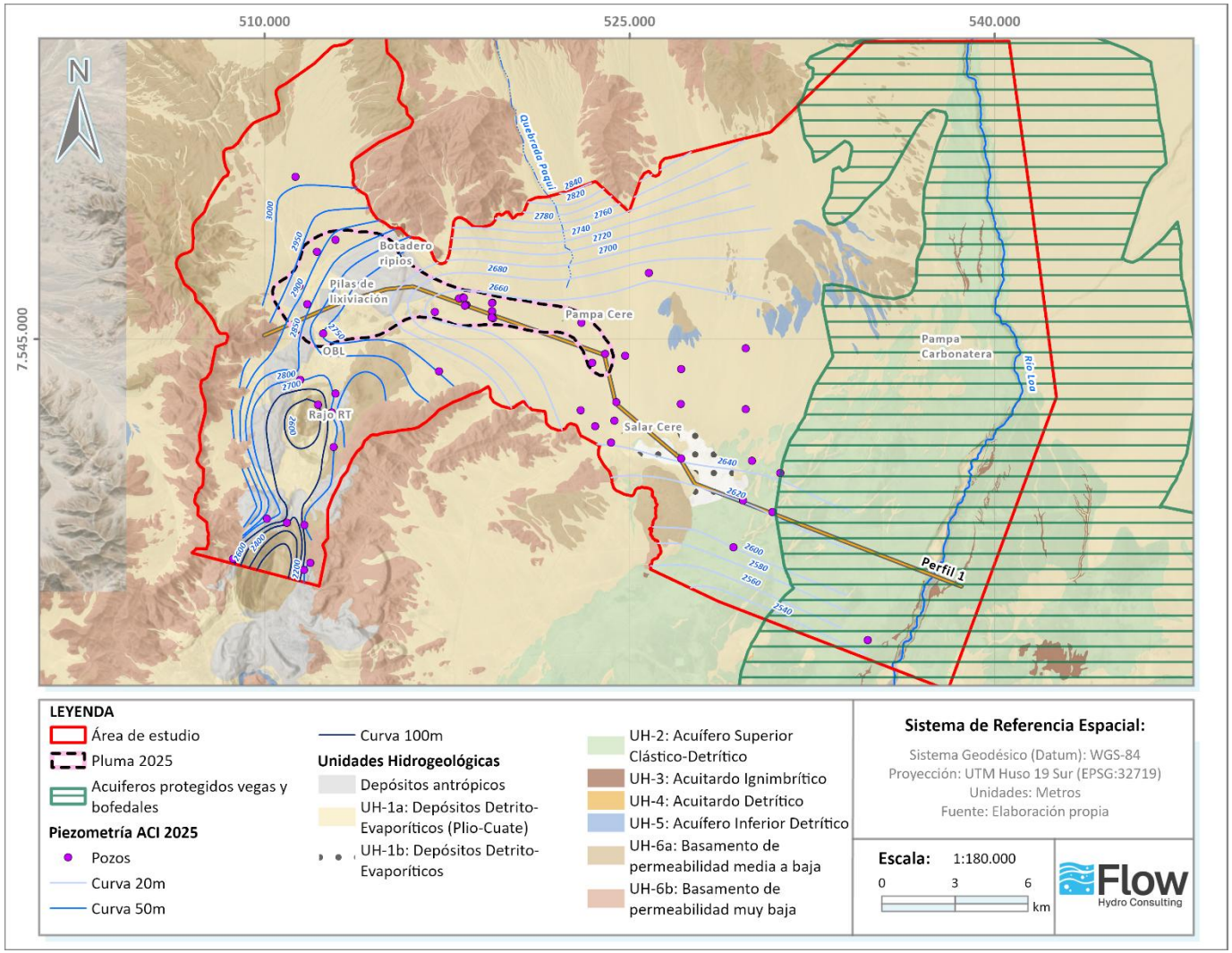
La piezometría actualizada a 2025 indica un flujo predominante desde el norte y noroeste hacia Pampa Cere y hacia el sureste del dominio. En Pampa Carbonatera el flujo se orienta hacia el sur. El gradiente hidráulico disminuye desde el borde occidental de Pampa Cere, donde es aproximadamente 1,4%, hasta valores cercanos a 0,1% en su sector central. Las descargas incluyen el drenaje del rajo (2,4 L/s, aproximadamente), los flujos subterráneos hacia el sur y Pampa Grama y la descarga natural en el entorno del Salar de Cere, incluida la evaporación (Flow, 2026).

Los registros próximos a las instalaciones, en los pozos PCH-14, PCH-16B y PCH-18, muestran ascensos del orden de 1 a 4 m en un periodo de aproximadamente 15 años (enero de 2011 a diciembre de 2025). En los pozos P-7, P-8 y PCAR-1 se observan ascensos menores a 1 m entre fines de 2017 y diciembre de 2025. La diferencia entre sectores y su relación con las series de calidad se consideran en la interpretación de las infiltraciones y de la posición del frente de pluma (Flow, 2026).

La composición de las aguas refleja tanto la interacción con materiales geológicos como los aportes de aguas de proceso. La disolución de minerales presentes en rocas sedimentarias, ígneas y niveles evaporíticos pueden aportar sulfato y cloruro de origen natural. En sectores del dominio se describen concentraciones naturales de sulfato entre 400 mg/L y 1.200 mg/L (Flow, 2024, 2026). Por ello, la interpretación del avance de las infiltraciones integra las series de sulfato con los niveles y los demás antecedentes hidroquímicos e isotópicos, considerando la condición de fondo o natural de cada sector.

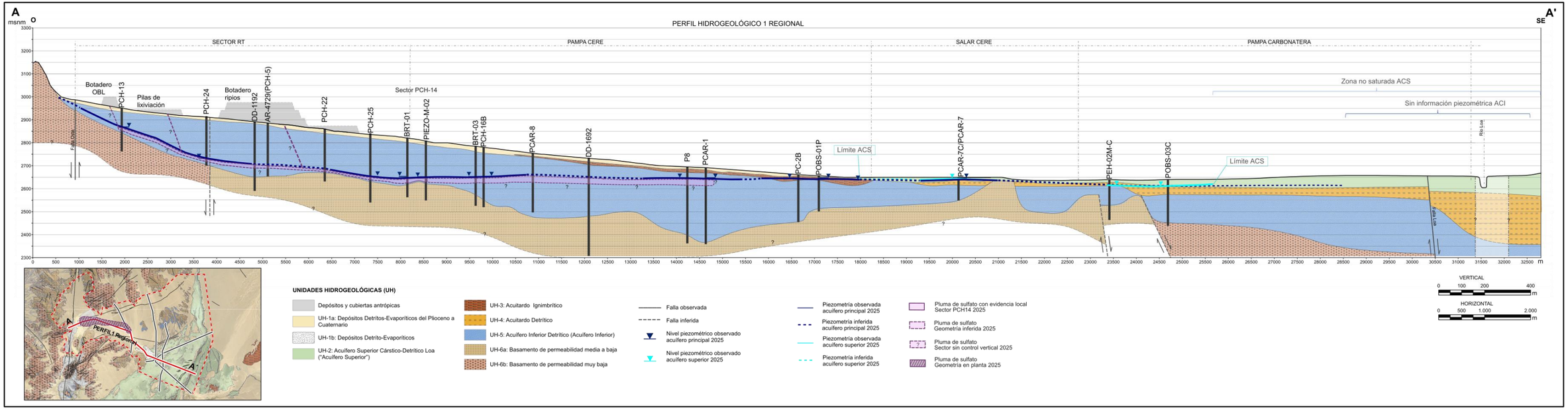
Las infiltraciones históricas, asociadas al sector de las primeras fases de depositación de mineral lixiviado en el botadero de ripios de DRT, han originado un aumento en la concentración de sulfato que se desplaza por el acuífero principal hacia Pampa Cere. Los antecedentes geofísicos TEM y NanoTEM aportan información complementaria sobre anomalías conductoras en el área de interés.

Con la información disponible a 2025, la interpretación del frente de pluma se estima próximo a pozo P-8 y PCAR-1, a unos 8 km de las instalaciones y aproximadamente a 3 km del objeto de protección o acuífero que alimenta vegas y bofedales, que se ubica en el Salar de Cere. La delimitación del frente de pluma resulta de la interpretación conjunta de niveles y calidad de agua. Los registros de los puntos ubicados aguas abajo, como PC-2B, muestran concentraciones cercanas a 150 mg/L sin observarse una tendencia creciente sostenida en la serie analizada (Flow, 2026).



Fuente: Elaboración propia en base a Flow (2026)

Figura 1: Contexto hidrogeológico del área de operaciones de la División Radomiro Tomic.



Fuente: Elaboración propia en base a Flow (2026)

Figura 2: Perfil hidrogeológico a lo largo del área de estudio.

4 DISEÑO PROPUESTO PARA EL PAT

4.1 Variables de monitoreo

La variable de activación del PAT es la concentración de sulfato disuelto en los seis pozos definidos en la sección 4.2. Cinco de ellos controlan el acuífero principal y uno, correspondiente al pozo PCAR-7C controla el acuífero superior en el entorno del salar. El sulfato permite dar continuidad al seguimiento histórico y relacionar las concentraciones observadas con los escenarios de transporte. Su interpretación considera las fuentes naturales y la información complementaria del Plan de Vigilancia Ambiental (PVA), de modo que el análisis de causalidad no dependa de un único parámetro.

La frecuencia basal de monitoreo es mensual, en continuidad con el PVA vigente. Como referencia histórica de orden de magnitud, la pluma de sulfatos a alcanzado una extensión de 8 km en 25 años, lo que equivale a un avance aparente medio del orden de 320 m/año. Este valor no representa necesariamente una velocidad medida del agua ni la velocidad actual del frente, sino que se explica por la disminución del gradiente hidráulico hacia el centro de Pampa Cere, lo que favorece tiempos de tránsito mayores que en el sector occidental (aguas arriba), para iguales condiciones de conductividad hidráulica y porosidad efectiva (aguas abajo). La evaluación de la respuesta del sistema se apoya en la modelación de flujo y transporte y en las series de monitoreo.

La frecuencia de monitoreo aumenta a quincenal o semanal al cumplirse las condiciones de activación de los umbrales intermedio o límite, respectivamente. La duración del seguimiento se coordina con el PVA del proyecto y con la permanencia de las condiciones que requieran mantener las acciones del PAT.

El muestreo se realizará mediante bombeo o *bailer*, conforme al procedimiento de monitoreo del PVA y a las exigencias aplicables a las entidades que ejecuten el muestreo y los análisis (ETFA). En cada campaña se registrarán el método, la profundidad de muestreo y los antecedentes de terreno necesarios para comparar resultados entre campañas y reconocer cambios asociados al procedimiento de medición.

El control de calidad incluirá el balance iónico de los análisis de iones mayoritarios. El valor absoluto del error de balance iónico (EBI) se calculará como:

$$|EBI| = 100\ x\ \frac{|\sum cationes - \sum aniones|}{\sum cationes + \sum aniones}$$

Con las concentraciones expresadas en miliequivalentes por litro. Se considerará aceptable un error absoluto igual o inferior a 10%. Los resultados que excedan ese valor se identificarán como sujetos a revisión y se solicitará su verificación analítica o un nuevo muestreo, según corresponda.

4.2 Puntos de monitoreo

El PAT comprende seis de los 29 puntos de monitoreo del PVA reforzado, correspondientes a los pozos PC-2B, POBS-01P, PCAR-3 y PCAR-4, ubicados en Pampa Cere, aguas abajo del frente de la pluma interpretado a 2025. Los pozos PCAR-7 y PCAR-7C, por su parte, se sitúan en el entorno del Salar de Cere (Figura 3). Esta selección

permite mantener una red de control entre la pluma y el objeto de protección, e incorpora el seguimiento de los dos acuíferos reconocidos y relacionados con el salar (superior e inferior).

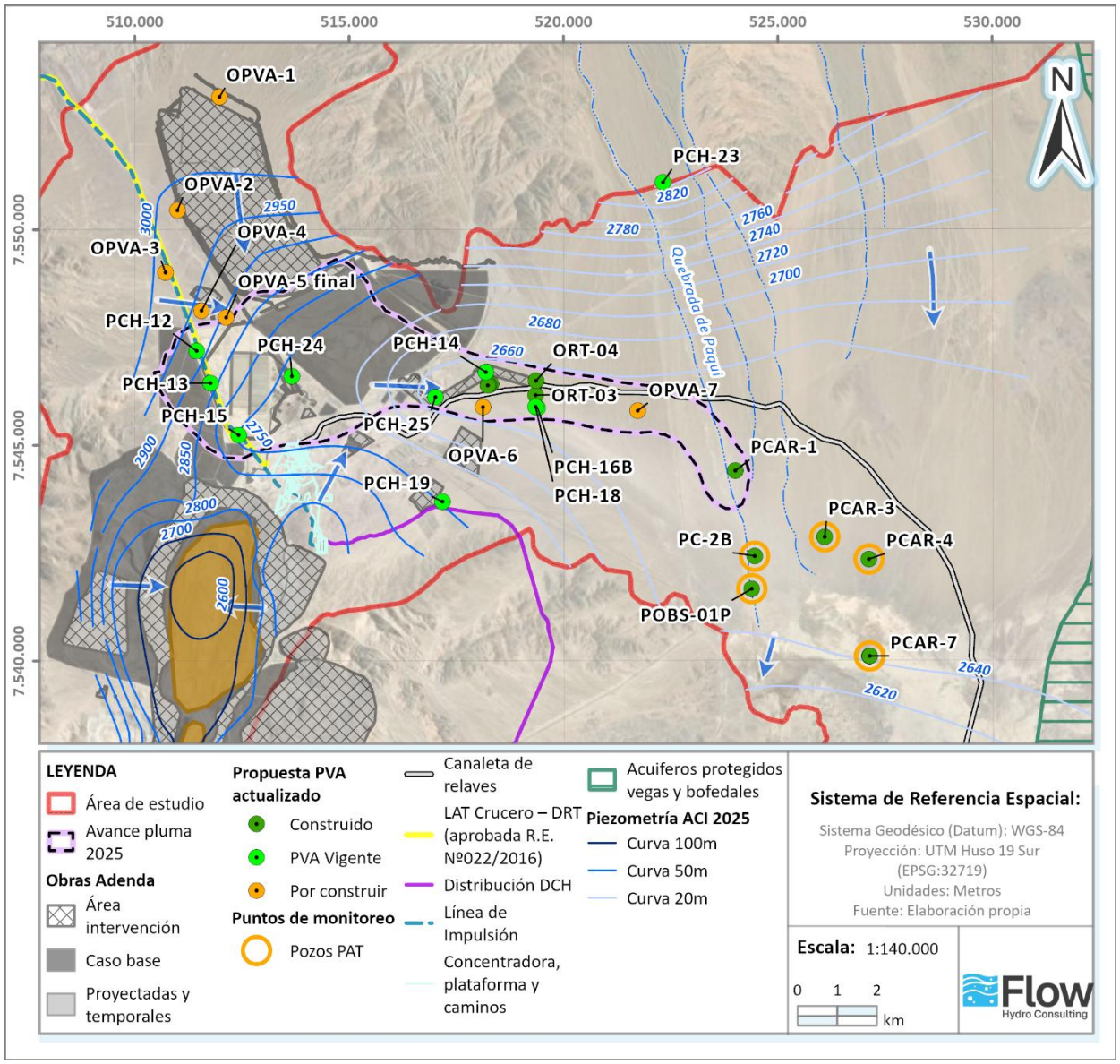
La evaluación conjunta de estos puntos permite seguir la distribución espacial del sulfato, distinguir una señal localizada de una tendencia más extendida y verificar la evolución de las concentraciones durante la aplicación de las medidas.

Respecto de la habilitación, los pozos PC-2B, POBS-01P, PCAR-3, PCAR-4 y PCAR-7 están habilitados en las gravas de la UH-5. Por su parte, el PCAR-7C está habilitado en las calizas de la UH-2 y permite observar la respuesta del acuífero superior ante la conexión hidráulica local estimada con el acuífero principal al oeste del salar. Las profundidades y los tramos cribados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Habilitación de pozos de monitoreo del PAT

Pozo	Profundidad (m)	Tramo cribado			
		Tramos (m)	Litología	UH	Acuífero
PC-2B	207	48,5-105,7; 116,4-156,1; 173-201,3	Gravas	5	Principal
POBS-01P	155	11-22,5;51-73,9;79,6-96,8;102,5-119,7;125,5-142,7	Gravas	5	Principal
PCAR-3	228	50-68;74-92;98-116;122-140;146-164;170-188;191-215	Gravas	5	Principal
PCAR-4	138	42-60; 63-87; 90-132	Gravas	5	Principal
PCAR-7	100,5	35-98	Gravas	5	Principal
PCAR-7C	7,5	1,5-7,5	Calizas	2	Superior

Fuente: Elaboración propia en base a modelación hidrogeológica (Flow, 2026).



Fuente: Elaboración propia

Figura 3: Pozos de monitoreo del Plan de Alerta Temprana (PAT)

4.3 Definición de umbrales

Los umbrales del PAT se definen mediante la evaluación conjunta de las concentraciones históricas de sulfato, la condición de fondo de cada punto, las proyecciones del modelo numérico de transporte y referencias nacionales de calidad de agua para usos potable y de riego. Para cinco de los seis pozos se adopta un umbral intermedio de 250 mg/L, correspondiente al valor de sulfato de la NCh1333.Of78, modificada en 1987, para agua de riego, y un umbral límite de 500 mg/L, correspondiente al valor de la NCh409/1.Of2005 para agua potable. Estas referencias proporcionan concentraciones explícitas y verificables para organizar una respuesta preventiva de intensidad

creciente. Su aplicación al PAT se fundamenta en las condiciones hidrogeológicas y en la ubicación de la red respecto del frente de la pluma y del objeto de protección.

En los pozos PC-2B, POBS-01P, PCAR-4, PCAR-7 y PCAR-7C, las concentraciones históricas representativas se sitúan en torno a 120–150 mg/L. El umbral intermedio de 250 mg/L se ubica por encima de esas condiciones y permite reconocer un incremento persistente, activar el seguimiento quincenal, revisar sus causas y preparar las acciones de respuesta antes de alcanzar el umbral límite. El valor de 500 mg/L establece el segundo nivel de intervención, asociado al monitoreo semanal y a la operación de la barrera hidráulica. La separación entre ambos niveles se complementa con el criterio de persistencia de tres meses y con las acciones de preparación e implementación descritas en la sección 4.4.

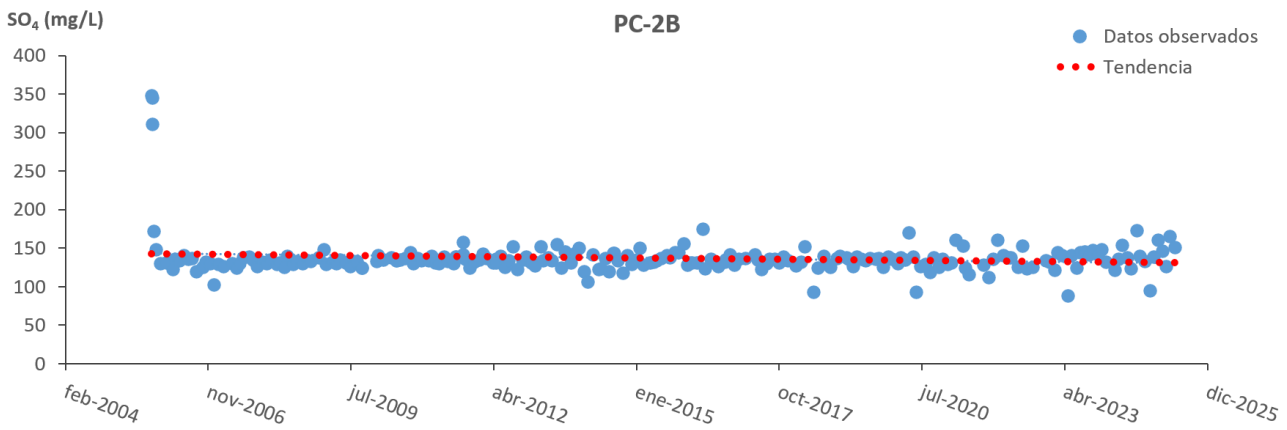
El uso de referencias normativas permite mantener criterios uniformes entre puntos, con condiciones históricas comparables y contrastar las observaciones con valores reconocidos para usos del agua. Su función dentro del PAT es definir hitos operativos de alerta y respuesta. El resguardo del acuífero y de los ecosistemas asociados al Salar de Cere se sustenta en la aplicación conjunta de esos hitos, la posición de los pozos de control, la evolución de la pluma y la eficacia de las medidas evaluada mediante los modelos y el seguimiento ambiental. Las normas citadas se emplean con ese alcance referencial, considerando los usos específicos para los cuales fueron establecidas.

Los umbrales para el pozo PCAR-3 se evaluaron de forma específica, porque su concentración histórica media, cercana a 340 mg/L, supera el nivel intermedio general. Para este punto se definieron umbrales de 450 mg/L y 700 mg/L, establecidos respecto de su condición de fondo o natural y de la respuesta de la red. Estos valores corresponden a criterios particulares del PAT y su fundamento se desarrolla a continuación. La Tabla 2 y la Figura 4 a Figura 9 presentan los antecedentes históricos utilizados. La calidad exigible al agua de inyección se aborda separadamente en los antecedentes del PAS 158 y en los permisos correspondientes.

Tabla 2: Información histórica disponible para los pozos del PAT

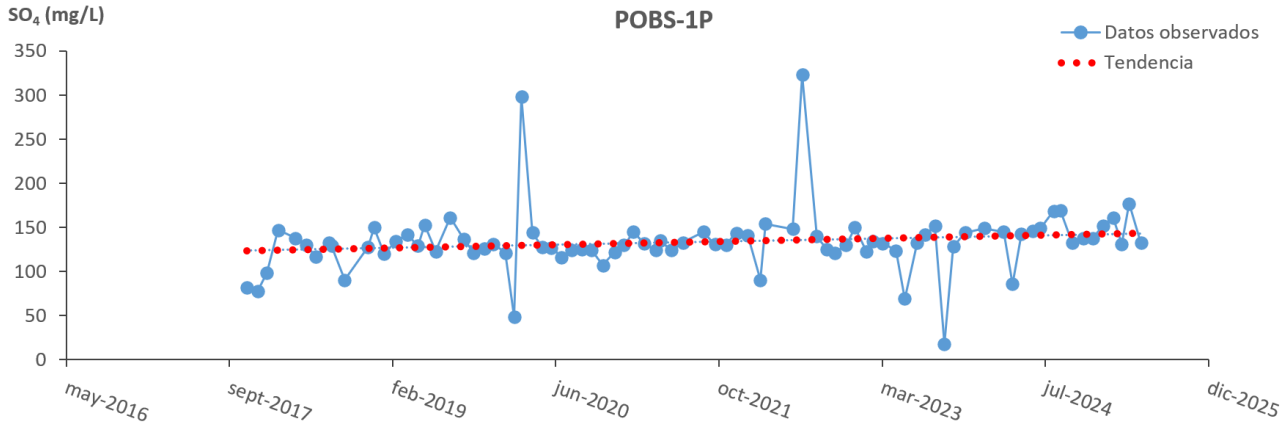
Pozo PAT	Fecha inicial	Fecha final	Cantidad de datos	Tendencia
PC-2B	02-10-2005	16-05-2025	292	Estable cercano a 150 mg/L, leve tendencia global al descenso (-0,05 $\frac{mg}{L \cdot mes}$)
POBS-01P	14-11-2017	16-05-2025	75	Estable cercano a 130 mg/L, leve tendencia global al ascenso (0,2 $\frac{mg}{L \cdot mes}$)
PCAR-3	26-07-2005	21-12-2023	283	Estable cercano a 340 mg/L, leve tendencia global al ascenso (0,05 $\frac{mg}{L \cdot mes}$)
PCAR-4	30-07-2005	16-05-2025	298	Estable cercano a 120 mg/L, leve tendencia global al ascenso (0,01 $\frac{mg}{L \cdot mes}$)
PCAR-7	26-08-2005	16-05-2025	290	Estable cercano a 150 mg/L, leve tendencia global al ascenso (0,1 $\frac{mg}{L \cdot mes}$)
PCAR-7C	25-08-2005	16-05-2025	291	

Fuente: Elaboración propia en base a Flow (2026)



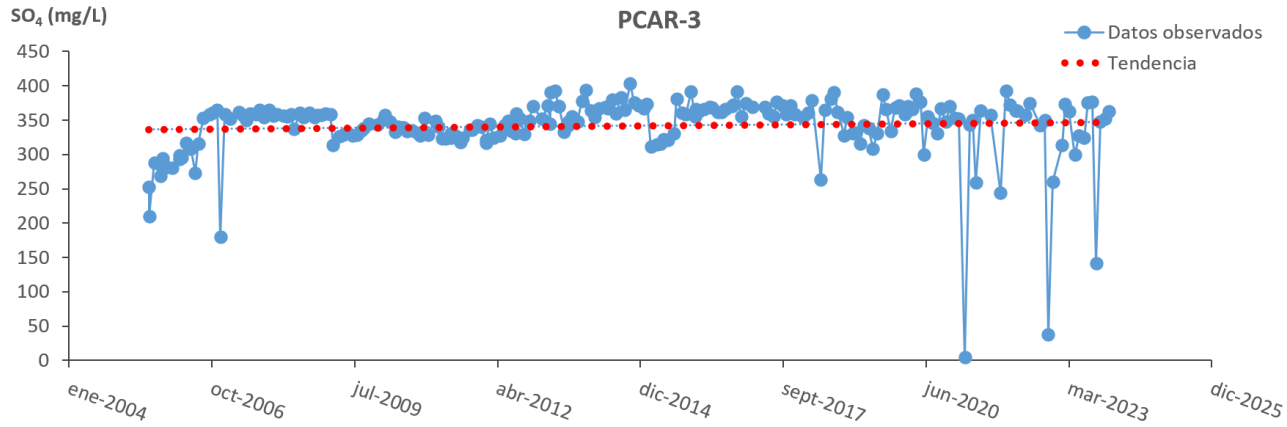
Fuente: Elaboración propia en base a Flow (2026)

Figura 4: Concentración de sulfato histórica en pozo PC-2B del PAT. EBI de datos es ≤ a 10%



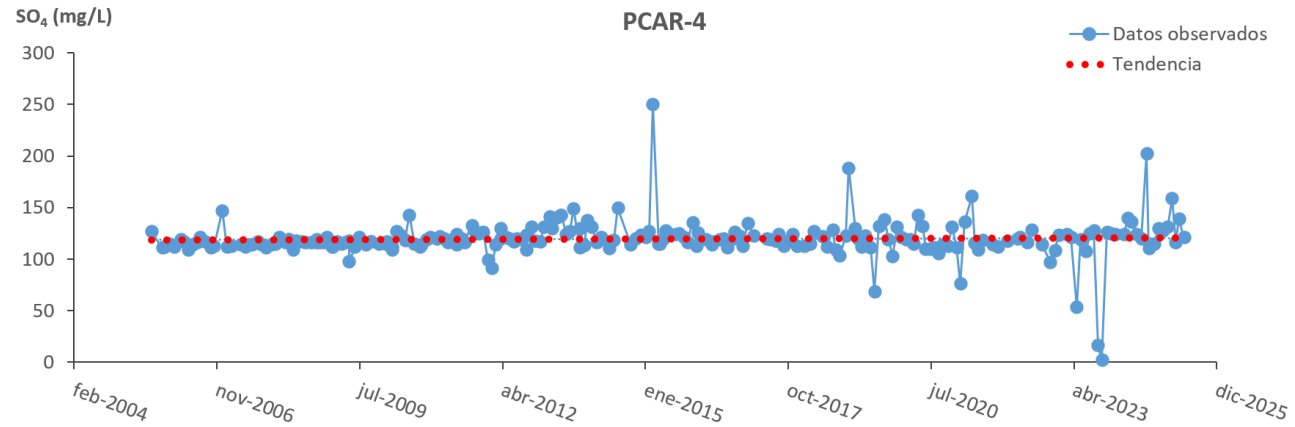
Fuente: Elaboración propia en base a Flow (2026)

Figura 5: Concentración histórica de sulfato en el pozo POBS-01P del PAT. EBI de datos es ≤ a 10%



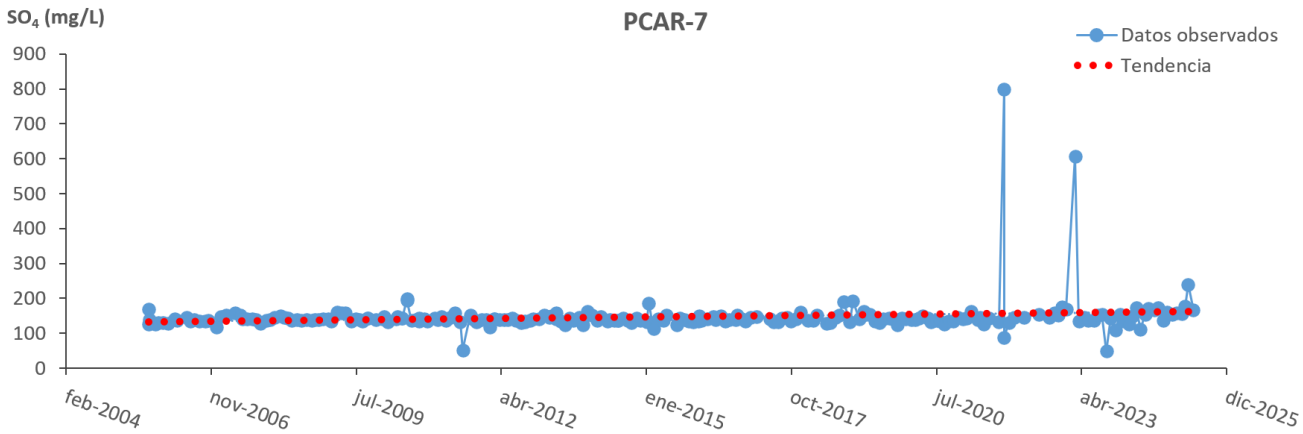
Fuente: Elaboración propia en base a Flow (2026)

Figura 6: Concentración de sulfato histórica en pozo PCAR-3 del PAT. EBI de datos es ≤ a 10%



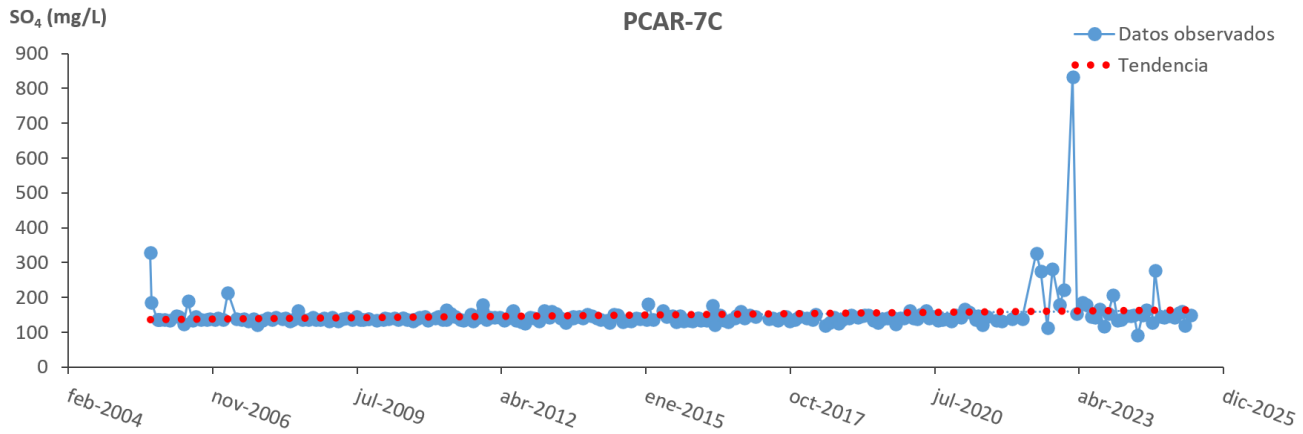
Fuente: Elaboración propia en base a Flow (2026)

Figura 7: Concentración de sulfato histórica en pozo PCAR-4 del PAT. EBI de datos es ≤ a 10%



Fuente: Elaboración propia en base a Flow (2026)

Figura 8: Concentración de sulfato histórica en pozo PCAR-7 del PAT. EBI de datos es ≤ a 10%



Fuente: Elaboración propia en base a Flow (2026)

Figura 9: Concentración de sulfato histórica en pozo PCAR-7C del PAT. EBI de datos es ≤ a 10%

Para los pozos PC-2B, POBS-01P, PCAR-4, PCAR-7 y PCAR-7C se establece un umbral intermedio de 250 mg/L y un umbral límite de 500 mg/L de sulfato. Como se ha mencionado, este último valor se adopta como referencia operativa del PAT, considerando la NCh409/1.Of. 2005. El diseño busca detectar cambios y actuar antes de que el avance de la pluma comprometa el objeto de protección.

Para el pozo PCAR-3 se establece un umbral intermedio de 450 mg/L y un umbral límite de 700 mg/L de sulfato. La serie histórica presenta una media cercana a 340 mg/L, superior a la de los demás pozos del PAT, por lo que el nivel intermedio general de 250 mg/L produciría una condición de alerta innecesaria, asociada a la concentración de fondo (natural) en el punto. Los valores específicos que se definieron permiten diferenciar su condición histórica de un incremento persistente, en proporción a los umbrales basados en las normas chilenas para los otros pozos. El límite de 700 mg/L corresponde a un criterio particular de este punto de control y se evalúa junto con la evolución de los demás pozos y la eficacia de las medidas.

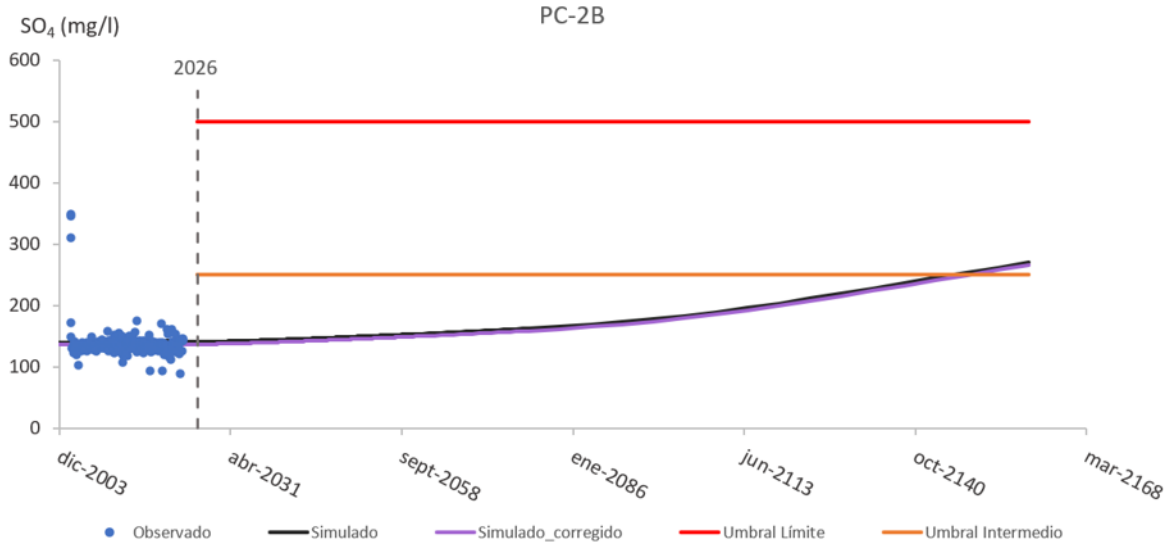
La activación de la barrera hidráulica requiere que al menos uno de los seis pozos presente una superación persistente de su umbral durante tres meses consecutivos, de manera que esas 3 mediciones permitan confirmar que se está frente a una tendencia persistente de eventuales desviaciones y no frente a eventos puntuales no representativos de la situación del sistema. El criterio se aplica tanto al nivel umbral intermedio como al límite y se evalúa con resultados de EBI válidos (menores o iguales a 10%). El aumento de la frecuencia de muestreo no reemplaza este plazo por tres mediciones consecutivas. La revisión de resultados aislados y su validación se realiza conforme al procedimiento de control de calidad de la sección 4.1.

4.3.1 PC-2B

Para PC-2B se establece un umbral intermedio de 250 mg/L y un límite de 500 mg/L de sulfato (Figura 10). La selección considera:

La serie histórica, con concentraciones cercanas a 150 mg/L y sin una tendencia creciente sostenida.

1. Pronostico del modelo de flujo y transporte empleado en la evaluación ambiental es coherente con los datos y prevé un aumento de la concentración en el tiempo, que alcanza levemente el umbral intermedio durante el proyecto hacia el final del horizonte de simulación.
2. La adopción de 250 mg/L como nivel de alerta estandarizado, con referencia en la NCh1333 y por debajo del umbral límite de 500 mg/L.
3. Las proyecciones son antecedentes para evaluar la evolución de las concentraciones. La activación de las acciones dependerá de los resultados de monitoreo y de su persistencia, conforme a la sección 4.4.



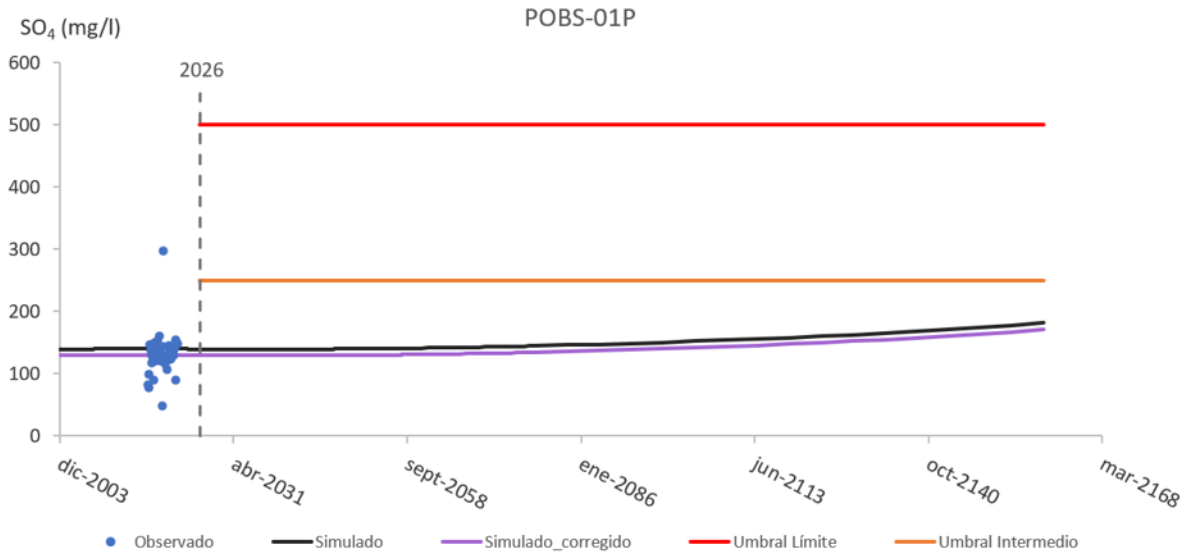
Fuente: Elaboración propia

Figura 10: Series de sulfato en PC-2B y umbrales operativos del PAT

4.3.2 POBS-01P

Para POBS-01P se establece un umbral intermedio de 250 mg/L y un límite de 500 mg/L de sulfato (Figura 11). La selección considera:

1. La serie histórica, con concentraciones cercanas a 130 mg/L y una leve tendencia global al ascenso.
2. Pronostico del modelo de flujo y transporte empleado en la evaluación ambiental es coherente con los datos y prevé un aumento de la concentración en el tiempo, sin alcanzar umbral intermedio durante todo el horizonte de simulación.
3. La adopción de 250 mg/L como nivel de alerta estandarizado, con referencia en la NCh1333 y por debajo del umbral límite de 500 mg/L.



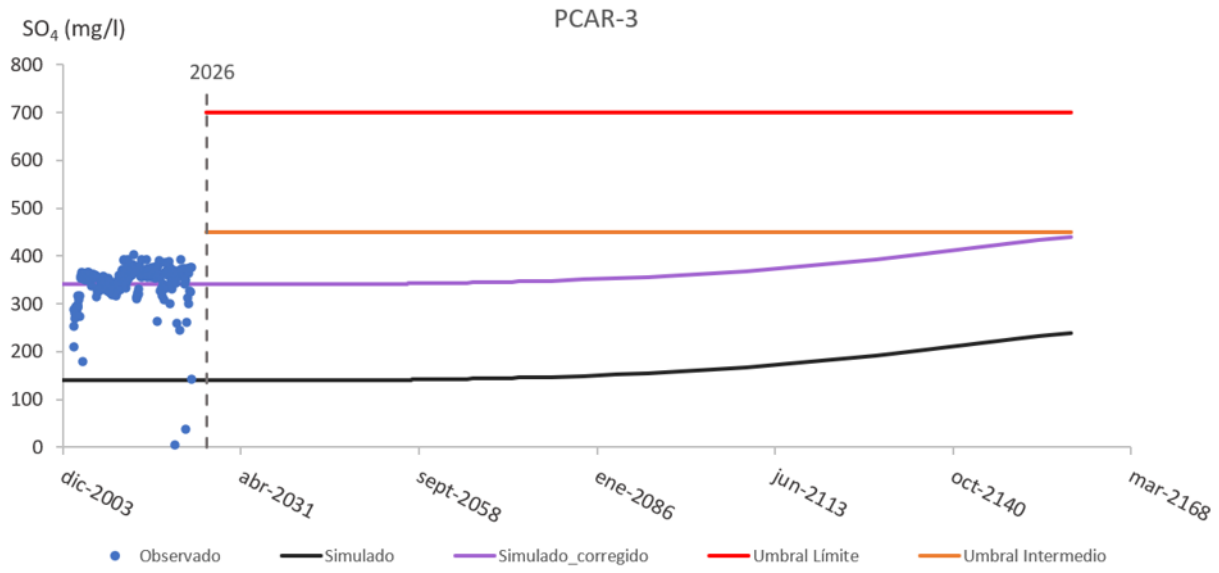
Fuente: Elaboración propia

Figura 11: Series de sulfato en POBS-01P y umbrales operativos del PAT

4.3.3 PCAR-3

Para PCAR-3 se establece un umbral intermedio de 450 mg/L y un límite de 700 mg/L de sulfato (Figura 12). La selección considera:

1. La serie histórica, con una media cercana a 340 mg/L, superior a la de los demás pozos de la red.
2. Pronostico del modelo de flujo y transporte empleado en la evaluación ambiental, ajustado a los datos observados, prevé un aumento de la concentración en el tiempo, sin alcanzar umbral intermedio durante todo el horizonte de simulación.
3. La adopción de un nivel intermedio específico de 450 mg/L para reconocer incrementos persistentes respecto de su condición de fondo, antes de alcanzar el límite de 700 mg/L.



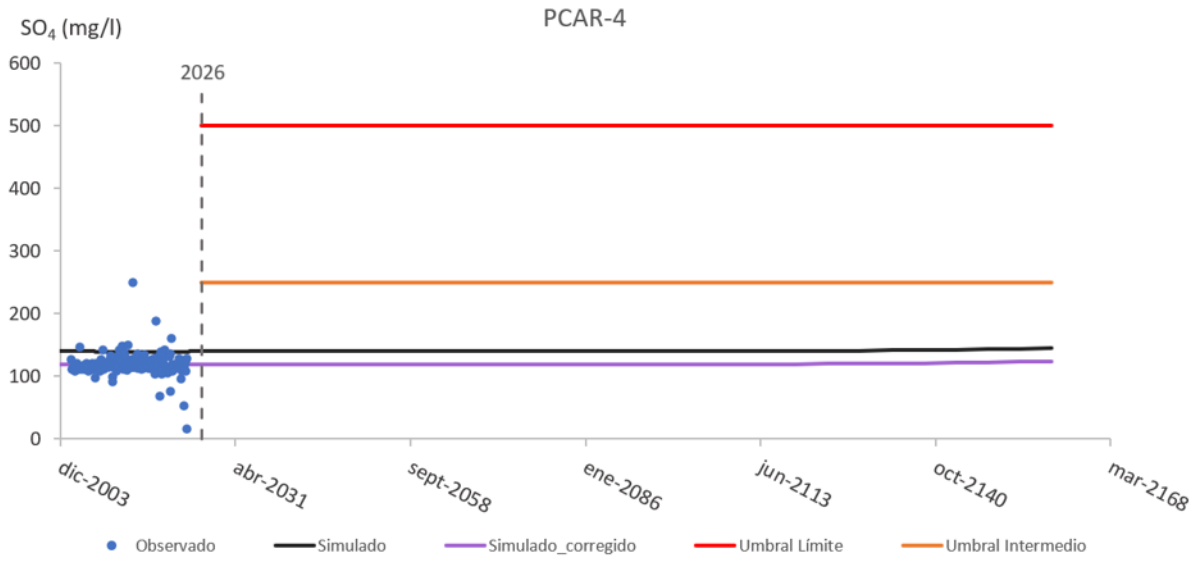
Fuente: Elaboración propia

Figura 12: Series de sulfato en PCAR-3 y umbrales operativos del PAT

4.3.4 PCAR-4

Para PCAR-4 se establece un umbral intermedio de 250 mg/L y un límite de 500 mg/L de sulfato (Figura 13). La selección considera:

1. La serie histórica, con concentraciones cercanas a 120 mg/L y variaciones acotadas respecto de su media.
2. Pronostico del modelo de flujo y transporte empleado en la evaluación ambiental, ajustado a los datos observados, prevé un leve aumento de la concentración en el tiempo, sin alcanzar umbral intermedio durante todo el horizonte de simulación.
3. La adopción de 250 mg/L como nivel de alerta estandarizado, con referencia en la NCh1333 y por debajo del umbral límite de 500 mg/L.



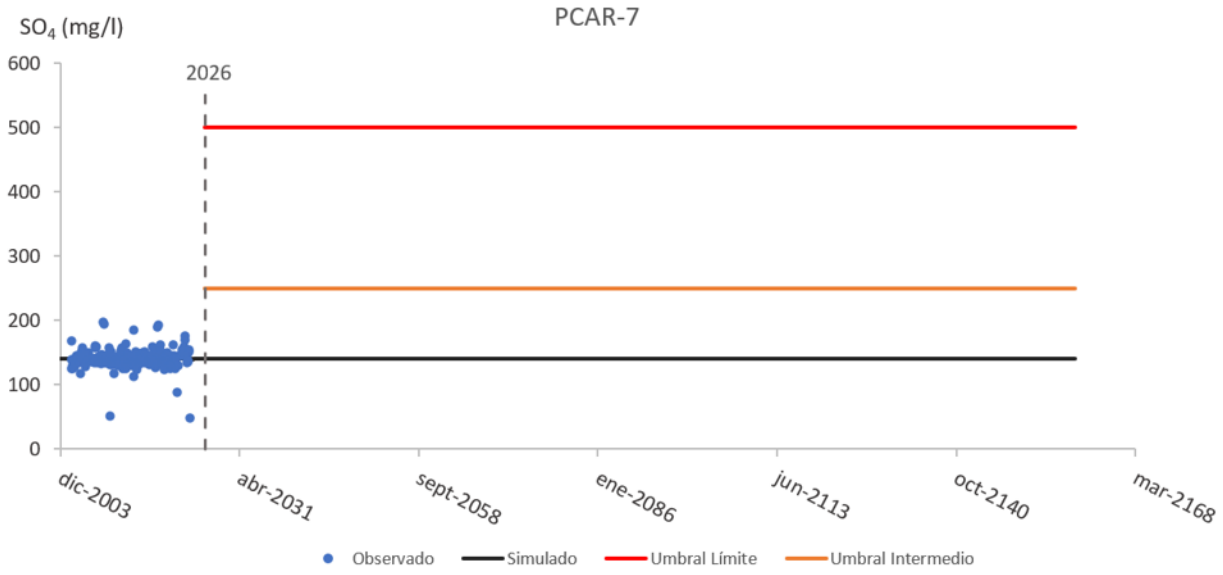
Fuente: Elaboración propia

Figura 13: Series de sulfato en PCAR-4 y umbrales operativos del PAT

4.3.5 PCAR-7

Para PCAR-7 se establece un umbral intermedio de 250 mg/L y un límite de 500 mg/L de sulfato (Figura 14). La selección considera:

1. La serie histórica, con concentraciones cercanas a 150 mg/L, y una simulación que mantiene valores próximos a la media observada.
2. Pronostico del modelo de flujo y transporte empleado en la evaluación ambiental no prevé un aumento de la concentración en el tiempo. No se alcanzaría el umbral intermedio durante todo el horizonte de simulación.
3. La adopción de 250 mg/L como nivel de alerta estandarizado, con referencia en la NCh1333 y por debajo del umbral límite de 500 mg/L.



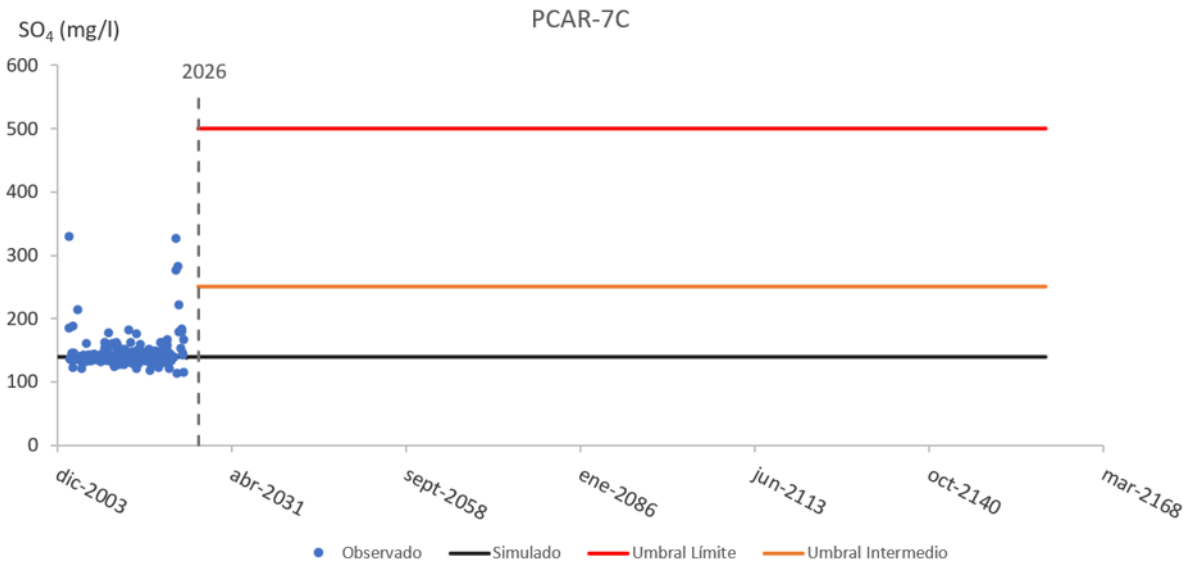
Fuente: Elaboración propia

Figura 14: Series de sulfato en PCAR-7 y umbrales operativos del PAT

4.3.6 PCAR-7C

Para PCAR-7C se establece un umbral intermedio de 250 mg/L y un límite de 500 mg/L de sulfato (Figura 15). La selección considera:

1. La serie histórica de sulfato en el acuífero superior y una simulación que mantiene valores próximos a la media observada.
2. Pronostico del modelo de flujo y transporte empleado en la evaluación ambiental no prevé un aumento de la concentración en el tiempo. No se alcanzaría el umbral intermedio durante todo el horizonte de simulación.
3. La adopción de 250 mg/L como nivel de alerta estandarizado, con referencia en la NCh1333 y por debajo del umbral límite de 500 mg/L.



Fuente: Elaboración propia

Figura 15: Series de sulfato en PCAR-7C y umbrales operativos del PAT

4.4 Acciones

El plan contempla seguimiento basal, alerta intermedia y respuesta ante el umbral límite. La superación persistente en cualquiera de los seis pozos activa las acciones del nivel correspondiente. La actualización de los modelos y el análisis de causalidad acompañan la respuesta y permiten revisar las desviaciones respecto de los pronósticos.

- Umbral intermedio: cuando al menos un pozo supere su valor intermedio durante tres meses consecutivos se aplicarán las siguientes acciones:

1. Informar a la SMA y la DGA dentro de los 30 días corridos siguientes a la condición de activación, una vez por evento y por pozo. El aviso identificará el punto, los resultados que sustentan la superación según el reporte oficial de la ETFA y las acciones iniciadas.
2. Aumentar la frecuencia de monitoreo de mensual a quincenal.
3. Iniciar la actualización de los modelos hidrogeológicos conceptual y numérico para analizar la causalidad y la desviación respecto del pronóstico. Los resultados se reportarán a la SMA y la DGA en un plazo de doce meses contado desde la activación del nivel intermedio.

- Umbral límite: cuando al menos un pozo supere su valor límite durante tres meses consecutivos se aplicarán las siguientes acciones, incluso si la superación ocurre directamente desde el seguimiento basal:

    1. Informar a la SMA y la DGA dentro de los 30 días corridos siguientes a la condición de activación, una vez por evento y por pozo.
    2. Aumentar la frecuencia de monitoreo a semanal.
    3. Activar la barrera hidráulica, obra del proyecto destinada a controlar el avance de la pluma de sulfato hacia el objeto de protección.

        La barrera considera cuatro pozos construidos (pozos BRT-1 a BRT-4, Tabla 3), destinados a ser instrumentados y operados. La configuración de referencia dispone a los pozos BRT-1 y BRT-2 para bombeo y a los pozos BRT-3 y BRT-4 para inyección, con un caudal de diseño de 15 L/s por pozo. En suma, los caudales totales son de 30 L/s de bombeo y 30 L/s de inyección.

        Los pozos de bombeo tienen por objetivo recuperar aguas subterráneas con una proporción elevada de aguas de proceso, provenientes de las infiltraciones históricas desde los botaderos de ripios, evitando y conteniendo el avance de la pluma. La extracción de agua se gestionará conforme a la Circular DGA N°3 de 2018, en lo que resulte aplicable. En ese sentido, la fracción de aguas naturales interceptada con el bombeo se respaldará con los derechos de aprovechamiento que correspondan (DGA, 2018).

Tabla 3: Pozos existentes de la configuración de referencia de la barrera hidráulica

Pozo	Tipo	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	Prof. (m)	Tramo habilitación (m)	UH de monitoreo
BRT-1	Bombeo	517.994	7.546.672	230	176-218; 224-230	UH-5
BRT-2	Bombeo	518.152	7.546.714	237	177-237	UH-5
BRT-3	Inyección	519.312	7.546.176	200	134-182; 188-200	UH-5
BRT-4	Inyección	519.353	7.546.503	200	146-182; 188-200	UH-5

Fuente: Elaboración propia

Buscando una mayor eficiencia en el manejo de aguas de proceso, se propone que la ubicación definitiva de los puntos de bombeo e inyección, como alternativa a los puntos actuales, sea dentro del polígono que se presenta en la Figura 16, siguiendo un diseño guiado por criterios hidrogeológico y en conformidad con las autorizaciones aplicables. Las coordenadas del polígono de referencia se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Coordenadas del polígono de bombeo propuesto

Vértice	UTM Este (m)	UTM Norte (m)
1	517.833	7.547.132
2	522.800	7.546.257
3	524.681	7.544.799
4	523.495	7.543.667
5	522.324	7.545.037
6	517.470	7.545.728
7	517.833	7.547.132

La delimitación del polígono consideró los siguientes criterios:

i. Se relaciona con el mapeo en superficie de los depósitos sedimentarios de mayor permeabilidad de la UH-5, por los que se mueve la pluma de aguas de proceso.

ii. Abarca la mayor parte del área en que se ha identificado la propagación de las infiltraciones, según ha sido interpretado a diciembre de 2025.

iii. Incorpora los puntos construidos de la barrera actual (BRT-1 a BRT-4).

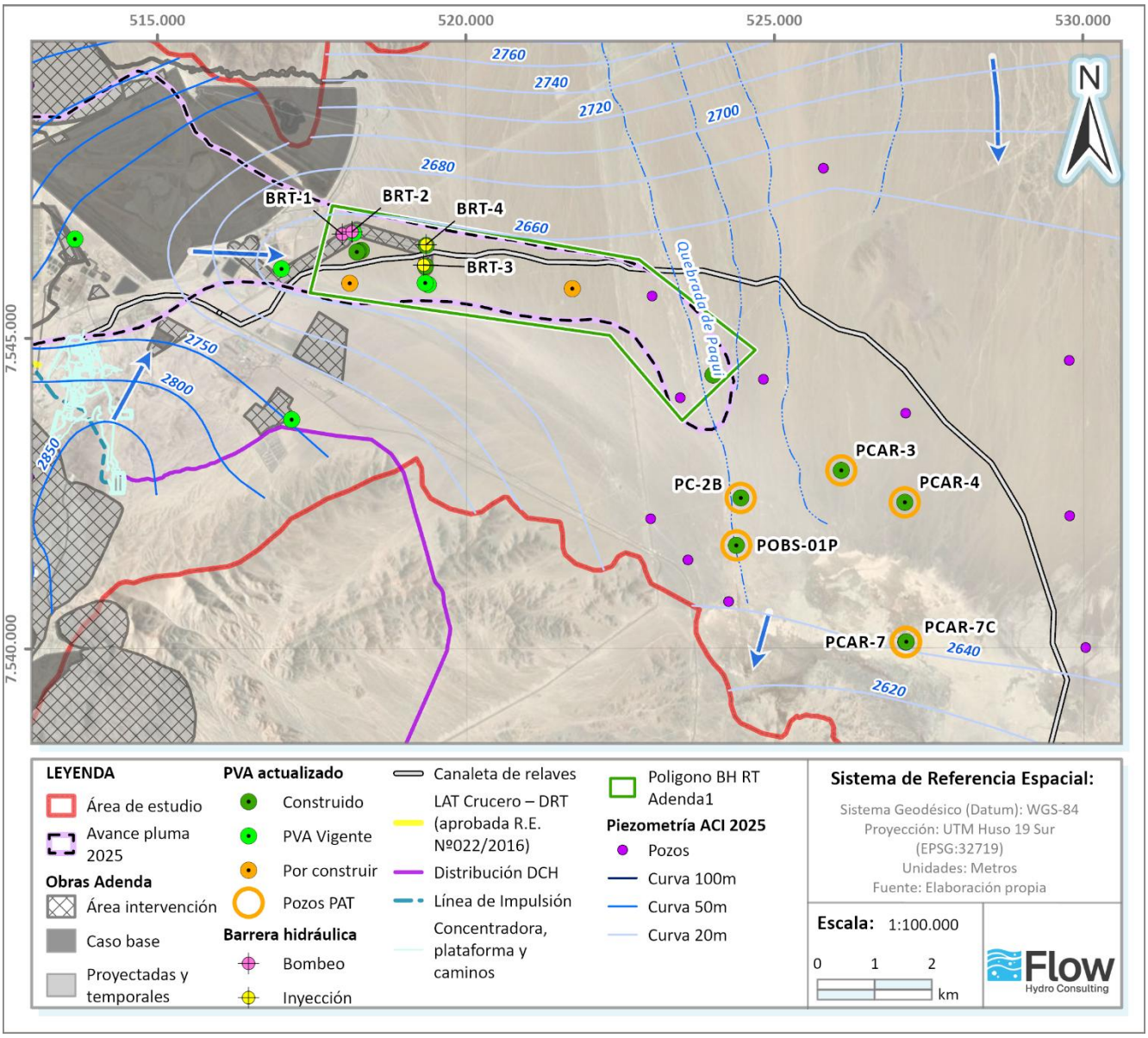
iv. Su extensión aguas abajo permite evaluar posiciones alternativas de control, eventualmente más eficientes que la aquí propuesta.

v. Su límite este se mantiene aguas arriba de los pozos del PAT, para favorecer la recuperación de aguas con mayor componente de proceso y reducir la captación de aguas de mejor calidad situadas por delante del frente de pluma.

El agua destinada a la recarga artificial provendrá preferentemente de la planta desaladora de Codelco. Como alternativas se consideran aguas adquiridas a terceros que cuenten con las autorizaciones pertinentes y aguas asociadas a derechos de aprovechamiento de los que Codelco sea titular, siempre que su uso sea compatible con la calidad del medio receptor y con la implementación y operación de los pozos de inyección. Estas fuentes se consideran exclusivamente para la recarga artificial del acuífero en los términos presentados en el PAS 158. Su inclusión entre las alternativas de recarga no las incorpora como fuentes de abastecimiento de agua industrial para la operación minera normal del Proyecto. Para el diseño de la barrera se considera una concentración de sulfato del orden de 200 mg/L o inferior en el agua de inyección, sujeta a la caracterización y a los requisitos de calidad aplicables.

La calidad de cada fuente de agua de inyección se acreditará en los antecedentes del PAS 158 y en los permisos que correspondan, mediante su composición fisicoquímica y la caracterización del acuífero receptor. La selección de la fuente y el diseño de las obras de recarga considerarán las instrucciones de la DGA para recarga artificial (DGA, 2025) y las exigencias que resulten aplicables conforme al D.S. N°46/2002. La concentración de sulfato considerada en el diseño se evaluará junto con los demás parámetros de calidad del agua.

4. Actualizar los modelos hidrogeológicos y simular la medida implementada, considerando los caudales y la calidad del agua de inyección y los resultados del seguimiento. Si la barrera opera por más de un año continuo, los modelos se actualizarán anualmente para evaluar su eficacia y las desviaciones respecto de lo previsto.
5. Cuando se alcance directamente el umbral límite desde el seguimiento basal, se efectuará el análisis de causalidad y de desviación del pronóstico, junto con las demás acciones de respuesta.
6. Entregar a la SMA y la DGA un informe de efectividad en el mes 14 contado desde el inicio efectivo de operación de la barrera hidráulica. El informe evaluará el primer año de operación, con datos de los 12 meses, considerando los resultados de sulfato y niveles del PVA, los caudales de bombeo e inyección y su comparación con la respuesta simulada, con atención al Salar de Cere. Si la barrera se desactiva antes de completar ese año por cumplimiento de los criterios de recuperación, el informe mantendrá el plazo de entrega y analizará el periodo efectivamente operado y el seguimiento posterior disponible.



Fuente: Elaboración propia

Figura 16: Ubicación de Barrera Hidráulica

Para la implementación y puesta en marcha de la barrera hidráulica de la DRT se considerará una serie de aspectos de tipo técnico y de tipo administrativo, dentro de los cuales se pueden listar:

- Exploración hidrogeológica para la determinación de los puntos más propicios para lograr un bombeo e inyección eficiente.
- Perforación, habilitación y desarrollo de pozos de bombeo e inyección.

- Realización de ensayos hidráulicos de larga duración para determinar los caudales óptimos, descensos y ascensos en los niveles del acuífero, eficiencia de los pozos e interferencias entre estos.
- Gestión de permisos asociados a la aplicación de la Circular N°3 DGA 2018 (metodología aprobada en el ORD. N°237 del 13 de junio de 2023).
- Resolución y otorgamiento de dichos permisos por parte de los organismos.
- Construcción de la red de tuberías que proveerán de agua de mejor calidad para la inyección y evacuará el agua contactada extraída desde el acuífero hacia las fuentes y receptáculos respectivos.
- Montaje de los equipos de bombeo, instrumentación y puesta en marcha secuencial del sistema a medida que se construyen los pozos.

Las actividades antes mencionadas, algunas de dependencia de Codelco y otras que dependen de la gestión con los organismos del Estado pertinentes, no son posibles de realizar en un período acotado de tiempo, dada su envergadura y complejidad.

Finalmente, la barrera hidráulica se desactivará cuando todos los pozos de la red PAT mantengan concentraciones inferiores a sus respectivos umbrales límite durante al menos tres meses consecutivos, previa evaluación técnica de la evolución observada. La desactivación se informará a la SMA y la DGA dentro de los 30 días corridos siguientes. Si persiste la condición intermedia, se mantendrá el monitoreo quincenal y su análisis asociado. El retorno al seguimiento mensual requerirá que todos los pozos se mantengan bajo sus umbrales intermedios durante al menos tres meses consecutivos, con evaluación técnica y comunicación a ambas autoridades. La frecuencia de muestreo no modifica estos plazos de recuperación.

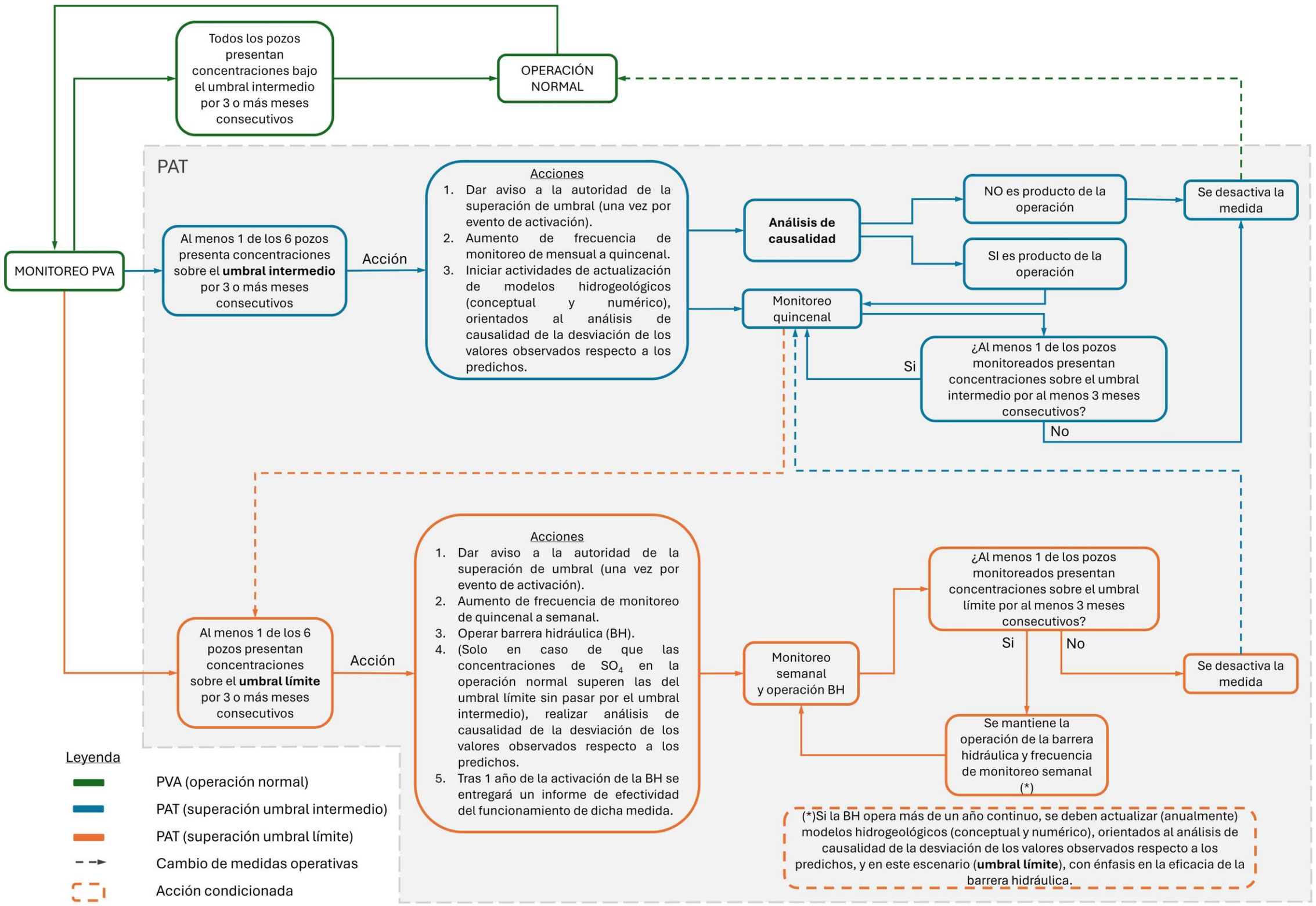
5 RESUMEN DE DISEÑO Y DIAGRAMA DE FLUJO

La Tabla 5 resume los umbrales y las principales acciones del PAT. Los valores son específicos de cada punto de control y se aplican con una condición de persistencia de tres meses consecutivos, conforme a la sección 4.4. La Figura 17 presenta el funcionamiento del plan y los criterios de recuperación.

Tabla 5: Umbrales de sulfato y acciones del PAT

Pozo	**Umbral intermedio (mg/L SO_4)**	**Umbral límite (mg/L SO_4)**
PC-2B	250	500
POBS-01P	250	500
PCAR-3	450	700
PCAR-4	250	500
PCAR-7	250	500
PCAR-7C	250	500
Acciones	• Informar a SMA y DGA en 30 días corridos, una vez por evento y pozo. • Aumentar el monitoreo a quincenal. • Actualizar los modelos y analizar causalidad y desviación del pronóstico. Reportar en doce meses desde la activación intermedia.	• Informar a la SMA y a la DGA en 30 días corridos, una vez por evento y pozo. • Aumentar el monitoreo a frecuencia semanal • Activar el funcionamiento de la barrera hidráulica. • Actualizar el modelo hidrogeológico y simular la medida implementada. • Actualizar anualmente los modelos si la barrera opera más de un año continuo. • Entregar el informe de efectividad en el mes 14 desde el inicio efectivo de operación, evaluando el primer año (12 meses de datos) o el periodo efectivamente operado. • Desactivar conforme a los criterios de recuperación e informar a la SMA y a la DGA. • Retornar al monitoreo mensual cuando se cumpla la recuperación bajo los umbrales intermedios.

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

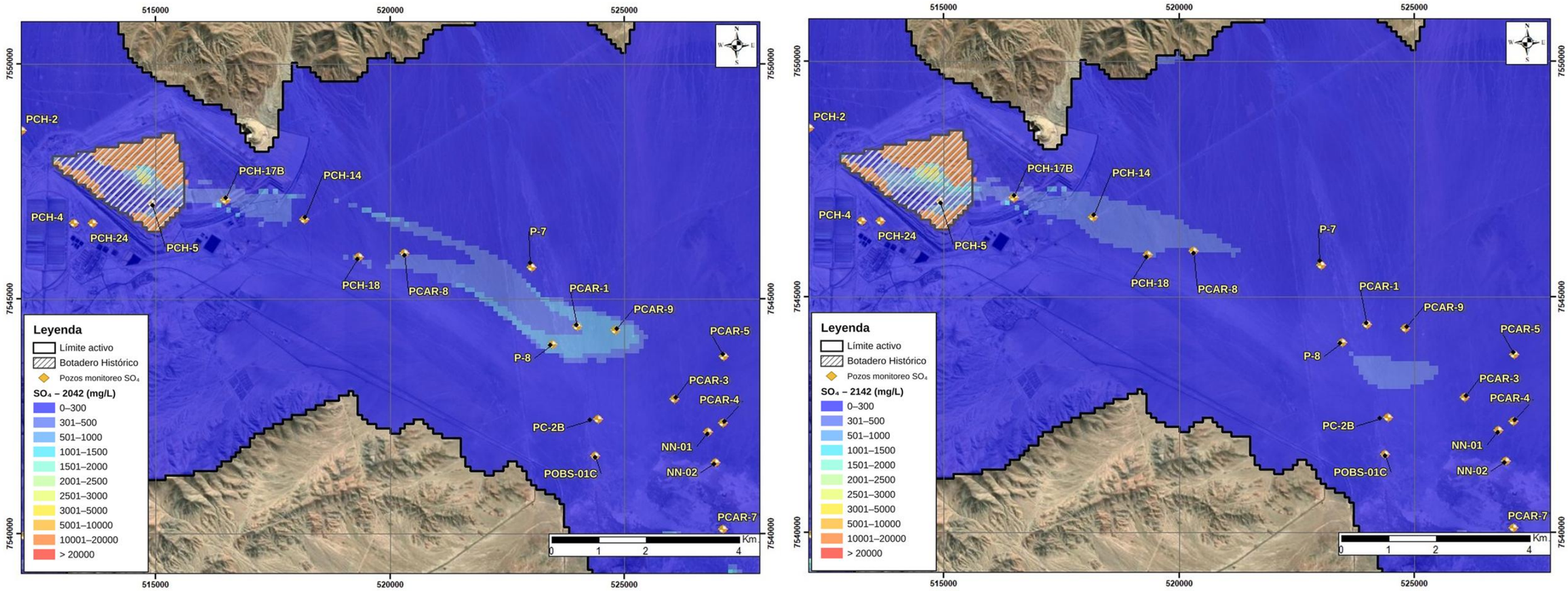
Figura 17: Funcionamiento del PAT y criterios de recuperación

5.1 Evaluación de la eficacia de la barrera hidráulica

La evaluación numérica de la configuración de referencia de la barrera hidráulica (pozos BRT-1 a BRT-4) consideró un escenario de operación durante 16 años, al término del cual se alcanzan concentraciones de sulfato del orden de 500 mg/L en el pozo PCAR-1. La Figura 18 reproduce la distribución espacial de las concentraciones de sulfato al término de ese periodo y, también, a los 100 años posteriores al cese del bombeo e inyección, donde se observa una atenuación de la pluma.

Estos resultados constituyen un antecedente de diseño y no fijan la fecha de activación ni una duración obligatoria de operación del PAT. La configuración definitiva dentro del polígono se verificará con los ensayos y los modelos descritos en las secciones precedentes de este documento.

La eficacia de la barrera hidráulica durante la operación se verificará mediante el monitoreo de sulfato y los niveles disponibles del PVA, en conjunto con la actualización de los modelos. El análisis contrastará la evolución observada con la respuesta prevista y evaluará el control de la migración de las aguas infiltradas en el sector industrial y el objetivo de evitar descensos en el Salar de Cere. La recuperación de las concentraciones y la desactivación se resolverán con los criterios de la sección 4.4.



a) Término de los 16 años de operación simulada de la barrera hidráulica.

b) Evolución simulada a los 100 años posteriores al cese de la barrera hidráulica.

Fuente: Elaboración propia

Figura 18: Evolución espacial del sulfato en el escenario de evaluación de la barrera hidráulica

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amphos. (2022). Servicio Hidrogeológico Estudio Depósito Relaves Talabre.

Flow (2026). Actualización Modelo Hidrogeológico División Radomiro Tomic 2025.

Flow (2024). Caracterización Hidroquímica de la Pluma y Potenciales Fuentes.

SEA (2022). Criterio De Evaluación en el SEIA: Contenidos Técnicos para la Evaluación Ambiental el Recurso Hídrico (http://www.sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2022/09/21/05_dt_recurso_hidrico.pdf)

Dirección General de Aguas (DGA) (2018). Circular N°3, de 18 de octubre de 2018. Imparte instrucciones sobre el procedimiento para constituir derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas en pozos de barreras hidráulicas asociadas a proyectos de disposición de residuos, estériles o desechos sanitarios.

Dirección General de Aguas (DGA) (2025). Circular N°2, de 31 de julio de 2025. Imparte instrucciones para la evaluación de proyectos de recarga artificial de acuíferos.

Instituto Nacional de Normalización (INN) (2005). NCh409/1.Of. 2005. Agua potable. Parte 1: Requisitos.

Instituto Nacional de Normalización (INN) (1987). NCh1333.Of. 78, modificada en 1987. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos.

Ministerio Secretaría General de la Presidencia (2002). Decreto Supremo N°46. Establece norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas. Publicado el 17 de enero de 2003.