ANEXO 1

INFORME ANUAL PLAN DE ALERTA TEMPRANA.

Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones
Tranque Ovejería

RCA 275-B/94 Modificada por Res. Exe. CE RMS N°204/2015

Informe Anual

PLAN DE ALERTA TEMPRANA

Periodo: AÑO 2023

CODELCO – DIVISIÓN ANDINA

Febrero de 2024

Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones
Tranque Ovejería
RCA 275-B/94 Modificada por Res. Exe. CE RMS N°204/2015

Informe Anual
PLAN DE ALERTA TEMPRANA

INDICE

1 RESUMEN 1

2 INTRODUCCIÓN 3

3 OBJETIVOS 5

4 DESCRIPCIÓN DE OBRAS PLAN DE ACCIONES DE CONTROL DE INFILTRACIONES. 5

4.1 Medidas de Control Global 7

4.1.1 Robustecimiento de la Barrera Hidráulica (1ª y 2ª línea de captura). 7

4.1.2 Pozos de inyección de buena calidad. 7

4.2 Medidas de Control Focalizado 8

4.2.1 Pozos de Bombeo Focalizado. 8

4.2.2 Pozos de Inyección Focalizada de Aguas Frescas de Buena Calidad 9

4.3 Fuente de aguas de buena calidad 10

4.3.1 Aguas subterráneas provenientes del valle central del acuífero Chacabuco Polpaico. 10

4.3.2 Agua tratada Planta de Osmosis Inversa (POI) 11

4.4 Caudales de bombeo y de inyección 11

5 MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DEL ACUÍFERO 13

5.1 MATERIALES Y MÉTODOS 13

5.1.1 Descripción del área de estudio 13

5.1.2 Puntos de muestreo 14

5.1.3 Parámetros utilizados para caracterizar el estado y evolución de las variables ambientales 18

5.1.4 Metodología de muestreo, medición, análisis y/o control 18

5.1.5 Fechas de muestreo 20

5.2 RESULTADOS 22

5.2.1 Cotejo y control de datos 25

5.2.2 Predicción de Impactos y Medidas de Corrección 26

5.2.3 Discusión 28

6 MEDIDAS DE CORRECCIÓN. 30

7 REVISIÓN Y ACTUALIZACIÓN PERIÓDICA DEL PAT 30

1) Cotejo y control de la calidad de los datos derivados del Monitoreo del comportamiento del acuífero y áreas sensibles. 30

2) Análisis cualitativo de la respuesta observada en los niveles de concentración de sulfatos en el agua. 30

3) Simulación numérica del comportamiento del acuífero hasta el momento de la revisión. . 31

4) Comparación y evaluación de la respuesta observada y simulada del acuífero. 32

5) Evaluación de la existencia de desviaciones significativas entre las respuestas observadas y simuladas. 39

6) Investigaciones de los posibles refinamientos del modelo numérico y la revisión de los impactos estimados 39

8 CONCLUSIONES 41

9 REFERENCIAS 43

ANEXOS

ANEXO 1: Participantes de las actividades de muestreo, análisis de laboratorio y elaboración de informe.

ANEXO 2: Acreditaciones del personal de muestreo y de laboratorios de análisis hidroquímicos.

ANEXO 3: Informes de Análisis Hidroquímicos y Cadenas de Custodia.

ANEXO 4: Concentraciones de sulfatos pozos APR asociados al Plan de Alerta Temprana.

ANEXO 5: Caudales de extracción y de inyección de aguas frescas.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 6 Res. Exe. CE RMS N°204/2015 Síntesis de las medidas PAT y condiciones de activación..... .4

Tabla 4.1: Pozos de Robustecimiento construidos..... 7
Tabla 4.2: Pozos de Inyección construidos (PIN)..... 8
Tabla 4.3: Pozos de Bombeo Focalizado (PBF). 9
Tabla 4.4: Pozos de Inyección Focalizada (PIF)..... 9
Tabla 4.5: Pozos fuente de aguas de buena calidad..... 10
Tabla 4.6: Caudales medios mensuales pozos de extracción. 11
Tabla 4.7: Caudales medios mensuales pozos de inyección. 12
Tabla 5.1: Pozos PAT para el control de aguas subterráneas monitoreados y APR asociado. 15
Tabla 5.2: Metodología y profundidades de muestreo 20
Tabla 5.3: Fechas de monitoreo 21
Tabla 5.4: Resultados del muestreo de pozos de control PAT. Año 2023. 23
Tabla 5.5: Percentiles P50 de 6 meses consecutivos y umbrales de la concentración de sulfatos. 27
Tabla 7.1: Valores de concentración de sulfatos observados y simulados (Sim05), pozos de control PAT..... 38
Tabla 7.2: Cálculo de la diferencia entre concentraciones observadas y simuladas, expresada como porcentaje de la variación máxima observada registrada en el pozo. 39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1: Disposición de obras principales construidas Plan de Acciones de Control de Infiltraciones. 6
Figura 5.1: Ubicación Tranque Ovejería. 13
Figura 5.2: Ubicación de Pozos de Control PAT. APR Huechún..... 16
Figura 5.3: Ubicación Pozos PAT. APRs Santa Matilde y Punta Peuco. 17
Figura 5.4: Relación conductividad específica versus concentración de sulfatos y conductividad específica versus sólidos disueltos totales. 25
Figura 7.1: Evolución observada y pronosticada de concentración de sulfatos. Pozo G-02. 33
Figura 7.2: Evolución observada y pronosticada de concentración de sulfatos. Pozo G-03. 33
Figura 7.3: Evolución observada y pronosticada de concentración de sulfatos. Pozo G-05. 34
Figura 7.4: Evolución observada y pronosticada de concentración de sulfatos. Pozo G-11. 34
Figura 7.5: Evolución observada y pronosticada de concentración de sulfatos. Pozo G-12. 35
Figura 7.6: Evolución observada y pronosticada de concentración de sulfatos. Pozo PB-3. 35
Figura 7.7: Evolución observada y pronosticada de concentración de sulfatos. Pozo PES-01. 36
Figura 7.8: Evolución observada y pronosticada de concentración de sulfatos. Pozo PES-02. 36
Figura 7.9: Evolución observada y pronosticada de concentración de sulfatos. Pozo PES-03. 37
Figura 7.10: Evolución observada y pronosticada de concentración de sulfatos. Pozo PES-04. 37

1 RESUMEN

En cumplimiento de la Resolución Exenta N°204/2015 de fecha 08 de mayo de 2015, en adelante Res. Exe. CE RMS N°204/2015, que modifica la RCA 275-B/94 de fecha 04 de marzo de 1994 la cual calificó ambientalmente favorable el Proyecto "Sistema de Disposición de Relaves a Largo Plazo-Proyecto Embalse Ovejería"; se presentan los resultados del año 2023 del Plan de Alerta Temprana (PAT) establecido en su considerando 11.3, el cual se encuentra asociado al seguimiento de los efectos de las medidas de control establecidas en el Plan de Acciones de Control de Infiltraciones descrito en el considerando 11.1.

El presente Informe Anual incluye los datos obtenidos entre *enero y diciembre de 2023*, habiéndose dado inicio al monitoreo asociado a la Res. Exe. CE RMS N°204/2015 el 01 de julio de 2015 según su considerando 11.2.9.

Los puntos de muestreo comprometidos corresponden a los pozos PAT para el control de aguas subterráneas indicados en la Tabla N°4 de la Res. Exe. CE RMS N°204/2015. Cabe señalar, y tal como lo indica la Tabla N°3 de la misma resolución, que de la totalidad de los 10 pozos establecidos, 4 de ellos fueron individualizados con coordenadas preliminares y profundidades proyectadas, los cuales ya se encuentran construidos y se encuentran siendo monitoreados.

Los límites a considerar para la implementación de medidas establecidas en este PAT están referidos al cálculo de percentiles P50 de 6 meses consecutivos - en adelante P50% 6M -, de la concentración de sulfatos en los pozos de control PAT, tal como lo establece la Res. Exe. CE RMS N°204/2015.

Las obras asociadas a las medidas establecidas en la Res. Exe. CE RMS N°204/2015 han sido construidas, desarrollándose pruebas hidráulicas y operadas normalmente a partir de septiembre de 2015, de modo que han operado con un desfase importante respecto de lo proyectado antes de la Res. Exe. CE RMS N°204/2015 propiamente tal, considerando los tiempos asociados a la dictación de dicha resolución y a la tramitación de los permisos necesarios.

Para al cierre del año 2023 se han obtenido resultados favorables tanto en los pozos de control asociados al PAT del APR Huechún como en los pozos de control asociados al PAT de los APRs Santa Matilde y Punta Peuco, con valores de percentiles P50 de 6 meses consecutivos bajo los umbrales establecidos para el año 2023.

Cabe señalar que en períodos anteriores, algunos pozos de control activaron medidas de control PAT, los cuales actualmente reflejan efecto favorable producto de las medidas implementadas para su control, así los pozos de control G-11 - ubicado al sur poniente de la barrera hidráulica -, PES-03 - ubicado al surponiente del tranque de relaves- y G-12 ubicado inmediatamente aguas debajo de la barrera hidráulica, el percentil 50% de 6 meses consecutivos ha superado el umbral anual proyectado en períodos anteriores, y a consecuencia de ello, en informes anuales previos se propuso un conjunto de medidas adicionales comprometidas en el PAT buscando una mejora en la concentración de sulfatos. Esta mejora se ha verificado corrigiendo las desviaciones; manteniéndose la condición controlada desde entonces y sin activación PAT durante el año 2023 materia del presente reporte.

Recientemente el pozo de control PB-3 presentó un leve aumento puntual en noviembre de 2023, superior al umbral establecido para el percentil 50% de 6 meses consecutivos 230 mg/l, no obstante la desviación fue controlada en forma oportuna no generando activación de PAT.

Respecto de los resultados de este período en pozos APR, los datos de monitoreo permiten verificar que tanto en el APR Huechún[1] como en los APR Santa Matilde[1], las concentraciones de los respectivos percentiles 50% de los últimos 12 meses consecutivos[2] se mantienen bajo el valor basal determinado en 119 mg/l de concentración de sulfatos.

Cabe indicar que, respecto a los APR, durante el año 2023 los pozos APR Huechún, APR Punta Peuco y APR Santa Matilde han estado fuera de operación, lo cual ha imposibilitado su muestreo, siendo los APR abastecidos por pozos de reemplazo. Por esta razón, Codelco Andina ha optado por monitorear el agua proveniente de dichos pozos de abastecimiento actual.

En el caso del APR Punta Peuco, que desde septiembre de 2018 había mantenido valores sobre el límite anteriormente indicado, durante el primer semestre de este período se verificó por primera vez desde entonces un valor de percentil 50% de los últimos 12 meses consecutivos fue inferior a 119 mg/l, registrándose un valor de 113 mg/l. Durante el segundo semestre de este año, si bien se verificaron concentraciones de sulfato mayores a 119 mg/l entre julio y noviembre de 2023, el percentil se ha mantenido bajo el límite establecido. Por esta razón, y en espera de la estabilización de los niveles de sulfato en el largo plazo, se mantiene la medida prevista en la Res. Exe. RMS N° 204 en su considerando 11.1.3 Medida Adicional: Tratamiento de Agua en Sistemas de Agua Potable Rural.

[1] O sus correspondientes pozos de abastecimiento actual.

[2] De acuerdo con el considerando 11.1.3 de la Res. Exe. CE RMS 204/2015, el seguimiento en estos pozos APR se realiza con base en el percentil 50% de sulfatos 12 meses consecutivos, de la concentración de sulfatos registrada en el agua alumbrada en el respectivo pozo haya superado 119 mg/l correspondiente al percentil 90% para la concentración de sulfatos estimada para la zona media del acuífero Chacabuco-Polpaico, y muestre una tendencia sostenida al alza.

2 INTRODUCCIÓN

El presente texto corresponde al *Informe Anual del año 2023* del Plan de Alerta Temprana (PAT) del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones (PSyCI) del Tranque Ovejería; referido a la componente ambiental aguas subterráneas a través de la calidad del agua, variable ambiental asociada que las caracteriza y es objeto de su seguimiento.

Este Informe Anual PAT ha sido establecido en conjunto con Informes Trimestrales e Informes Semestrales, en el considerando 11.3 de la Res. Exe. CE RMS N°204/2015 de fecha 08 de mayo de 2015 que resuelve el proceso de revisión de la Resolución de Calificación Ambiental N° 275-B/1994 del Proyecto "Sistema de Disposición de Relaves a Largo Plazo: Proyecto Embalse Ovejería".

En dicho considerando 11.3 de la Res. Exe. CE RMS N°204/2015 se indica lo siguiente:

> ***11.3 Plan de Alerta Temprana:***
>
> *El Plan de Alerta Temprana (PAT), constituye el conjunto de acciones y medidas que tienen por objetivo verificar si se están respetando los estándares normativos y condiciones a las que se comprometió el titular, para, en caso de desviaciones, implementar oportunamente las medidas de corrección que permitan cautelar dicho objetivo.*
>
> *El PAT consta de tres fases, a saber:*
>
> - *Monitoreo del comportamiento del acuífero y áreas sensibles.*
> - *Predicción de impactos y medidas de corrección.*
> - *Revisión y actualización periódica del PAT.*

Dichas fases se encuentran desarrolladas en la Res. Exe. CE RMS N°204/2015. En particular, el Informe Anual materia del presente documento, ha quedado establecido en el considerando 11.3.1.1 según lo siguiente:

> ***Informes Anuales:*** *Durante el mes de Febrero de cada año se remitirá un informe con toda la información obtenida durante el año anterior, procesada y analizada adecuadamente. Este informe anual contendrá tablas y gráficos adecuados para analizar el comportamiento de las variables controladas, fotografías, caudales de extracción, caudales de inyección, entre otros antecedentes que sean pertinentes.*

Las medidas correctivas y los pozos de seguimiento que las activan para las diferentes zonas, han sido descritas en la Res. Exe. CE RMS N°204/2015 y se han sintetizado en la Tabla N°6 de dicha resolución, la que se presenta en la página siguiente.

Tabla N° 6 Res. Exe. CE RMS N°204/2015
Síntesis de las medidas PAT y condiciones de activación

Objeto de Protección	***Pozos de control***	***Umbral***	***Medidas***	***Plazo de activación***
APRs Santa Matilde y Punta Peuco	*G-11 o G-12*	*P50 de 6 meses 12% sobre el valor máximo anual de la proyección*	*Reforzar Zona de Captura Focalizada con pozos de captura complementarios Reforzar la zona de inyección, con pozos complementarios de inyección de agua de buena calidad*	*3 meses para solicitud de autorizaciones 1 mes para activación luego de obtenidos los permisos*
	G-05 o PES-03	*P50 de 6 meses 12% sobre el valor máximo anual de la proyección*	*Incorporar pozos de captura adicionales en el área de seguimiento, para extraer hasta 40 l/s en forma temporal. Reforzar la zona de inyección focalizada, con pozos complementarios de inyección de agua de buena calidad, que permitan la inyección de 10 l/s adicionales sobre esa zona*	*3 meses para solicitud de autorizaciones 1 mes para activación luego de obtenidos los permisos*
APR Huechún	*PB-3 o PES-02*	*P50 de 6 meses 12% sobre el valor máximo anual de la proyección*	*Reforzar Zona de Captura Focalizada, con pozos de captura complementarios Reforzar la zona de inyección, con pozos complementarios de inyección de agua de buena calidad*	*3 meses para solicitud de autorizaciones 1 mes para activación luego de obtenidos los permisos*

El comportamiento de la calidad del agua en los pozos de control asociados al PAT se encuentra directamente relacionado con la efectividad de las medidas de control establecidas en el Plan de Acciones de Control de Infiltraciones. Actualmente se encuentran construidas la totalidad de las obras asociadas a dicho Plan, desarrollándose pruebas hidráulicas de estos sistemas a partir de septiembre de 2015.

El monitoreo asociado al PAT se ha dado inicio el 01 julio de 2015, correspondiendo el presente Informe Anual al periodo enero a diciembre de 2023.

3 OBJETIVOS

Los objetivos del muestreo, medición, análisis y/o control de los parámetros considerados para el seguimiento del PAT, son los siguientes:

- Presentar y analizar los resultados del año 2023 del monitoreo de la calidad del agua en los pozos PAT, para el seguimiento de las infiltraciones de aguas claras del tranque de relaves, de acuerdo a lo establecido en la Res. Exe. CE RMS N°204/2015.

- Verificar la evolución de las condiciones comprometidas para identificar desviaciones respecto de las proyecciones estimadas de la calidad de aguas.

4 DESCRIPCIÓN DE OBRAS PLAN DE ACCIONES DE CONTROL DE INFILTRACIONES.

El Plan de Acciones de Control de Infiltraciones corresponde a las acciones preventivas y correctivas comprometidas para el control de infiltraciones aguas abajo del muro del Tranque Ovejería.

Las medidas asociadas a dicho Plan han pasado a ser parte integrante de la RCA-275B/94 de fecha 04 de marzo de 1994, modificada según Res. Exe. 204/2015 de 08 de mayo de 2015.

En el presente Capítulo se describen las obras asociadas a dichas medidas construidas a la fecha.

El Plan de Acciones de Control de Infiltraciones considera el proyecto de obras para la captura de aguas subterráneas por medio de pozos de bombeo y la inyección de aguas de buena calidad mediante pozos construidos para este efecto; a través de Medidas Globales y Medidas Focalizadas según se describe en el considerando 11.1 de la Res. Exe. 2014/2015.

Actualmente se encuentran construidas la totalidad de las obras asociadas a dicho Plan, desarrollándose pruebas hidráulicas de estos sistemas a partir de septiembre de 2015 y operando normalmente.

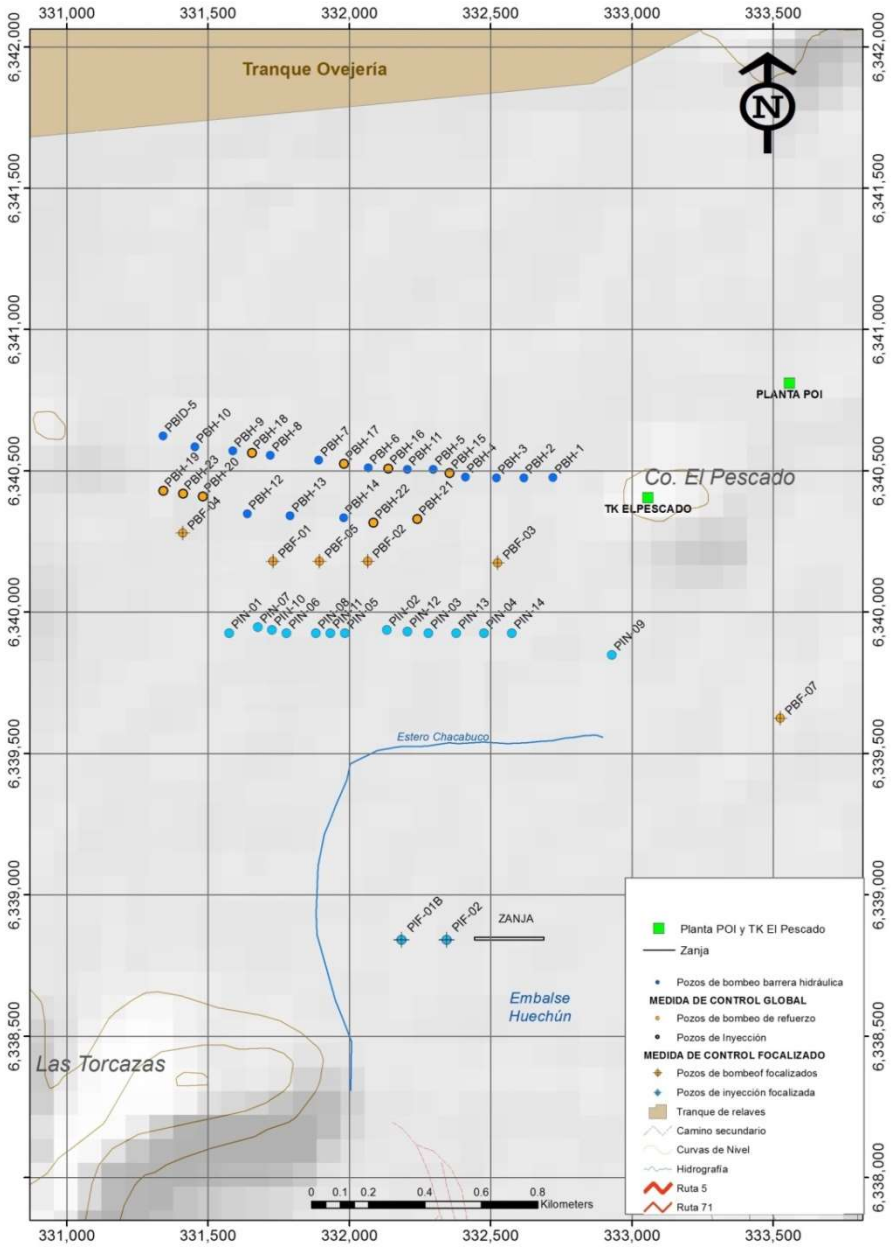
En la Figura 4.1 se ilustra la posición general de las obras construidas, en la cual se aprecian las Medidas Globales, con pozos de bombeo y pozos de inyección de aguas de buena calidad, y las Medidas Focalizadas.

Respecto a pozos de bombeo, el agua capturada es impulsada hacia la Sentina Sur desde donde es recirculada al proceso, y parte de esta agua es impulsada a la Planta de Osmosis Inversa (en adelante Planta POI) para ser tratada y utilizada en la inyección de aguas de buena calidad.

Para la inyección de aguas frescas, se ha construido un estanque de trasferencia en el Cerro El Pescado, con un volumen de 50 m^3. A este estanque confluyen las aguas de pozos fuentes ubicados en el valle central del acuífero Chacabuco-Polpaico, y de agua proveniente de la Planta POI. Desde el inicio de la inyección se ha utilizado como fuente principal el agua proveniente de la Planta POI. Desde este estanque se distribuye en forma gravitacional el agua de buena calidad hacia los Pozos de Inyección (pozos PIN) y hacia los Pozos de Inyección Focalizada (pozos PIF).

El detalle de las obras construidas se presenta a continuación.

Figura 4.1: Disposición de obras principales construidas Plan de Acciones de Control de Infiltraciones.



4.1 Medidas de Control Global

4.1.1 Robustecimiento de la Barrera Hidráulica (1ª y 2ª línea de captura).

Como parte del Plan de Acciones de Control de Infiltraciones se ha robustecido la barrera hidráulica mediante la construcción de 8 nuevos pozos de extracción (PBH-15 a PBH-22) en el área de la barrera, líneas de captura unos y dos. Los pozos tienen profundidades entre 52 y 87 m y han sido habilitados con tubería ciega y cribas de acero inoxidable de 12".

Las características de los pozos de robustecimiento construidos y los caudales asociados a la tramitación de solicitud de derechos de aprovechamiento (Expediente Dirección General de Aguas VPC-1301-282), se incluyen en la Tabla 4.1, mientras las habilitaciones con sus descripciones estratigráficas se incorporaron a los informes anteriores correspondientes.

Tabla 4.1: Pozos de Robustecimiento construidos.

Pozo	Coordenadas WGS84		Coordenadas PSAD56		Φ (plg)	Prof. (m)	Caudal (l/s)	Material
	Este (m)	Norte (m)	Este (m)	Norte (m)				
PBH-15	332.354	6.340.494	332.171	6.340.120	12	79.75	18	Acero
PBH-16	332.137	6.340.509	331.954	6.340.135	12	87	12.6	Acero
PBH-17	331.980	6.340.525	331.797	6.340.152	12	75	18	Acero
PBH-18	331.654	6.340.564	331.471	6.340.190	12	67	18	Acero
PBH-19	331.340	6.340.430	331.157	6.340.056	12	65	13	Acero
PBH-20	331.480	6.340.410	331.297	6.340.037	12	62	22	Acero
PBH-21	332.240	6.340.330	332.057	6.339.956	12	70.75	30	Acero
PBH-22	332.084	6.340.317	331.901	6.339.943	12	52.5	20	Acero

4.1.2 Pozos de inyección de buena calidad

Como parte del Plan de Acciones de Control de Infiltraciones se han construido 14 pozos destinados a la inyección de aguas de buena calidad, con profundidades entre 34 y 49 m y habilitados con tubería ciega y cribas de acero inoxidable de 10" y 12". Estos pozos han sido denominados pozos PIN (Pozos de Inyección).

Las coordenadas y características constructivas generales de los pozos PIN construidos se incluyen en la Tabla 4.2, mientras las descripciones estratigráficas y habilitaciones de cada uno de los pozos se enviaron oportunamente en los informes correspondientes.

Tabla 4.2: Pozos de Inyección construidos (PIN).

Pozo	Coordenadas WGS84		Coordenadas PSAD56		Φ (plg)	Prof (m)	Material
	Este (m)	Norte (m)	Este (m)	Norte (m)			
PIN-01	331.392	6.339.553	331.575	6.339.927	10”	42	Acero
PIN-02	331.950	6.339.564	332.133	6.339.937	10”	37	Acero
PIN-03	332.096	6.339.553	332.279	6.339.927	10”	49	Acero
PIN-04	332.293	6.339.552	332.476	6.339.927	10”	50	Acero
PIN-05	331.801	6.339.553	331.984	6.339.927	10”	36	Acero
PIN-06	331.594	6.339.554	331.777	6.339.927	10”	37	Acero
PIN-07	331.493	6.339.573	331.676	6.339.947	10"	45	Acero
PIN-08	331.698	6.339.553	331.881	6.339.927	10"	45	Acero
PIN-09	332.746	6.339.475	332.929	6.339.849	12"	30	Acero
PIN-10	331.543	6.339.564	331.726	6.339.937	12"	40	Acero
PIN-11	331.292	6.339.552	331.475	6.339.926	12"	35	Acero
PIN-12	332.023	6.339.564	332.206	6.339.937	12"	34	Acero
PIN-13	332.195	6.339.553	332.378	6.339.927	12"	40	Acero
PIN-14	332.392	6.339.552	332.575	6.339.926	12"	34	Acero

4.2 Medidas de Control Focalizado

4.2.1 Pozos de Bombeo Focalizado

Como parte del Plan de Acciones de Control de Infiltraciones se han construido 6 pozos de bombeo focalizado. Los pozos tienen profundidades entre 30 y 60 m y han sido habilitados con tubería ciega y cribas de acero inoxidable de 12”. Estos pozos han sido denominados pozos PBF (Pozos de Bombeo Focalizado)

Las características de los pozos de bombeo focalizado y los caudales asociados a los derechos de aprovechamiento de estos pozos, se incluyen en la Tabla 4.3, mientras las habilitaciones con sus descripciones estratigráficas se enviaron oportunamente en los informes correspondientes.

Tabla 4.3: Pozos de Bombeo Focalizado (PBF).

Pozo	Coordenadas WGS84		Coordenadas PSAD56		Φ (plg)	Prof. (m)	Caudal (l/s)	Material
	Este (m)	Norte (m)	Este (m)	Norte (m)				
PBF-01	331.548	6.339.807	331.730	6.340.180	12	45	15	Acero
PBF-02	331.882	6.339.807	332.065	6.340.180	12	45	14	Acero
PBF-03	332.342	6.339.802	332.525	6.340.175	12	30	6	Acero
PBF-04	331.228	6.339.907	331.410	6.340.280	12	45	4.5	Acero
PBF-05	331.712	6.339.805	331.895	6.340.180	12	40	15	Acero
PBF-07	333.342	6.339.253	333.525	6.339.625	12	60	8	Acero

4.2.2 Pozos de Inyección Focalizada de Aguas Frescas de Buena Calidad

Se han construido 2 pozos de inyección focalizada, distanciados entre sí aproximadamente en 160 m, con profundidades de 38 m y habilitados con tubería ciega y cribas de acero inoxidable de 10". Estos pozos han sido denominados pozos PIF (Pozos de Inyección Focalizada).

Las coordenadas y características constructivas generales de los pozos PIF construidos y proyectados se incluyen en la Tabla 4.4, mientras las descripciones estratigráficas y habilitaciones de cada uno de los pozos construidos se enviaron oportunamente en los informes correspondientes.

Tabla 4.4: Pozos de Inyección Focalizada (PIF).

Pozo	Coordenadas WGS84		Coordenadas PSAD56		Φ (plg)	Prof. (m)	Material
	Este (m)	Norte (m)	Este (m)	Norte (m)			
PIF-01B	332.000	6.338.468	332.184	6.338.841	10"	38	Acero
PIF-02	332.160	6.338.468	332.344	6.338.841	10"	38	Acero

Con fines de disposición de excedentes de agua de buena calidad y como apoyo al sistema de recarga del acuífero, se ha continuado operando con la zanja rectangular de inyección en la zona de inyección focalizada, en el sector del antiguo embalse de riego Huechún. Dicha zanja se encuentra en las coordenadas referenciales WGS84 332.405 E, 6.338.475 N (PSAD56 332.588, 6.338.848), y tiene una dimensión de 150 m de largo por 5 m de ancho y 3,5 m de profundidad.

4.3 Fuente de aguas de buena calidad

Se cuenta con dos fuentes de agua de buena calidad. La primera referida a agua proveniente de pozos ubicados en el acuífero de aprovechamiento común entre los puntos de captura y la zona de inyección, y la segunda proveniente del tratamiento de las aguas capturadas por la barrera hidráulica a través de una Planta de Osmosis Inversa (POI); siendo desde el inicio de la operación la fuente principal para la inyección de agua de buena calidad el agua proveniente de la POI.

Tanto las aguas provenientes de los pozos fuente de captación en el valle como el agua tratada en la POI, son conducidas hacia un estanque de cabeza ubicado en el Cerro El Pescado, desde donde se alimenta gravitacionalmente a los pozos de inyección.

Las aguas de buena calidad excedentes del Cerro El Pescado son dispuestas en el Tranque Viejo.

La descripción de las fuentes es la siguiente:

4.3.1 Aguas subterráneas provenientes del valle central del acuífero Chacabuco Polpaico.

Se cuenta con agua proveniente de 5 pozos de captación de aguas subterráneas emplazados en el valle central del acuífero Chacabuco-Polpaico para el abastecimiento de aguas de buena calidad, cuyas características y caudales asociados a sus respectivos derechos de aprovechamiento se presentan en la Tabla 4.5, con caudal posible de extraer total de hasta 41,5 l/s.

Tabla 4.5: Pozos fuente de aguas de buena calidad.

Pozo	Coordenadas WGS84		Coordenadas PSAD56		Φ	Prof.	Caudal
	Este (m)	Norte (m)	Este (m)	Norte (m)	(plg)	(m)	(l/s)
Sector Quilapilún							
PQ-08	337.905	6.337.809	337.905	6.337.809	12"	76	7,5
PQ-09	337.596	6.337.853	337.596	6.337.847	12"	103	9
Sector Santa Adriana							
Pozo 2 - Santa Adriana	339.864	6.342.251	339.838	6.342.213	12"	67	7
Pozo 4 - Santa Adriana	339.655	6.341.839	340.047	6.342.624	10"	100	8
Sector El Sauce							
El Sauce	339.840	6.345.462	340.025	6.345.844	10"	120	10
TOTAL							**41,5 l/s**

4.3.2 Agua tratada Planta de Osmosis Inversa (POI)

Se cuenta con el agua producto de una Planta de Osmosis Inversa (en adelante POI), la cual es alimentada por agua alumbrada por los pozos de la barrera hidráulica del tranque de relaves Ovejería, originalmente proyectada tal que permita disponer del caudal necesario en la eventualidad que las fuentes de agua fresca del mismo acuífero Chacabuco-Polpaico presenten problemas de disponibilidad física o de calidad de aguas requerida. Sin embargo, en atención a la escasez hídrica, durante le operación de las medidas de control de infiltraciones, se ha usado principalmente el agua proveniente de la POI.

La POI se emplaza en el sector oriente del tranque de relaves Ovejería, entre el muro del tranque y el cerro El Pescado. Cuenta con dos módulos con capacidad de producir un caudal de agua tratada de 50 l/s cada uno, lo que permite producir un total de agua de buena calidad de 100 l/s.

4.4 Caudales de bombeo y de inyección

Los caudales medios mensuales obtenidos de la barrera hidráulica original durante el año 2023, así como del robustecimiento de la barrera hidráulica y de pozos de bombeo focalizado, se indican en la Tabla 4.6. El detalle de los caudales medios diarios se incluye en el Anexo 5.

Tabla 4.6: Caudales medios mensuales pozos de extracción.

Periodo	Caudal (l/s)			TOTAL (l/s)
	Barrera Hidráulica original	Robustecimiento de la Barrera Hidráulica	Bombeo Focalizado	
	(Pozos PBH)	(Pozos PBH)	(Pozos PBF)	
ene-23	89	98	39	225
feb-23	85	100	40	225
mar-23	85	98	39	222
abr-23	79	97	29	205
may-23	85	100	27	212
jun-23	88	97	26	211
jul-23	83	93	23	199
ago-23	87	93	23	203
sept-23	83	95	24	201
oct-23	92	94	24	210
nov-23	84	86	23	193
dic-23	84	85	25	195

Las medidas referentes a la inyección de aguas frescas se encuentran en pruebas a partir de septiembre de 2015 y en actual operación. En el año 2023 los caudales de inyección generados se indican en la Tabla 4.7 siguiente:

Tabla 4.7: Caudales medios mensuales pozos de inyección.

Periodo	Caudal (l/s)		TOTAL (l/s)
	Pozos de Inyección	Pozos de Inyección Focalizada	
	(Pozos PIN)	(Pozos PIF)	
ene-23	97	1	98
feb-23	91	0	91
mar-23	75	0	75
abr-23	81	1	82
may-23	89	10	98
jun-23	87	8	95
jul-23	86	11	97
ago-23	86	11	97
sept-23	86	11	97
oct-23	80	10	90
nov-23	90	10	100
dic-23	85	12	97

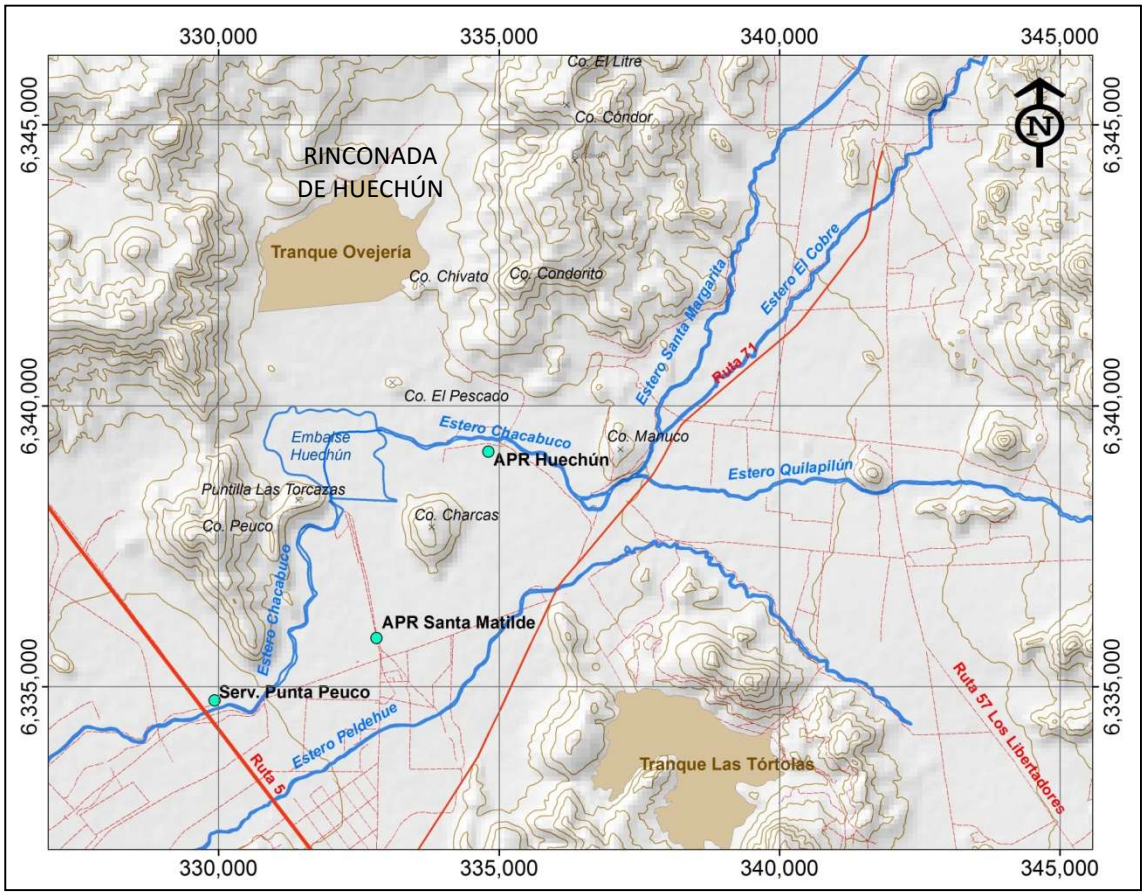
5 MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DEL ACUÍFERO

5.1 MATERIALES Y MÉTODOS

5.1.1 Descripción del área de estudio

El Tranque de Relaves Ovejería se ubica en el extremo norte de la región Metropolitana a 45 km de la ciudad de Santiago, emplazado específicamente en la subcuenca de Rinconada de Huechún (Ver Figura 5.1), de no más de 70 km^2. Esta subcuenca es tributaria de la cuenca del estero Chacabuco Polpaico que se extiende entre los 32°55’ y 33°10’ Latitud Sur; y entre los 70°30’ y 70°55’ Longitud Oeste, y abarca un área aproximada de 1.073 km^2, de los cuales 425 km^2 corresponden a las cuencas del estero Polpaico y 648 km^2 corresponden a la cuenca del estero Chacabuco.

Figura 5.1: Ubicación Tranque Ovejería.



5.1.2 Puntos de muestreo

El número y ubicación de los puntos de control que forman parte de este Plan de Alerta Temprana han sido establecidos en la Tabla N°4 de la Res. Exe. CE RMS N°204/2015.

Los pozos PES-01, PES-02, PES-03 y PES-04 fueron individualizados en la Res. Exe. CE RMS N°204/2015, Tabla N°3 como pozos proyectados, con coordenadas preliminares y profundidades proyectadas. A la fecha, la totalidad de estos pozos han sido construidos y son parte de la red de pozos PAT para el control de aguas subterráneas.

La Tabla 5.1 del presente informe contiene los puntos de monitoreo finales e incluye las coordenadas y profundidades definitivas de los Pozos de Control recientemente construidos; mientras en las Figuras 5.2 y 5.3 se ilustra su emplazamiento respecto a los pozos APR a los cuales se asocian, es decir APR Huechún hacia el sur este y APR Santa Matilde y Punta Peuco hacia el sur.

Tabla 5.1: Pozos PAT para el control de aguas subterráneas monitoreados y APR asociado.

Estación de Monitoreo	Tipo de pozo	Coordenadas UTM PSAD56 (m)		Prof. (m)	Condición para monitoreo	APR
		Este	Norte			
PES-02	Pozo Observación Codelco	333.557	6.339.935	40	Sin bomba	APR Huechún
G-02	Pozo Observación Codelco	333.937	6.340.167	77	Sin bomba	
G-03	Pozo Observación Codelco	334.340	6.339.720	72	Sin bomba	
PB-3	Pozo Observación, con bomba instalada	333.933	6.339.379	65	Con bomba y tubería cerrada	
G-11	Pozo Observación Codelco	331.676	6.339.604	71	Sin bomba	APR Santa Matilde y Punta Peuco
G-12	Pozo Observación Codelco	332.323	6.339.587	100	Sin bomba	
G-05	Pozo Observación Codelco	332.371	6.338.221	142	Sin bomba	
PES-01	Pozo Observación Codelco	332.550	6.337.545	80	Sin bomba	
PES-03	Pozo Observación Codelco	332.176	6.337.463	80	Sin bomba	
PES-04	Pozo Observación Codelco	332.940	6.337.545	46	Sin bomba	

Figura 5.2: Ubicación de Pozos de Control PAT. APR Huechún.

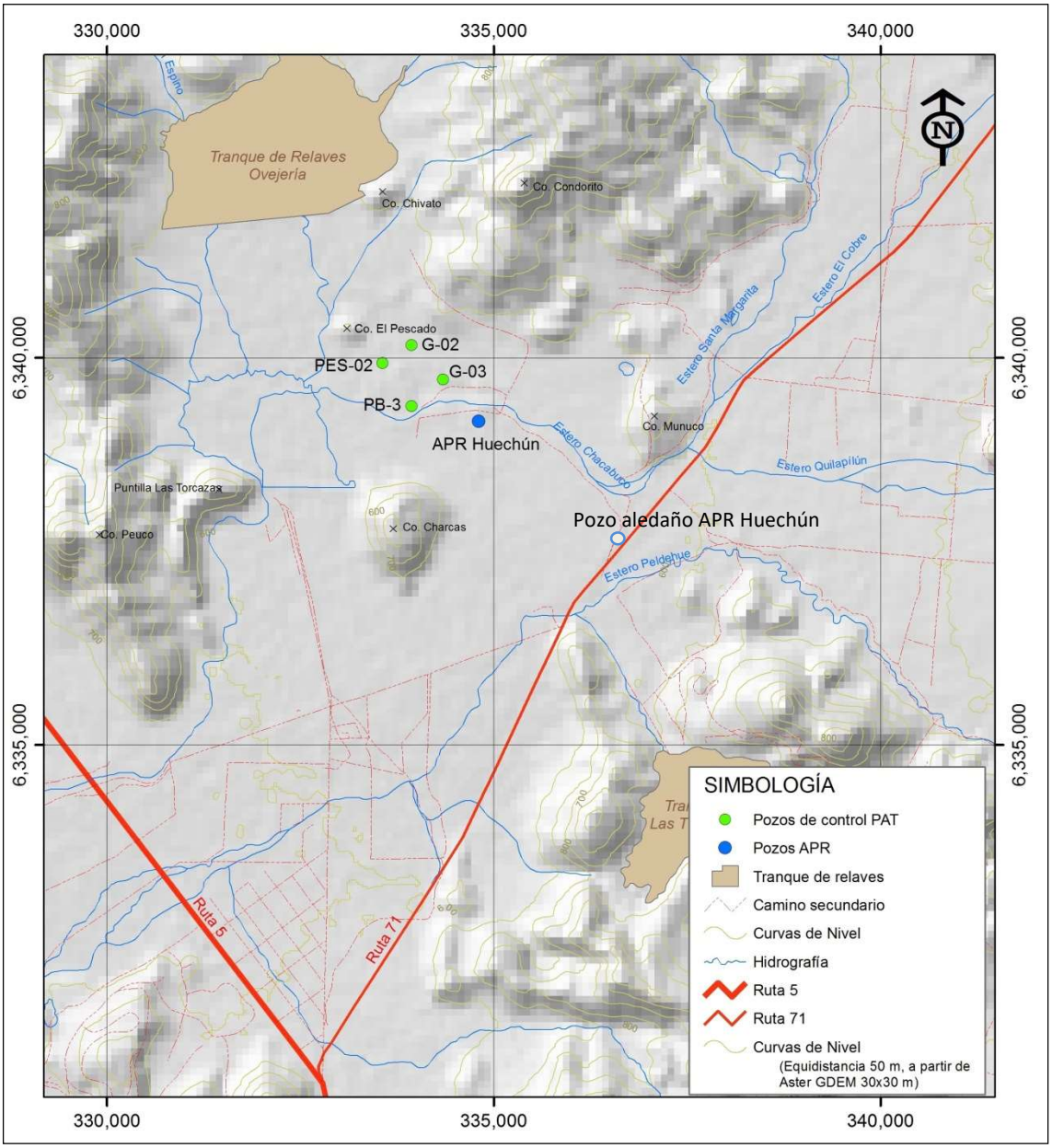
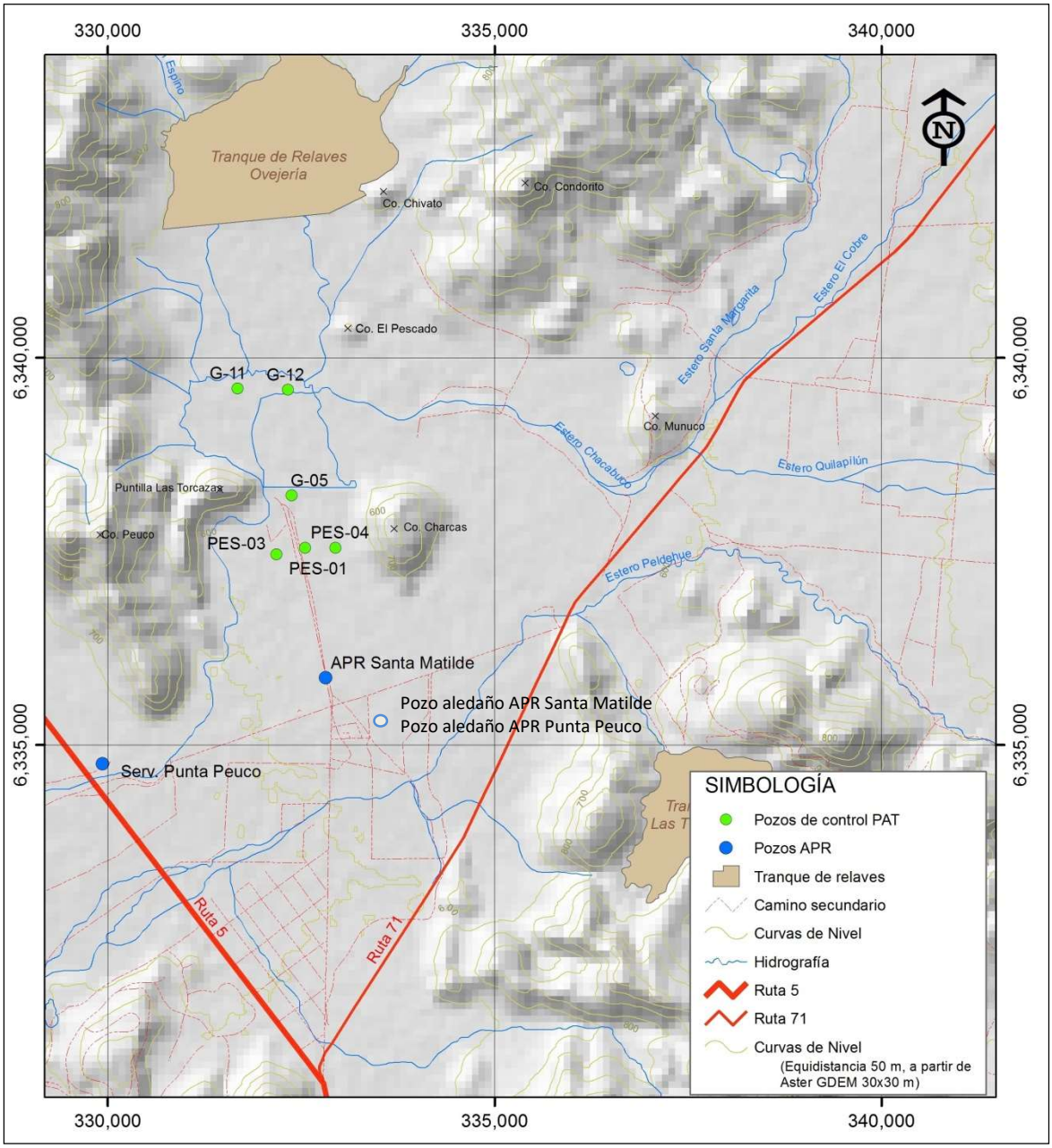


Figura 5.3: Ubicación Pozos PAT. APRs Santa Matilde y Punta Peuco.



5.1.3 Parámetros utilizados para caracterizar el estado y evolución de las variables ambientales

Los parámetros a analizar como parte del PAT corresponden a aquellos identificados como indicadores principales para realizar el seguimiento de la evolución de la presencia aguas claras relacionadas con el tranque de relaves en las aguas subterráneas, tal que permita verificar la eficacia de las medidas implementadas en el Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones (PSyCI) descrito en dicha Res. Exe. CE RMS N°204/2015. Los parámetros corresponden a los incluidos en la **Lista Corta**. Estos son: Niveles de aguas subterráneas, pH, Conductividad Específica (CE), Sólidos Disueltos Totales (SDT), y concentración de Sulfato (SO4).

5.1.4 Metodología de muestreo, medición, análisis y/o control

A partir de octubre de 2016 se contrató a Entidades de Fiscalización Ambiental (ETFA), en cumplimiento de requerimiento de la Superintendencia del Medio Ambiente en relación a que, a partir del 1° de octubre de 2016, todas las actividades de muestreo, medición y/o análisis, que reporten los titulares de actividades o fuentes reguladas por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), deben ser ejecutadas por una o más ETFA, en el o los alcance(s) específico(s) autorizado(s).

El equipo de trabajo se indica en el Anexo 1, y se encuentra constituido por ingenieros especialistas de Codelco-División Andina encargados de la vigilancia permanente y análisis de información. Las actividades de monitoreo han sido realizadas por Entidades Técnicas de Fiscalización Ambiental (ETFA) autorizada por la SMA, a través de la supervisión en terreno y ejecución de sus Inspectores Ambientales (IA). Las actividades de monitoreo entre los meses de enero y diciembre 2021 fueron supervisadas por ETFA Laboratorio SGS, acreditada y autorizada por la SMA para la actividad de muestreo a través de sus Inspectores Ambientales (IA) también autorizados por la SMA; así como también, los análisis de laboratorio han sido realizados por el laboratorio de SGS (enero a diciembre), en su calidad ETFA autorizados para análisis de agua.

Los documentos referidos a las acreditaciones y autorizaciones se encuentran en el Anexo 2.

Con el objeto de asegurar la representatividad de las aguas subterráneas como resultado del monitoreo desde pozos, el procedimiento que para este efecto se aplica, ha sido desarrollado con asesoría de la División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente de la Universidad de Chile.

Dicho procedimiento se basa en las siguientes referencias:

- NCh-411/11. Of 98 Calidad del agua – Muestreo – Parte 11: Guía para el muestro de aguas subterráneas.
- Standard Methods for examination water and wastewater, Ed 21, 2005. Método 1060 - Preservación y toma de muestras.
- Low-Flow Groundwater Sampling: Using In-Situ, Inc. Troll 9500 Multi-Parameter Probe & Flow-
- Sense Software, David A. Wardwell – In-Situ, Inc. Groundwater Market Manager, 2009.

- Groundwater – Low-Flow Purging and Sampling, White Paper, Geotech, 2009.
- Low-Flow Purging and Sampling Guidance, New Jersey Departmental of Enviromental Protection, 2003.

El procedimiento de muestreo para pozos que cuentan con bomba dedicada se realiza a través de la bomba existente, con un tiempo de bombeo mínimo en el cual se miden los parámetros físico-químicos in situ hasta su estabilización. En los pozos que no cuentan con bomba dedicada, el muestreo se realiza previo purgado de bajo caudal, de manera de asegurar el muestreo de las aguas subterráneas del acuífero, para lo cual se realiza una prueba en terreno a fin de determinar el método apropiado de purga.

Las profundidades de muestreo son definidas con base en los antecedentes hidrogeológicos, en particular descripciones estratigráficas, pruebas de inyección de trazador para aquellos con que se cuenta (pruebas de pozo único realizadas por la Comisión Chilena de Energía Nuclear) y el análisis de perfiles de conductividad, los que se realizan para detectar los tramos en los cuales se presentan las mayores conductividades específicas, es decir, de mayor contenido de infiltraciones de aguas claras, las que en conjunto con los antecedentes técnicos de perforación del pozo a monitorear así como de otros aledaños, permite definir la profundidad de medición, la cual se mantiene en cada pozo con verificación en el tiempo.

La metodología aplicada y la metodología de muestreo para cada pozo se presentan en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Metodología y profundidades de muestreo

Estación de Monitoreo	Condición para monitoreo	Metodología	Prof. De muestreo (m)
PES-02	Sin bomba	Low-Flow Purging	27
G-02	Sin bomba	Low-Flow Purging	25
G-03	Sin bomba	Low-Flow Purging	20
PB-3	Con bomba y tubería cerrada	A través de bomba dedicada	-
G-11	Sin bomba	Low-Flow Purging	25
G-12	Sin bomba	Low-Flow Purging	25
G-05	Sin bomba	Low-Flow Purging	25
PES-01	Sin bomba	Low-Flow Purging	33
PES-03	Sin bomba	Low-Flow Purging	33
PES-04	Sin bomba	Low-Flow Purging	35

Los monitoreos son realizados por el Laboratorio Ambiental SGS Ltda., entidad ETFA autorizada por la SMS. Respecto a los análisis hidroquímicos, la determinación analítica de las variables comprometidas es realizada por el mismo laboratorio, los cuales se encuentran acreditados por el INN según la NCh-ISO 17025.Of2005. Las metodologías aplicadas para la determinación de los parámetros de muestras provenientes de aguas subterráneas, son las siguientes:

Laboratorio SGS:

- Conductividad a 25 °C — SM 2510 B Ed.23, 2017
- pH 25°C Laboratorio — SM 4500-H B Ed.23, 2017
- Sólidos Totales Disueltos — SM 2540 C Ed.23, 2017
- Sulfato — SM 4110 B Ed.23, 2017

5.1.5 Fechas de muestreo

Durante el año materia del presente Informe Anual, se realizaron los monitoreos en las fechas que se indican en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Fechas de monitoreo

Punto de Control	Enero 2023	Febrero 2023	Marzo 2023	Abril 2023	Mayo 2023	Junio 2023	Julio 2023	Agosto 2023	Septiembre 2023	Octubre 2023	Noviembre 2023	Diciembre 2023
PES-02	11-01-2023	02-02-2023	14-03-2023	20-04-2023	02-05-2023	01-06-2023	05-07-2023	02-08-2023	01-09-2023	06-10-2023	01-11-2023	13-12-2023
G-02	11-01-2023	02-02-2023	08-03-2023	12-04-2023	03-05-2023	01-06-2023	04-07-2023	02-08-2023	14-09-2023	06-10-2023	01-11-2023	13-12-2023
G-03	11-01-2023	02-02-2023	08-03-2023	12-04-2023	03-05-2023	02-06-2023	05-07-2023	02-08-2023	12-09-2023	06-10-2023	07-11-2023	13-12-2023
G-05	12-01-2023	07-02-2023	15-03-2023	13-04-2023	03-05-2023	02-06-2023	11-07-2023	08-08-2023	13-09-2023	10-10-2023	08-11-2023	21-12-2023
G-11	11-01-2023	01-02-2023	08-03-2023	11-04-2023	02-05-2023	01-06-2023	04-07-2023	02-08-2023	01-09-2023	03-10-2023	01-11-2023	13-12-2023
G-12	11-01-2023	28-02-2023	24-03-2023	18-04-2023	09-05-2023	06-06-2023	04-07-2023	02-08-2023	01-09-2023	03-10-2023	01-11-2023	13-12-2023
PB-3	05-01-2023	02-02-2023	02-03-2023	06-04-2023	04-05-2023	01-06-2023	06-07-2023	03-08-2023	07-09-2023	05-10-2023	02-11-2023	07-12-2023
PES-01	*	*	*	*	*	*	11-07-2023	04-08-2023	13-09-2023	10-10-2023	07-11-2023	19-12-2023
PES-03	12-01-2023	07-02-2023	16-03-2023	13-04-2023	03-05-2023	02-06-2023	26-07-2023	08-08-2023	15-09-2023	19-10-2023	08-11-2023	21-12-2023
PES-04	12-01-2023	07-02-2023	15-03-2023	12-04-2023	03-05-2023	02-06-2023	05-07-2023	04-08-2023	12-09-2023	10-10-2023	07-11-2023	19-12-2023

(*) = Pozo PES-01 se encuentra obstruido desde octubre 2022.

Cabe señalar, que durante los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo y junio el Pozo PES-01 se encuentra obstruido, por lo cual no es posible efectuar el monitoreo. Se realiza perforación de pozo gemelo de PES-01, el cual queda habilitado desde julio de 2023.

5.2 RESULTADOS

Los resultados del monitoreo de los pozos de control del PAT indicados en la Tabla 5.1, se incluyen en la Tabla 5.4. Los Informes de Análisis hidroquímicos y Cadenas de Custodia asociadas se incluyen en el Anexo 3.

Complementariamente a la información de monitoreo de los pozos PAT ya indicados, en el Anexo 4 se incluyen los resultados de la concentración de sulfatos en los APR Huechún, Santa Matilde y Punta Peuco para el año 2023.

A su vez, es necesario señalar que la información pública del año 2023, para estos APRs, se encuentra disponible en el siguiente enlace:

www.codelco.com/prontus_codelco/site/edic/base/port/monitoreo_apr.html.

Dicha web de acceso público, contiene los registros de la información de monitoreo desde el 01 de julio de 2015 (fecha de inicio del Plan de Monitoreo y Seguimiento según Considerando 11.2.9 de la Res. Ext. N°204/2015) del monitoreo continuo (2 veces por día) de la conductividad específica del agua de los APR asociados al PAT Santa Matilde, Huechún y Punta Peuco (Monitoreo Continuo), y la totalidad de los parámetros monitoreados en los APR Santa Matilde, Huechún, Punta Peuco, El Colorado y Huertos Familiares (Monitoreo Hidroquímicos) tal como solicitó la DOH en su Oficio Ord. N°235 de 27 de febrero de 2014, citado en la Res. Exe. CE RMS N°204/2015 en su Considerando 11.2.8 referido al “Sistema de acceso público”.

Tabla 5.4: Resultados del muestreo de pozos de control PAT. Año 2023.

(a) Enero a junio de 2023.

Punto de control	Ene-2023					Feb-2023					Mar-2023					Abr-2023					May-2023					Jun-2023				
	Nivel m	CE uS/cm	SDT mg/l	SO4 mg/l	pH UpH	Nivel m	CE uS/cm	SDT mg/l	SO4 mg/l	pH UpH	Nivel m	CE uS/cm	SDT mg/l	SO4 mg/l	pH UpH	Nivel m	CE uS/cm	SDT mg/l	SO4 mg/l	pH UpH	Nivel m	CE uS/cm	SDT mg/l	SO4 mg/l	pH UpH	Nivel m	CE uS/cm	SDT mg/l	SO4 mg/l	pH UpH
Pozos de control PAT APR Huechún																													
PES-02	23,97	1042	746	262	8,0	24,73	940	658	207	7,9	25,08	990	732	201	8,2	25,34	959	656	202	8	25,31	907	650	207	7,9	20,60	1061	702	185	7,9
G-02	25,59	998	690	213	7,8	26,07	920	638	206	7,8	26,50	901	600	191	8,2	26,92	1016	630	192	7,8	27,06	867	620	205	7,6	27,20	1034	655	194	7,7
G-03	19,85	636	458	103	7,5	20,20	613	424	89	7,5	21,80	601	366	92	8,2	21,33	651	410	91	7,7	21,60	509	410	101	8,2	21,94	635	422	96	7,6
PB-3	31,29	771	584	142	8,1	31,36	774	550	129	7,9	32,08	765	440	134	7,7	32,10	790	524	110	8,2	32,12	850	554	135	7,9	31,71	858	516	113	7,7
Pozos de control PAT APRs Santa Matilde y Punta Peuco																													
G-05	22,27	617	458	168	7,7	22,38	597	376	170	7,5	22,54	596	384	150	7,6	22,60	577	394	163	7,6	22,56	582	402	145	7,9	22,52	590	394	132	7,7
G-11	15,18	454	332	83	7,8	15,10	470	326	82	7,9	15,15	438	310	72	7,8	15,34	448	328	70	7,9	15,35	443	348	68	7,9	15,38	435	316	66	7,8
G-12	16,84	1283	1016	567	7,7	17,19	804	562	223	7,7	17,25	598	362	159	7,9	17,38	420	270	102	7,9	17,24	345	264	88	8	17,35	396	270	97	7,8
PES-01	*					*					*					*					*					*				
PES-03	30,44	881	552	309	7,7	30,61	808	574	314	7,6	30,64	821	640	248	7,5	30,60	784	618	272	7,6	30,50	771	546	254	7,7	30,42	779	544	236	7,8
PES-04	32,46	499	380	91	7,8	32,51	533	354	96	7,7	32,60	552	386	92	7,6	32,56	560	378	84	7,9	32,53	543	356	89	7,9	32,52	542	388	83	7,8

Tabla 5.4: Resultados del muestreo de pozos de control PAT. Año 2023 (Continuación).

(b) Julio a diciembre de 2023.

Punto de control	Jul-2023					Ago-2023					Sep-2023					Oct-2023					Nov-2023					Dic-2023				
	Nivel m	CE uS/cm	SDT mg/l	SO4 mg/l	pH UpH	Nivel m	CE uS/cm	SDT mg/l	SO4 mg/l	pH UpH	Nivel m	CE uS/cm	SDT mg/l	SO4 mg/l	pH UpH	Nivel m	CE uS/cm	SDT mg/l	SO4 mg/l	pH UpH	Nivel m	CE uS/cm	SDT mg/l	SO4 mg/l	pH UpH	Nivel m	CE uS/cm	SDT mg/l	SO4 mg/l	pH UpH
Pozos de control PAT APR Huechún																													
PES-02	25,61	923	600	212	8,1	25,75	1041	635	175	7,9	25,81	968	634	191	8,2	25,43	843	616	212	7,7	27,26	939	612	230	8,1	16,95	974	588	206	8,3
G-02	27,15	995	658	162	7,9	27,41	947	616	185	7,7	27,47	971	656	167	7,8	27,12	850	624	194	7,6	27,25	880	476	211	8	28,26	958	608	199	8,1
G-03	22,30	590	402	91	7,7	22,55	665	408	84	7,4	22,84	613	434	104	7,7	23,76	547	420	90	7,3	22,00	601	406	97	7,5	22,89	648	396	94	7,8
PB-3	31,61	706	560	123	8	31,81	801	524	135	7,7	31,77	1018	564	111	7,8	31,28	831	636	222	7,8	31,13	874	600	258	8	-	746	653	141	7,9
Pozos de control PAT APRs Santa Matilde y Punta Peuco																													
G-05	22,38	609	374	125	7,6	22,46	682	474	157	7,8	22,36	584	394	180	7,6	22,42	570	393	164	7,6	22,46	553	402	134	7,5	22,5	547	322	121	7,7
G-11	15,40	477	324	69	8	15,30	432	274	62	7,8	15,22	437	324	70	8,1	15,18	431	298	70	7,9	15,12	562	440	73	7,9	16,03	446	290	67	8
G-12	17,24	392	244	93	8	17,14	433	278	99	7,7	17,12	378	258	92	7,9	17,05	320	290	79	7,6	16,95	333	267	73	7,8	17,76	330	202	67	7,9
PES-01	28,98	1179	824	369	7,6	29,05	1131	742	374	7,6	29,16	1043	758	327(*)	7,6	29,32	1034	728	355	7,6	30,24	1004	810	338	7,5	29,42	935	706	311	7,7
PES-03	29,38	668	524	183	7,7	30,41	879	646	242	7,8	31,10	727	522	175	7,9	31,42	660	428	225	7,5	31,45	674	568	206	7,6	31,52	681	442	209	7,7
PES-04	32,43	515	334	99	7,9	32,41	484	306	86	7,8	32,49	534	354	98	7,9	32,59	533	324	97	7,8	33,74	511	320	90	7,7	32,75	505	282	76	7,9

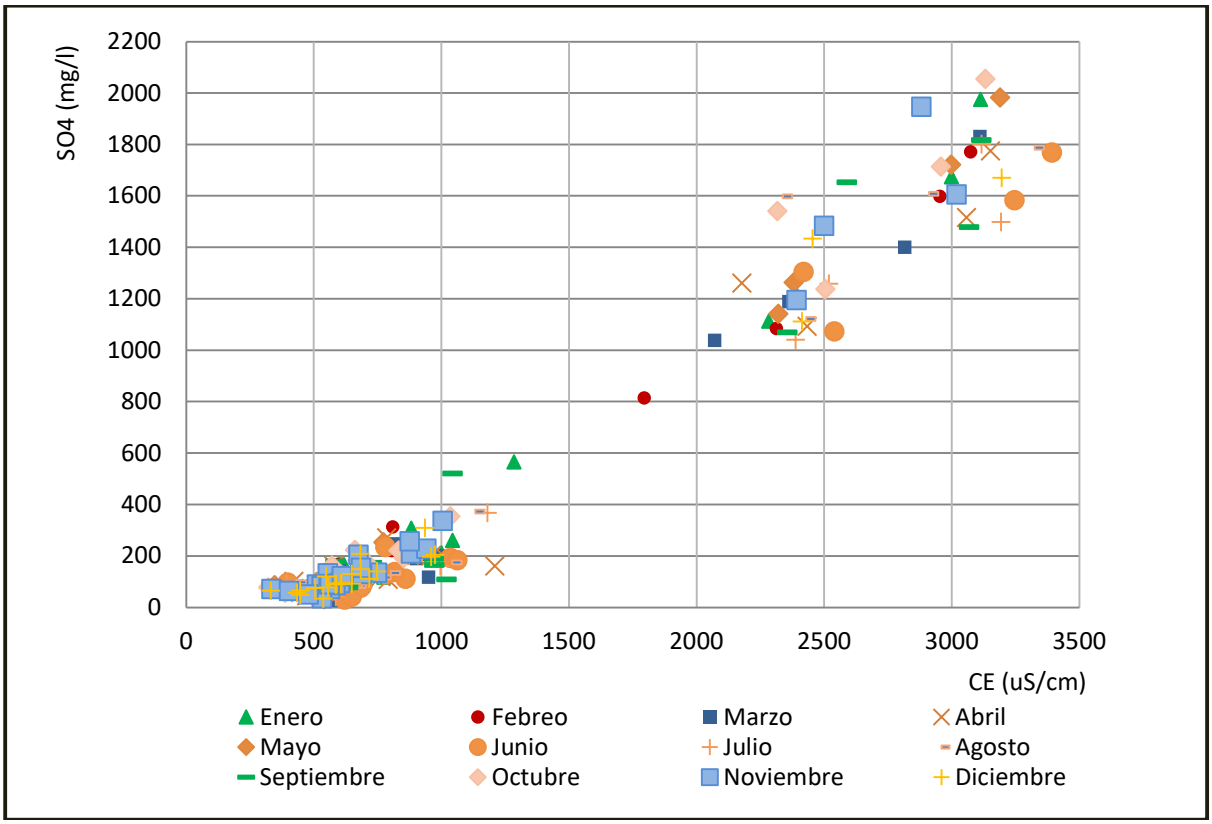
(*) Valor Evaluado y confirmado por revisión de laboratorio.

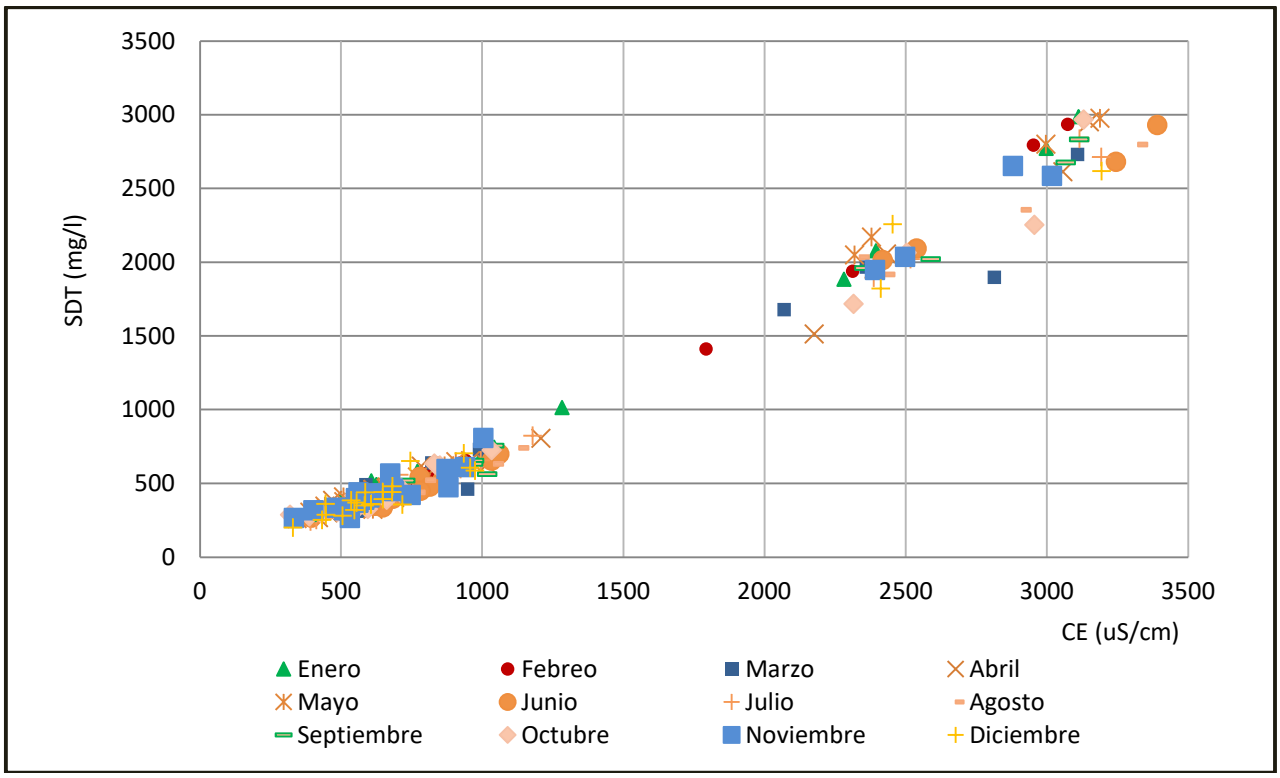
5.2.1 Cotejo y control de datos

El cotejo de datos se realiza a través de la revisión de los datos obtenidos durante el monitoreo del año 2023, referido al cumplimiento de la relación entre el contenido de sulfatos y la conductividad específica, así como entre la conductividad específica y el contenido de sólidos disueltos totales.

Es así como en la Figura 5.4 se ilustran las relaciones indicadas, figuras en las cuales se aprecia que, en general, los datos obtenidos durante el año se encuentran efectivamente relacionados siendo así validados.

Figura 5.4: Relación conductividad específica versus concentración de sulfatos y conductividad específica versus sólidos disueltos totales.





5.2.2 Predicción de Impactos y Medidas de Corrección

Los límites a considerar, o umbrales para la implementación de medidas establecidas en este Plan de Alerta Temprana, están referidos al cálculo de percentiles P50 de 6 meses consecutivos de la concentración de sulfatos (P50 6M) en pozos de control.

Es así como, de acuerdo con el numeral 11.3.2 de la Res. 204/2015, se ha establecido que si en el seguimiento trimestral el P50 6M excede en más de un 12% el valor máximo anual proyectado (umbral), se activará el proceso de implementación de medidas correctivas destinadas a restablecer las tendencias esperadas en la evolución de las concentraciones de sulfatos del sistema, a objeto de resguardar el logro del compromiso de calidad definido.

En la Tabla 5.5 se vuelcan los valores máximos anuales proyectados (umbrales) y el resultado del cálculo de los percentiles P50 6M correspondientes al año 2023 con base en las concentraciones de sulfatos presentados en la Tabla 5.4 anterior. Los umbrales para cada pozo para el año 2023 se extraen de la *Tabla N°5* de la Res. 204/2015.

Tabla 5.5: Percentiles P50 de 6 meses consecutivos y umbrales de la concentración de sulfatos.

Punto de control	UMBRAL 2023	Trimestre 1	Trimestre 2	Trimestre 3	Trimestre 4	Observación
		P50 6M (oct-22 a mar-23)	P50 6M (ene-23 a jun-23)	P50 6M (abr-23 a sep-23)	P50 6M (jul-23 a dic-23)	
Pozos de control PAT APR Huechún						
PES-02	Sin límite	213	204	197	209	No aplica
G-03	150	100	94	94	93	P50 6M bajo umbral.
PB-3	230	137	132	118	138	P50 6M bajo umbral.
Pozos de control PAT APRs Santa Matilde y Punta Peuco						
G-05	380	169	156	151	146	P50 6M bajo umbral.
G-11	330	82	71	69	70	P50 6M bajo umbral.
G-12	240	206	131	95	86	P50 6M bajo umbral.
PES-03	420	279	263	239	208	P50 6M bajo umbral.

5.2.3 Discusión

- **<u>Pozos de control PAT APR Huechún:</u>**

Concentración de Sulfatos respecto a umbrales: Los pozos PES-02, G-03 y PB-3 correspondiente a los pozos de control hacia el APR Huechún, el percentil 50% de 6 meses de la concentración de sulfatos se encuentra bajo los umbrales establecidos en la Res. Exe. CE RMS N°204/2015 según proyección.

pH: En todos los pozos de control del PAT para el APR Huechún, durante el año 2023 se mantienen valores de pH entre 7,3 upH y 8,3 upH; dentro de los rangos establecidos por las normas chilenas de requisitos para agua potable Nch 409/1 Of. 2005, la que establece un rango entre 6,5 y 8,5 upH; y de requisitos para diferentes usos la Nch 1.333/Of. 78 Modif. 87, en su apartado de uso para riego, el cual establece un rango entre 5,5 y 9,0 upH.

Conductividad Específica y Sólidos Disueltos Totales: Ambos parámetros se encuentran directamente relacionados con la concentración de sulfatos, siendo los valores obtenidos concordantes con la concentración de sulfatos, lo que permite validar los resultados obtenidos.

En conclusión, durante el año 2023 todos los pozos de control PAT asociados al APR Huechún PES-02, G-03 y PB-3 tienen su condición de calidad dentro del rango de las proyecciones, con concentraciones de sulfatos obtenidos para estos pozos, representados por percentiles P50 de los 6 últimos bajo los valores umbrales establecidos.

- **<u>Pozos de control PAT APRs Santa Matilde y Punta Peuco:</u>**

Concentración de Sulfatos respecto a umbrales: Los Pozos G-05, G-11, G-12 y PES-03 corresponden a los pozos de control hacia el APR Santa Matilde y Punta Peuco, el percentil 50% de 6 meses de la concentración de sulfatos se encuentra bajo los umbrales establecidos en la Res. Exe. CE RMS N°204/2015 según proyección.

pH: En todos los pozos de control del PAT para los APRs Santa Matilde y Punta Peuco, se mantienen valores de pH entre 7,5 upH y 8,1 upH dentro de los rangos establecidos por las normas chilenas de requisitos para agua potable Nch 409/1 Of. 2005, la que establece un rango entre 6,5 y 8,5 upH; y de requisitos para diferentes usos la Nch 1.333/Of. 78 Modif. 87 en su apartado de uso para riego, el cual establece un rango entre 5,5 y 9,0 upH.

Conductividad Específica y Sólidos Disueltos Totales: Ambos parámetros se encuentran directamente relacionados con la concentración de sulfatos, siendo los valores obtenidos concordantes con la concentración de sulfatos lo que permite validar los resultados obtenidos.

En conclusión, para el presente semestre los pozos de control PAT asociados al APR Santa Matilde y Punta Peuco G-05, G-11, G-12 y PES-03 tienen su condición de calidad dentro del rango de las proyecciones, con

concentraciones de sulfatos obtenidos para estos pozos, representados por percentiles P50 de los 6 últimos bajo los valores umbrales establecidos.

Durante el año 2023, sin perjuicio del descenso de las concentraciones de sulfato antes mencionado, y de acuerdo con el considerando 11.3.2.2 de la Res 204/2015, se han establecido la mantención de las medidas de corrección PAT adoptadas.

6 MEDIDAS DE CORRECCIÓN.

Las obras correctivas para el año 2023, materia del presente informe, se asociarían a la superación del percentil 50% de 6 meses consecutivos de la concentración de sulfatos por sobre los umbrales respectivos a cada pozo de control PAT.

No obstante, durante el año 2023 dichos percentiles de mantuvieron bajo umbral según se aprecia en la Tabla 5.5, no habiendo sido entonces necesaria la implementación de nuevas medidas correctivas durante el periodo.

7 REVISIÓN Y ACTUALIZACIÓN PERIÓDICA DEL PAT

De acuerdo con lo solicitado en el considerando 11.3.3 de la Res. Exe. 204/2015, se realiza una revisión anual de los datos de monitoreo, consistente en los puntos que se detallan en dicho considerando y se desarrollan a continuación.

Para ello, se incluyen en las Figuras 7.1 a 7.10, gráficas para cada pozo de control PAT, las que ilustran la respuesta observada correspondiente a los niveles de concentración de sulfatos en el agua, y la respuesta simulada del acuífero mediante el modelo numérico; sobre los cuales se apoya el siguiente análisis:

1) Cotejo y control de la calidad de los datos derivados del Monitoreo del comportamiento del acuífero y áreas sensibles.

Dicho cotejo se realiza en el Item 5.2.1 del presente informe, como análisis preliminar para el cálculo de los percentiles P50 de 6 meses consecutivos.

2) Análisis cualitativo de la respuesta observada en los niveles de concentración de sulfatos en el agua.

De acuerdo con la Res. Exe. CE RM 204/2015 en su considerando 11.3.3, punto 2); se han preparado gráficos de respuesta observada desde inicio de la operación de las medidas en todos los pozos de seguimiento PAT, comparando con las primeras respuestas y tomando nota de cualquier cambio marcado en el comportamiento.

Dichos gráficos se presentan en las Figuras 7.1 a 7.10 y representan los últimos 15 años, lo que incluye el inicio de la operación de los pozos de la barrera hidráulica y el inicio de las pruebas de las medidas del Plan de Acciones de Control de Infiltraciones a partir de septiembre de 2015. Se simboliza con esferas verdes

aquellos datos correspondientes a la respuesta observada en los niveles históricos de concentración de sulfatos en todos los pozos de control PAT.

Para el periodo de revisión – enero a diciembre de 2023 - se observa que los pozos de control asociados al PAT del APR Huechún – G-02, G-03 y PB-3 (Figuras 7.1, 7.2 y 7.6) -, mantienen concentraciones estables con leves variaciones.

Para el caso de los pozos de control asociados al PAT de los APRs Santa Matilde y Punta Peuco se observa que durante 2023 los pozos de control PAT asociados al APR Santa Matilde y Punta Peuco G-05, G-11 y PES-03 tienen su condición de calidad dentro del rango de las proyecciones, con una desviación ocurrida en el pozo G-12 la que fue corregida durante el primer semestre del año 2023 no siendo necesaria la activación de medida de corrección. Es así como las concentraciones de sulfatos obtenidas representados por percentiles P50 de los 6 últimos meses, se mantuvieron bajo los valores umbrales establecidos en todos los pozos.

Respecto a los pozos PES-01 y PES-03 durante el año 2023; en el pozo PES-01 no se realizaron mediciones entre Enero a Junio del 2023 debido a que el pozo se encuentra obstruido. Sin embargo, las concentraciones de sulfato se mantienen estables en torno a los 378 mg/l, con comportamiento similar en el pozo PES-03 donde las concentraciones de sulfato se mantienen estables en torno a los 240 mg/l; manteniéndose sobre las concentraciones proyectadas por Sim05, pero bajo o en torno a los valores proyectados por Sim03.

3) Simulación numérica del comportamiento del acuífero hasta el momento de la revisión.

La actual versión aceptada del modelo numérico del acuífero ha sido usada para simular el comportamiento del acuífero.

Como parte de los compromisos adquiridos por Codelco Andina, se encuentra una revisión bianual del modelo de simulación numérica, según se describe en el considerando 11.4.3 de la Res. Ex. CE RMS N°204/2015 de dicha resolución.

Dicha revisión bianual se ha realizado extendiendo y cerrando el periodo de calibración hasta diciembre de 2019; simulación denominada Sim05[3].

La simulación hasta el momento de la revisión - diciembre de 2023 - se realiza con el modelo de proyección indicado, con inicio en enero de 2018 e incorporando los caudales reales asociados a las medidas de control de infiltraciones durante el año 2018 y 2019. Esta simulación corresponde al escenario Sim05.

[3] Informe Bianual. Revisión del Modelo de Simulación Hidrogeológica a diciembre de 2019.

En las Figuras 7.1 a 7.10 se representa tanto la simulación original (Sim03) - parte de los antecedentes de la Res. Exe. CE RM 204/2015 -, como los resultados de la simulación del comportamiento del acuífero realizada (Sim05) y datos observados hasta el momento de la revisión.

4) Comparación y evaluación de la respuesta observada y simulada del acuífero.

Las Figuras 7.1 a 7.10 contienen los gráficos de la respuesta observada y simulada del acuífero.

Los valores observados y obtenidos de la simulación Sim05 se presentan en la Tabla 7.1, mientras el cálculo de la diferencia entre las concentraciones observadas y simuladas el periodo enero a diciembre de 2023, expresada como porcentaje de la variación máxima registrada en los pozos de observación, se presenta en la Tabla 7.2.

Se aprecia que para el periodo de análisis año 2023, la respuesta registrada en términos cualitativos tiene tendencias generales simuladas en cada uno de los pozos.

Los pozos PES-01, PES-03 y PES-04 corresponden a pozos que no existían durante el periodo de calibración, siendo perforados en forma posterior. De estos pozos, el pozo PES-04 registra contenidos muy bajos presentando la mayor diferencia según indicador (Tabla 7.2), asociado a una condición natural del acuífero en ese punto con concentración menor a la estimada. A su vez, en el pozo PES-03 el valor observado en el año 2023 fue levemente mayor al simulado según Sim05, sin embargo, menor a Sim03 manteniendo concentraciones de sulfatos bajo valores umbrales establecidos.

Figura 7.1: Evolución observada y pronosticada de concentración de sulfatos. Pozo G-02.

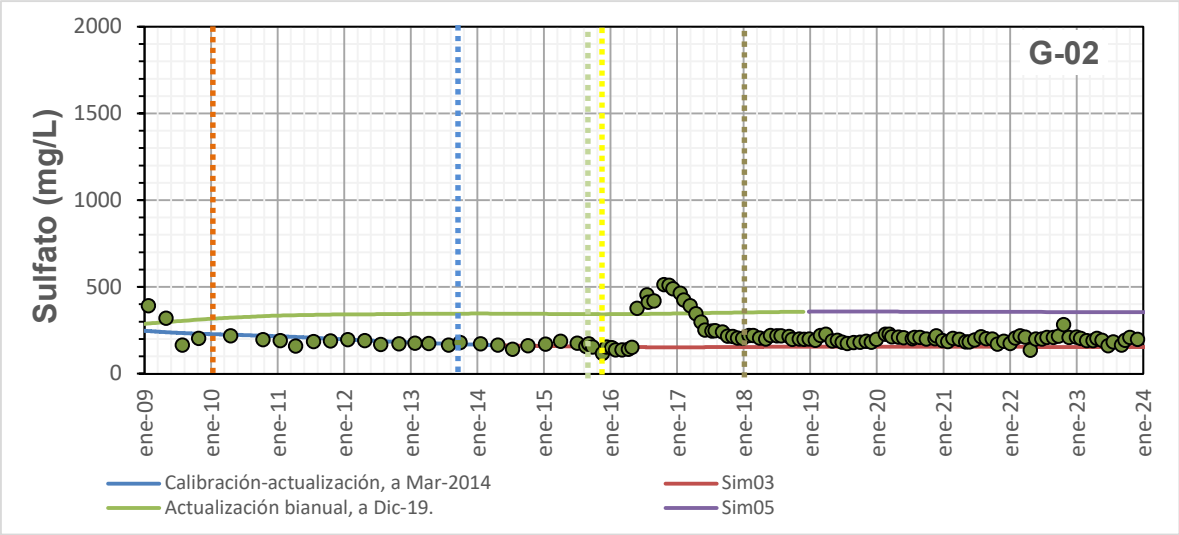


Figura 7.2: Evolución observada y pronosticada de concentración de sulfatos. Pozo G-03.

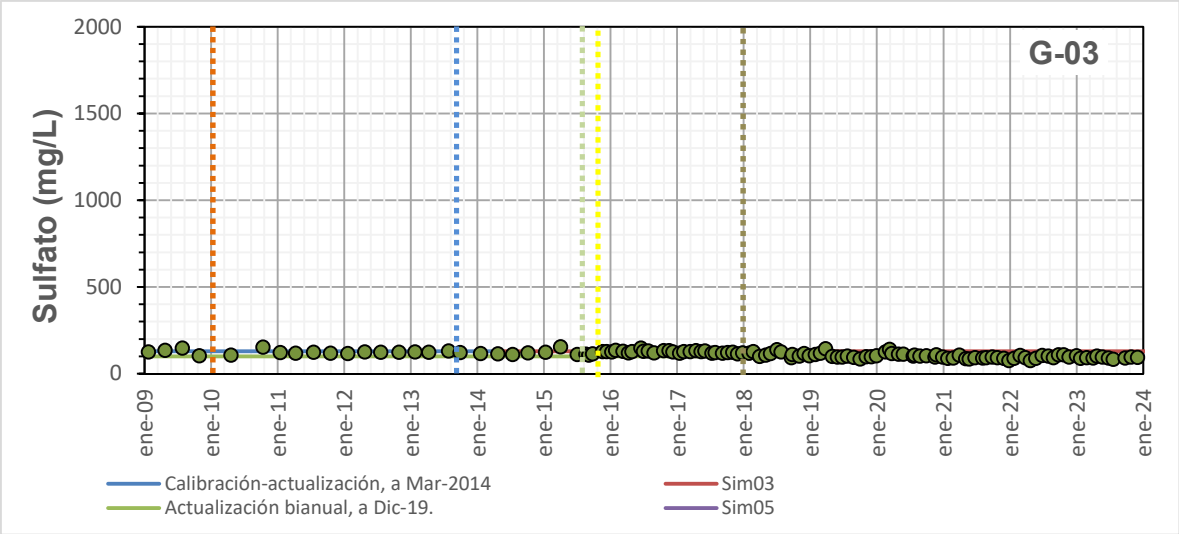


Figura 7.3: Evolución observada y pronosticada de concentración de sulfatos. Pozo G-05.

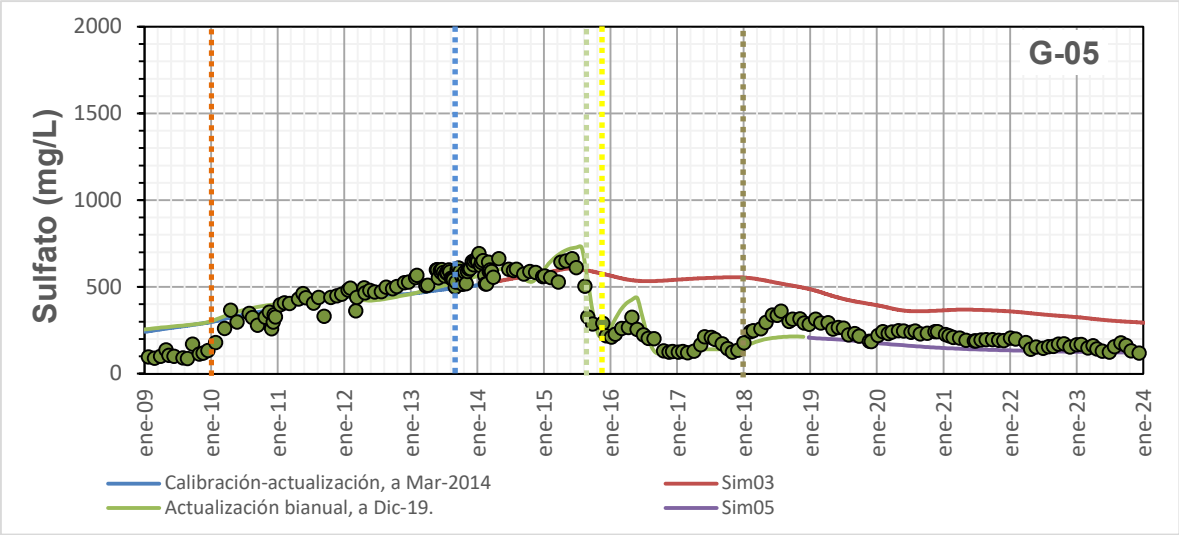


Figura 7.4: Evolución observada y pronosticada de concentración de sulfatos. Pozo G-11.

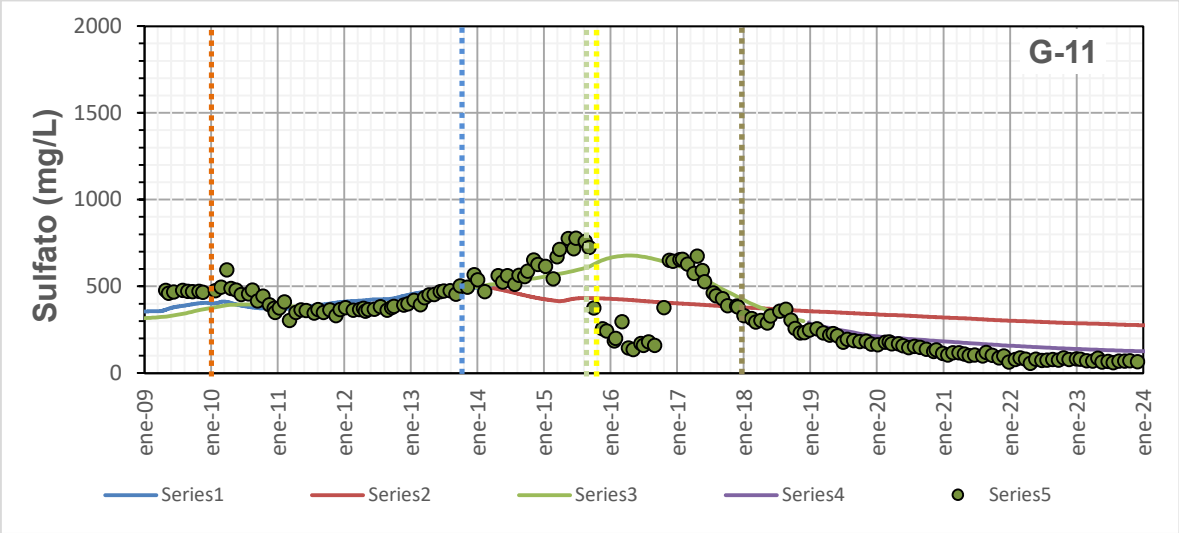


Figura 7.5: Evolución observada y pronosticada de concentración de sulfatos. Pozo G-12.

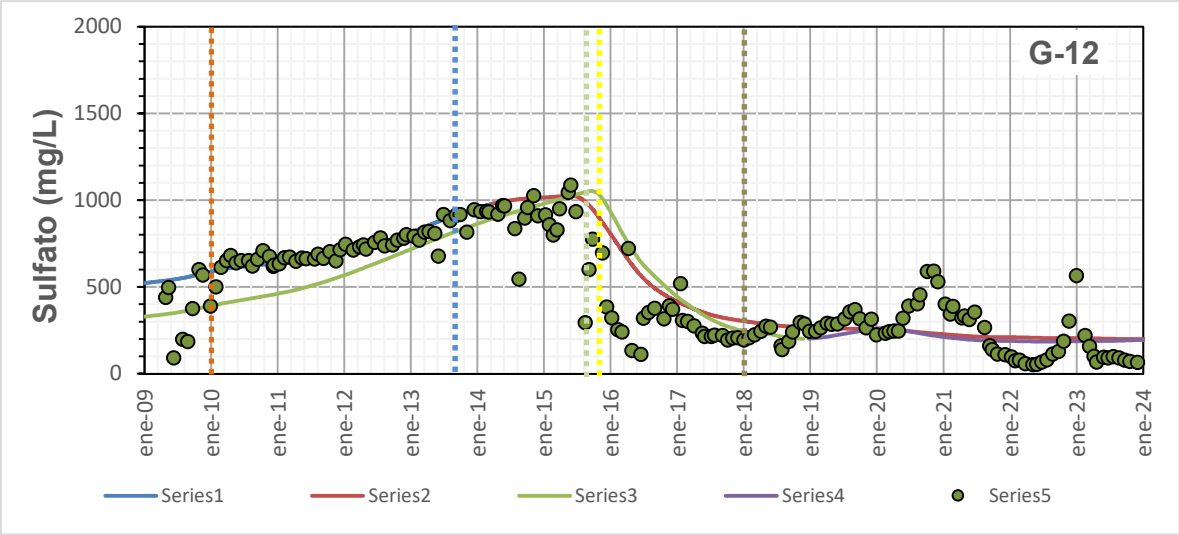


Figura 7.6: Evolución observada y pronosticada de concentración de sulfatos. Pozo PB-3.

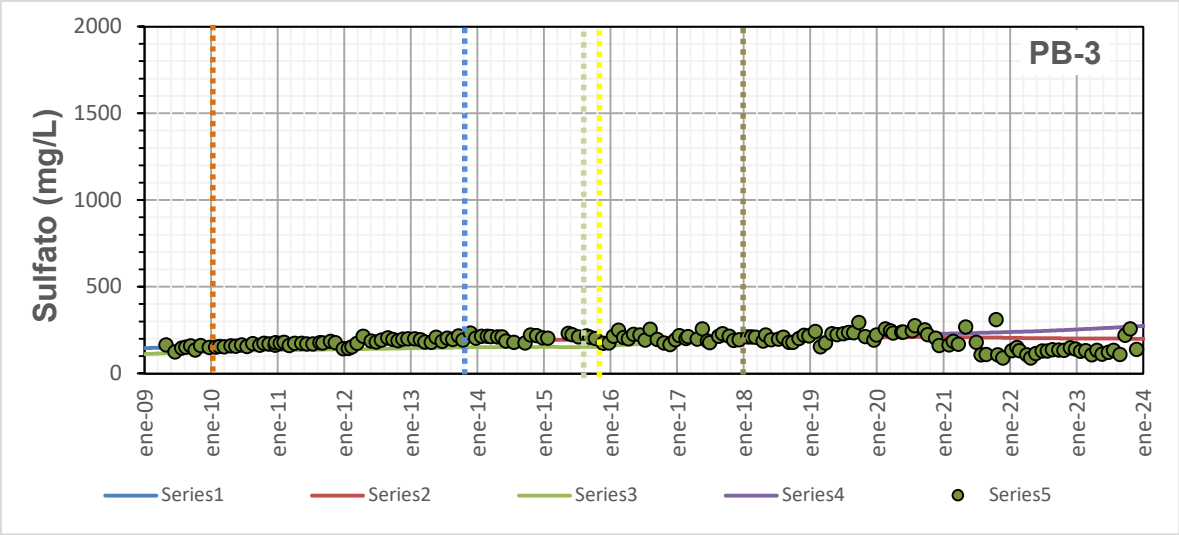


Figura 7.7: Evolución observada y pronosticada de concentración de sulfatos. Pozo PES-01.

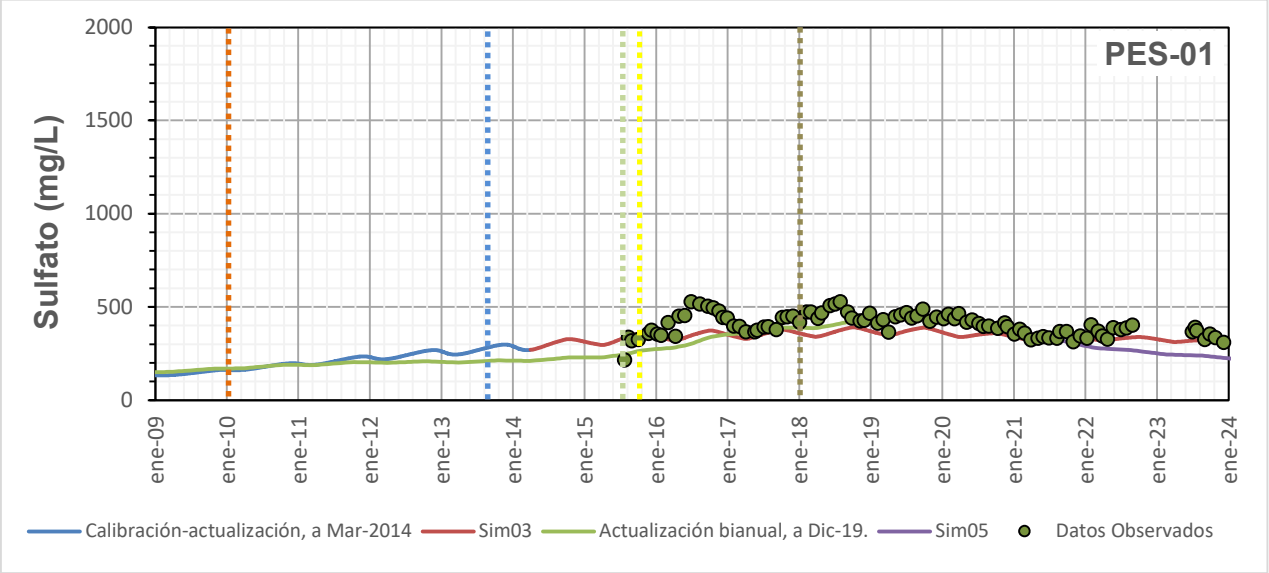


Figura 7.8: Evolución observada y pronosticada de concentración de sulfatos. Pozo PES-02.

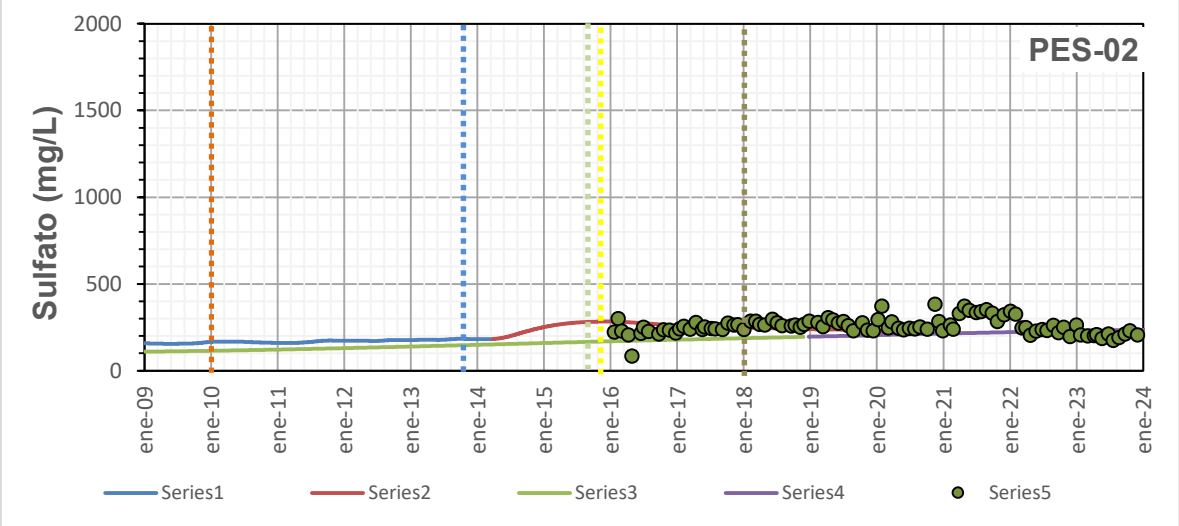


Figura 7.9: Evolución observada y pronosticada de concentración de sulfatos. Pozo PES-03.

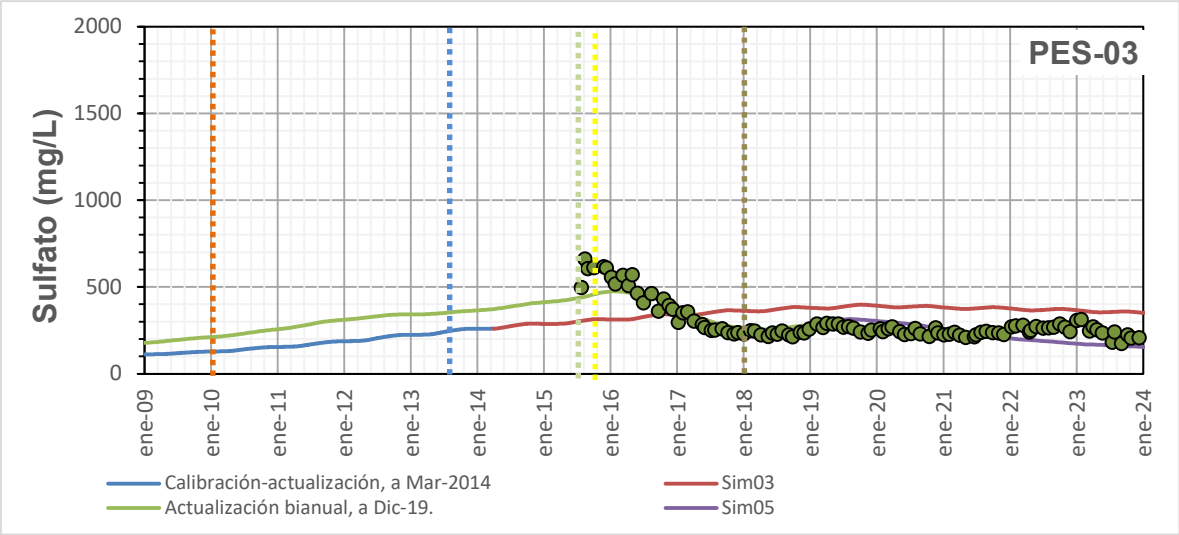


Figura 7.10: Evolución observada y pronosticada de concentración de sulfatos. Pozo PES-04.

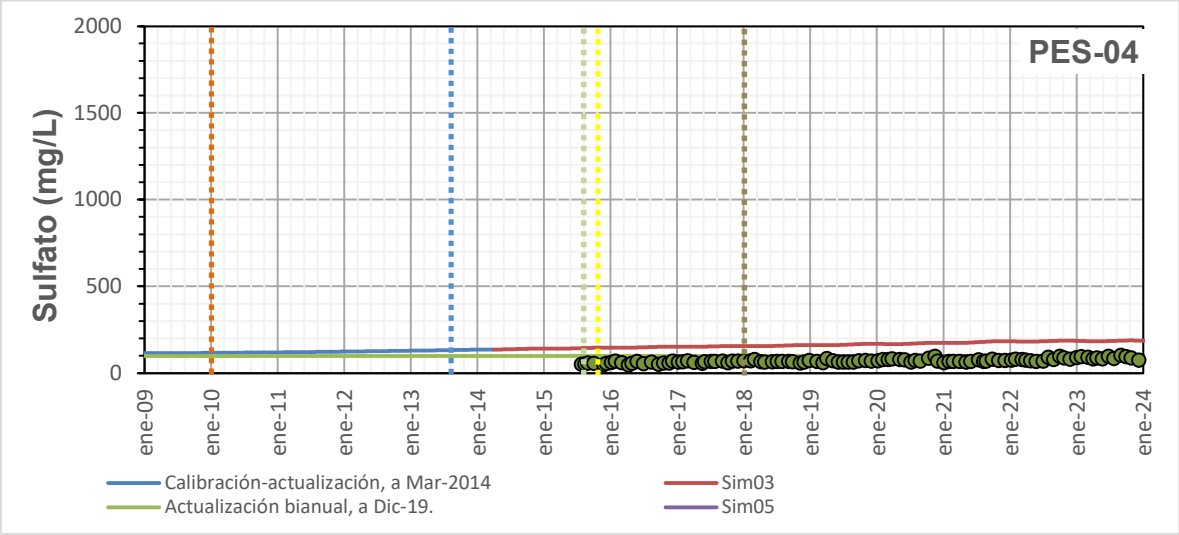


Tabla 7.1: Valores de concentración de sulfatos observados y simulados (Sim05), pozos de control PAT.

	G-02 mg/l		G-03 mg/l		G-05 mg/l		G-11 mg/l		G-12 mg/l		PB-3 mg/l		PES-01 mg/l		PES-03 mg/l		PES-04 mg/l	
	OBS	SIM	OBS	SIM	OBS	SIM	OBS	SIM	OBS	SIM	OBS	SIM	OBS	SIM	OBS	SIM	OBS	SIM
2023-1	213	356	103	100	168	127	83	140	566	188	142	254	*	253	309	174	91	100
2023-2	206	356	89	100	170	126	82	139	222	188	129	255	*	249	314	172	96	100
2023-3	191	356	92	100	150	126	72	138	159	188	133	257	*	245	248	170	92	100
2023-4	192	356	91	100	163	125	70	137	102	188	110	259	*	244	272	169	84	100
2023-5	205	356	101	100	145	125	88	135	68	189	135	260	*	243	254	168	89	100
2023-6	194	356	96	100	132	124	66	134	97	189	113	262	*	242	236	167	83	100
2023-7	162	356	91	100	125	124	69	133	93	189	123	264	369	241	184	165	99	100
2023-8	185	356	84	100	157	123	62	132	99	190	135	265	374	240	242	164	86	100
2023-9	167	356	104	100	180	123	70	131	92	191	111	267	327	239	175	163	104	100
2023-10	194	355	90	100	164	123	70	130	79	192	222	269	355	236	225	161	97	100
2023-11	211	355	97	100	134	122	73	129	72	193	258	271	338	232	206	159	90	100
2023-12	199	355	94	100	121	122	67	128	67	194	141	273	311	229	209	157	76	100

Tabla 7.2: Cálculo de la diferencia entre concentraciones observadas y simuladas, expresada como porcentaje de la variación máxima observada registrada en el pozo.

OBSMAX-OBSMIN → (2009-2023)	396	81	605	721	1034	221	313	453	50
Mes	G02 %	G03 %	G05 %	G11 %	G12 %	PB3 %	PES01 %	PES03 %	PES04 %
2023-1	-36	4	7	-8	37	-51	*	28	-16
2023-2	-38	-14	7	-8	3	-57	*	29	-7
2023-3	-42	-10	4	-9	-3	-56	*	16	-14
2023-4	-41	-11	6	-9	-8	-67	*	21	-29
2023-5	-38	1	3	-7	-12	-57	*	18	-20
2023-6	-41	-5	1	-9	-9	-67	*	14	-30
2023-7	-49	-11	0	-9	-9	-64	41	4	-2
2023-8	-43	-20	6	-10	-9	-59	43	16	-25
2023-9	-48	5	9	-8	-10	-71	28	2	7
2023-10	-41	-12	7	-8	-11	-21	38	13	-5
2023-11	-36	-4	2	-8	-12	-6	34	10	-18
2023-12	-39	-7	0	-8	-12	-60	26	11	-43

5) Evaluación de la existencia de desviaciones significativas entre las respuestas observadas y simuladas.

De acuerdo con el punto 5 del considerando 11.3.3 de la Res. Exe. 204/2015, *esta evaluación se basa en los resultados del punto anterior. La realización de las acciones indicadas en los dos puntos a continuación se llevará a cabo si se determina, a juicio de la DGA, que existen desviaciones significativas y, por lo tanto, que es posible seguir refinando el modelo numérico*.

6) Investigaciones de los posibles refinamientos del modelo numérico y la revisión de los impactos estimados

De acuerdo con el punto 6 del considerando 11.3.3 de la Res. CE RM Exe. 204/2015, "*Sobre la base de la comparación de las respuestas observadas y simuladas, se desarrollarán e implementarán refinamientos del modelo numérico. En esta etapa del proceso se efectuarán los refinamientos de las estimaciones de los parámetros cruciales, tales como permeabilidades, coeficiente de almacenamiento y dispersividad*".

Es así como de acuerdo con el punto 5 de dicho considerando 11.3.3 de la Res. Exe CE 204/2015; *La realización de las acciones indicadas en los dos puntos a continuación se llevará a cabo si se determina, a*

juicio de la DGA, que existen desviaciones significativas y, por lo tanto, que es posible seguir refinando el modelo numérico.

Respecto de estas acciones, el titular, ha desarrollado de manera regular la revisión del modelo hidrogeológico, el cual se realizaba originalmente a través de dos modelos de simulación: Modelo Ovejería que es extendido al valle de la cuenca Chacabuco a través de un empalme. Como parte de la revisión bianual realizada al cierre del año 2017, se propuso unificar ambos dominios de modelación a objeto de disponer de un único modelo para el sistema, que eliminara posibles rigideces que existían en la transferencia entre ambos modelos del comportamiento local en las zonas de empalme; así como robustecer la caracterización y simulación de masas de aguas claras de infiltración remanente presentes antes de la implementación de las medidas de control principales.

Así, en la revisión del modelo bianual realizada al cierre del año 2019, se realizó la unificación de ambos modelos de simulación en uno solo, actualizando a su vez con nueva data capturada, en particular proveniente de estratigrafías de las obras construidas como parte del PSyCI, de su operación (caudales reales), de meteorología y de monitoreo de aguas. Este modelo unificado, calibrado con datos a dic-18 y proyectado a partir de ene-19 con datos reales a diciembre de 2021, logra en términos generales la eliminación de las posibles rigideces que existían en la modelación original por transferencia entre dos modelos del comportamiento local en las zonas de empalme, robusteciendo así la caracterización y simulación de las masas de aguas claras de infiltración remanente presente antes de la implementación de las medidas de control principales.

El modelo actualizado reproduce adecuadamente las tendencias en la evolución de la dinámica de niveles de aguas subterráneas y de la concentración de sulfatos, particularmente esa proyección guarda muy buena correlación para la fase de calibración en la zona de aguas abajo de la barrera hidráulica, principal foco de salida potencial de las aguas infiltradas del tranque; siendo desde ese punto de vista una herramienta satisfactoria para evaluar el efecto de las medidas implementadas sobre el sistema acuífero, así como medidas adicionales para ese control.

Los antecedentes de concentración de sulfatos de pozos APR ubicados en el valle central de la cuenca Chacabuco-Polpaico, se han incluido en el Anexo 4.

Respecto a niveles, se incluirán en el Informe Anual del Programa de Monitoreo y Seguimiento individualizado en el considerando 11.2.7 de la Res. Exe. 204/2015.

8 CONCLUSIONES

- Se han presentado los resultados del monitoreo realizado el *año 2023* de la calidad del agua en la totalidad de los pozos de control PAT, para el seguimiento de las infiltraciones de aguas claras del tranque de relaves, de acuerdo a lo establecido en la Res. Exe. CE RMS N°204/2015.

- A través de dichos resultados se ha realizado la verificación de la evolución de las condiciones comprometidas para identificar desviaciones respecto de las proyecciones estimadas de la calidad del agua, lo cual permite concluir lo siguiente:

  - En el caso de los **pozos de control asociados al APR Huechún**:

    - Los pozos de control PES-02, G-03 y PB-3 correspondientes a los pozos de control hacia el APR Huechún, el percentil 50% de 6 meses de la concentración de sulfatos se encuentra bajo los umbrales establecidos en la Res. Exe. CE RMS N°204/2015 según proyección.

  - En el caso de los **pozos de control asociados a los APRs Santa Matilde y Punta Peuco**:

    - Los pozos de control hacia los APRs Santa Matilde y Punta Peuco, para el año 2023 el P50 6M de la concentración de sulfatos se mantuvo bajo los umbrales establecidos en la Res. Exe. CE RMS N°204/2015 según proyección. Se detectó prontamente una desviación en el pozo de G-12 que fue corregida en forma oportuna.

  - Respecto a los **pozos APR con pozos de control PAT asociado**:

    - La calidad del agua no ha tenido alteración durante el presente año, según se ha constatado a través de monitoreo dedicado a APRs parte de los Informes Trimestrales del año 2023 correspondientes a Programa de Monitoreo y Seguimiento. Es así como dichos resultados indican que la calidad del agua de los tres pozos de abastecimiento actual APR- APR Huechún, APR Santa Matilde y APR Serv. Punta Peuco - cumple en su totalidad con la Nch 409 Of.1/2005 para consumo de agua potable.

    - Respecto al percentil 50% de los últimos 12 meses de los resultados del análisis de concentración de sulfatos como indicador principal de la presencia de aguas claras del tranque en las aguas subterráneas, los cuales se incluyen en el Anexo 4; en los pozos de abastecimiento actual APR Huechún y APR Santa Matilde, los resultados muestran valores bajo 119 mg/l.

    - En el caso del pozo de abastecimiento actual APR Punta Peuco, que desde septiembre de 2018 había mantenido valores sobre el umbral anteriormente indicado, durante el primer semestre 2023 se verificó por primera vez desde entonces un valor de percentil 50% de los últimos 12 meses consecutivos fue inferior a 119 mg/l, registrándose un valor de 113 mg/l. Durante este período, si bien se verificaron concentraciones de sulfato mayores a 119 mg/l

entre julio y noviembre de 2023, el percentil se ha mantenido bajo el límite establecido. Es por esto, y en espera de la estabilización de los niveles de sulfato en el largo plazo, se mantiene la medida prevista en la Res. Exe. RMS N° 204 en su considerando 11.1.3 Medida Adicional: Tratamiento de Agua en Sistemas de Agua Potable Rural.

- Cabe indicar que el valor 119 mg/l corresponde a un valor calculado como valor basal, encontrándose muy por debajo del valor establecido por la normativa chilena para su consumo como agua potable de 500 mg/l, según la Nch409-1Of.1/2005.

- No obstante lo anterior, es necesario destacar que de acuerdo con el monitoreo dedicado a APRs, el pozo APR Serv. Punta Peuco, tal como los APR Huechún y Santa Matilde, mantienen pleno cumplimiento con la Nch 409/1. Of. 2005 de requisitos para agua potable.

9 REFERENCIAS

- RCA 275-B/94 de fecha 04 de marzo de 1994, que resuelve sobre Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto “Sistema de Disposición de Relaves a Largo Plazo-Proyecto Embalse Ovejería”.
- Res. Exe. Exenta SMA 204/2015 de fecha 08 de mayo de 2015, que Resuelve Proceso de Revisión de la Resolución de Calificación Ambiental N° 275-B/19941, Proyecto “Sistema de Disposición de Relaves a Largo Plazo: Proyecto Embalse Ovejería, conforme a lo dispuesto en el Artículo 25 Quinquies de la Ley N° 19.300.
- Informe Anual Plan de Alerta Temprana. Año 2015. Codelco- División Andina. Febrero de 2016.
- Informe Anual Plan de Alerta Temprana. Año 2016. Codelco- División Andina. Febrero de 2017.
- Informe Anual Plan de Alerta Temprana. Año 2017. Codelco- División Andina. Febrero de 2018.
- Informe Anual Plan de Alerta Temprana. Año 2018. Codelco- División Andina. Febrero de 2019.
- Informe Anual Plan de Alerta Temprana. Año 2019. Codelco- División Andina. Febrero de 2020.
- Informe Anual Plan de Alerta Temprana. Año 2020. Codelco- División Andina. Febrero de 2021.
- Informe Bianual. Revisión del Modelo de Simulación Hidrogeológica a diciembre de 2019. Febrero 2020.
- Informe Anual Plan de Alerta Temprana. Año 2021. Codelco- División Andina. Febrero de 2022.
- Informe Bianual. Revisión del Modelo de Simulación Hidrogeológica a diciembre de 2021. Febrero 2022.
- Informe Anual Plan de Alerta Temprana. Año 2022. Codelco- División Andina. Febrero de 2023.

ANEXOS