



# Informe Técnico

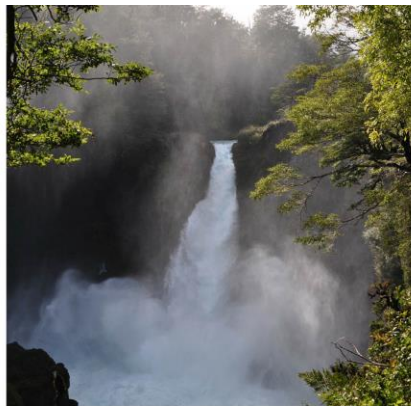
Situación Hidrogeológica Sector Alcaparrosa  
Efectos Hidrogeológicos Socavón sobre  
Acuífero Copiapó

**INFORME REV 0**

PREPARADO PARA

**minera**  
**Ojos del Salado**  
a subsidiary of **lundin mining**

Noviembre de 2023



# **Informe Técnico**

## **Situación Hidrogeológica Sector Alcaparrosa**

### **Efectos Hidrogeológicos Socavón sobre Acuífero**

#### **Copiapó**

Código de Proyecto: 2020-267-ALCA



Carlos Espinoza Contreras  
Ingeniero Civil, Ph.D.

#### **HIDROGEOLOGIA y MEDIO AMBIENTE SUSTENTABLE LTDA**

Suecia 211, Oficina 701-A, Providencia - Santiago Chile

e-mail: [contacto@hidromas.cl](mailto:contacto@hidromas.cl)

website: [www.hidromas.cl](http://www.hidromas.cl)

Tel: +(56-2) 232027540

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1	Aspectos Generales .....	1
1.2	Alcances del Informe .....	1
<b>2</b>	<b>OCURRENCIA DEL SOCAVÓN EN SECTOR ALCAPARROSA .....</b>	<b>2</b>
2.1	Ubicación del Área de Estudio .....	2
2.2	Ocurrencia del Socavón en Sector Alcaparrosa .....	4
2.3	Medidas de Cierre Conexión Socavón y Caserones Mina Alcaparrosa .....	7
2.3.1	Muros o Sellos de Contención .....	7
2.3.2	Inicio del Efecto de Sellado de la Conexión Hidrogeológica Generada por Socavón.....	8
2.4	Efecto del Socavón sobre la Morfología del Acuífero .....	11
<b>3</b>	<b>EFFECTOS SOBRE CANTIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>12</b>
3.1	Contexto General .....	12
3.2	Red de Monitoreo de Niveles de Agua Subterránea.....	12
3.3	Niveles de Agua Subterránea Sector de Interés.....	16
3.3.1	Niveles de Agua Subterránea y su Situación Histórica .....	16
3.3.2	Niveles Freáticos Posteriores a la Ocurrencia del Socavón.....	20
3.3.3	Tasas de Cambio de los Niveles Freáticos Pre y Post-Socavón .....	24
3.4	Caudales de Infiltración a la Mina Subterránea .....	30
3.4.1	Información Histórica a Nivel Mensual .....	30
3.4.2	Información de Caudales a Nivel Diario Post-Socavón.....	31
3.4.3	Volumen Drenado hacia Mina Subterránea debido a Conexión Hidrogeológica por Socavón.....	32
3.4.4	Volumen Acumulado en Sector Mina Alcaparrosa .....	35
3.5	Efectos Socavón sobre el Agua Subterránea en el Acuífero de Copiapó .....	35
3.5.1	Efecto General sobre los Niveles de Agua Subterránea en Sector Alcaparrosa. ....	35
3.5.2	Efecto sobre los Pozos para Consumo de Agua Potable.....	35
3.5.3	Propagación del Cono de Descenso debido al Efecto del Socavón .....	38
3.5.4	Efecto sobre el Flujo Pasante a Sector Paipote .....	40
3.5.5	Efecto sobre Pozos de Terceros .....	44
3.6	Efecto sobre la Disponibilidad de Agua Subterránea del Acuífero de Copiapó.....	46
<b>4</b>	<b>EFFECTOS SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ACUÍFERO .....</b>	<b>48</b>
4.1	Contexto General .....	48
4.2	Red de Monitoreo de Calidad del Agua Subterránea .....	49
4.3	Calidad del Agua Subterránea en Pozo 12 y su Entorno (Grupo de Monitoreo WB-2).....	49

4.4	Calidad del Agua Subterránea en Pozo 12, Grupo de Monitoreo WB-2 e Interior Mina (Niveles 200, 270 y 90) .....	54
4.4.1	Aspectos Generales.....	54
4.4.2	Evolución Temporal Parámetros Claves .....	54
4.5	Evolución Futura Calidad del Agua Subterránea en el Sector Acuífero cercano al Socavón .....	56
4.6	Conclusiones Preliminares Sobre la Calidad el Agua Subterránea en el Sector Alcaparrosa .....	58
<b>5</b>	<b>EFFECTOS SOBRE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DEL ACUÍFERO .....</b>	<b>59</b>
5.1	Contexto General .....	59
5.2	Servicios Ecosistémicos del Acuífero de Copiapó en el Contexto de los Efectos Derivados del Socavón .....	59
5.3	Efectos Socavón (Subsidencia) sobre los Servicios Ecosistémicos Acuífero Copiapó.....	60
5.3.1	Efecto sobre la Disponibilidad de Agua Subterránea del Acuífero de Copiapó .....	60
5.3.2	Efecto sobre la Calidad el Agua Subterránea en el Sector Alcaparrosa.....	61
5.3.3	Efecto sobre los Pozos de Terceros y para Consumo de Agua Potable .....	62
<b>6</b>	<b>PLAN DE MONITOREO Y SEGUIMIENTO SECTOR ALCAPARROSA.....</b>	<b>63</b>
6.1	Contexto General .....	63
6.2	Puntos de Monitoreo .....	63
6.3	Programas de Monitoreo.....	66
6.3.1	Programa de Monitoreo Mensual Alcaparrosa (PMMA).....	66
6.3.2	Programa de Monitoreo Isotópico Trimestral Alcaparrosa (PMITA).....	67
6.3.3	Programa de Monitoreo con Perfilaje Vertical Trimestral (PMPVT) .....	67
6.4	Reportabilidad del Monitoreo .....	68
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES Y COMENTARIOS .....</b>	<b>69</b>
7.1	Comentarios Generales.....	69
7.2	Conclusiones sobre Temas de Cantidad de las Aguas Subterráneas.....	71
7.3	Conclusiones sobre Temas de Calidad de las Aguas Subterráneas.....	72
7.4	Conclusiones sobre los Servicios Ecosistémicos del Acuífero .....	73
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>74</b>
8.1	Referencias Públicas Generales .....	74
8.2	Informes Servicios Públicos sobre Sector Socavón Alcaparrosa .....	75
8.3	Proceso Candelaria y Consejo Defensa del Estado .....	75
8.4	Informes Socavón Alcaparrosa .....	75

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 2-1: Ubicación General Área de Estudio.....	2
Figura 2-2: Ubicación del Socavón y Pozos de Monitoreo en Áreas Cercana .....	3
Figura 2-3: Vista Condición Pre y Post Socavón .....	4
Figura 2-4: Esquema General Socavón Sector Alcaparrosa .....	5
Figura 2-5: Sección Transversal en Socavón y Efecto Intercepción de Agua desde el Acuífero.....	6
Figura 2-6: Escurrimiento de Agua Interior Mina Subterránea.....	6
Figura 2-7: Ubicación Esquemática Interior Mina Subterránea y Sellos.....	7
Figura 2-8: Ubicación Esquemática Muros en Sector Mina Alcaparrosa.....	8
Figura 2-9: Ubicación Esquemática Llenado Sector Gaby y Socavón .....	9
Figura 2-10: Comportamiento de los niveles post evento socavón y post sellado a julio de 2023 (sensores Nv 200) .....	10
Figura 3-1: Ubicación Regional Pozos de Observación Minera Candelaria .....	14
Figura 3-2: Ubicación Pozos de Observación Sectores Alcaparrosa y Tierra Amarilla.....	15
Figura 3-3: Caudales de Bombeo Mensuales para Sector Minero .....	17
Figura 3-4: Caudales de Bombeo Mensuales para Sector Agua Potable .....	17
Figura 3-5: Evolución de Niveles de Agua Subterránea en Pozos de Alcaparrosa y Tierra Amarilla .....	19
Figura 3-6: Evolución de Niveles de Agua Subterránea en Pozos de Paipote.....	19
Figura 3-7: Variación de Niveles de Agua Subterránea en Pozos de Monitoreo Alcaparrosa .....	21
Figura 3-8: Variación de Presión en Pozo de Monitoreo HA-02 Alcaparrosa.....	21
Figura 3-9: Variación de Niveles de Agua Subterránea en Pozos de Monitoreo Tierra Amarilla .....	22
Figura 3-10: Variación de Niveles de Agua Subterránea en Pozos de Monitoreo Palermo .....	22
Figura 3-11: Variación de Niveles de Agua Subterránea en Pozos de Monitoreo Paipote .....	23
Figura 3-12: Variación Histórica de Niveles de Agua Subterránea en Pozo de Monitoreo 15 (Paipote) ...	23
Figura 3-13: Presión y Cambio Tasas de Presión Pozo HA-02.....	26
Figura 3-14: Niveles Freáticos y Tasas de Descensos Pozos 8, 12, 14 y HA-01.....	27
Figura 3-15: Niveles Freáticos y Tasas de Descensos Pozos 2, 3, 5 y 6.....	28
Figura 3-16: Niveles Freáticos y Tasas de Descensos Pozos 2, 3, 5 y 6; Pozos 8, 12, 14 y HA-01.....	29
Figura 3-17: Caudal Alumbrado Mina Subterránea Pre-Socavón (nivel mensual).....	30
Figura 3-18: Caudal Observado Mina Alcaparrosa Post Socavón (nivel diario).....	31
Figura 3-19: Volumen de Infiltraciones Netas Conducidas a Sector Inferior Mina (VAD) .....	33
Figura 3-20: Volumen de Infiltraciones Conducidas a Planta PAC (VAB).....	33
Figura 3-21: Volumen de Agua Encapsulada en Caserones y sector Socavón (VAI).....	34

Figura 3-22: Evolución de los niveles históricos en acuífero de Copiapó y rango del acuífero en periodo afectado por el socavón .....	36
Figura 3-23: Niveles Freáticos Pozos de Monitoreo Tierra Amarilla y Alcaparrosa.....	36
Figura 3-24: Ubicación Pozos de Bombeo para Agua Potable.....	37
Figura 3-25: Variación de Niveles de Agua Subterránea en Pozos de Monitoreo Paipote .....	38
Figura 3-26: Evolución Cono de Depresión Asociado al Socavón .....	39
Figura 3-27: Secciones de Flujo Pasante Aguas Abajo del Socavón.....	41
Figura 3-28: Caudales Pasantes en Secciones 1 y 2. Casos Con Socavón y Sin Socavón.....	42
Figura 3-29: Modelo Conceptual SERNAGEOMIN situación Socavón. ....	43
Figura 3-30: Pozos de Bombeo Registrados en el Monitoreo de Extracciones Efectivas.....	45
Figura 4-1: Sección Transversal en Socavón y Dirección de Flujo desde el Acuífero .....	48
Figura 4-2: Ubicación Red de Monitoreo de Calidad del Agua y Socavón .....	50
Figura 4-3: Concentración Histórica de Sulfato Pozo 12 y Grupo de Monitoreo WB-2 .....	51
Figura 4-4: Concentración de Sulfato Pozo 12 y Grupo de Monitoreo WB-2 (2020 a la fecha).....	51
Figura 4-5: Variación Histórica de pH en Pozo 12 y Grupo de Monitoreo WB-2.....	52
Figura 4-6: Variación de pH en Pozo 12 y Grupo de Monitoreo WB-2 (2020 a la fecha).....	52
Figura 4-7: Variación Histórica de CE en Pozo 12 y Grupo de Monitoreo WB-2.....	53
Figura 4-8: Variación de CE en Pozo 12 y Grupo de Monitoreo WB-2 (2020 a la fecha) .....	53
Figura 4-9: Concentración de Sulfato Pozo 12 y Sector Interior Mina.....	55
Figura 4-10: Variación de pH en Pozo 12 y Sector Mina .....	55
Figura 4-11: Variación de CE Laboratorio en Pozo 12 y Sector Mina .....	56
Figura 4-12: Perfil Conceptual Sector Socavón y Mina Alcaparrosa .....	57
Figura 6-1: Ubicación Pozos de Monitoreo Existentes y Propuestos .....	65

#### LISTADO DE TABLAS

Tabla 3-1: Pozos de Red de Monitoreo Compañía Minera Candelaria .....	12
Tabla 3-2: Efectos Sobre Terceros, Pozos del MEE (2022) .....	44
Tabla 6-1: Pozos de Monitoreo Existentes.....	63
Tabla 6-2: Pozos de Monitoreo Propuestos.....	64
Tabla 6-3: Resumen Puntos de Monitoreo Plan de Monitoreo y Seguimiento Alcaparrosa.....	64
Tabla 6-4: Parámetros Análisis Calidad de Agua PMMA.....	67

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Aspectos Generales

Este documento ha sido desarrollado por HIDROMAS a solicitud de Compañía Contractual Minera Ojos del Salado (CCMO), con el objeto de determinar - a partir de la información existente - los posibles efectos en cuanto a temas asociados a cantidad y calidad de aguas subterráneas en el acuífero del río Copiapó, considerando la influencia del socavón que se produjo en el área.

Con fecha 30 de Julio de 2022 se produjo un socavón tipo “sinkhole” en el área de Alcaparrosa, próximo a la mina subterránea Alcaparrosa. Este socavón se desarrolla en el relleno sedimentario del Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común 4 (SHAC 4) del acuífero de Copiapó por sobre la actividad minera subterránea que se desarrolla en el Caserón Gaby 4.

Para este análisis de efectos sobre componentes hidrogeológicas como cantidad (niveles del agua subterránea y caudales pasantes, por ejemplo), así como calidad del agua subterránea, se han tenido en consideración la información histórica de niveles de agua subterránea en dicho sector, así como toda la información de seguimiento que se ha generado a raíz de diversos requerimientos de la autoridad (SMA, DGA y SERNAGEOMIN).

En este contexto es importante señalar que, en el área en que ocurrió el socavón, hasta el año 2020 se observó una recuperación continua de los niveles freáticos del acuífero debido a la recarga natural que se generó a partir de los importantes eventos hidrológicos ocurridos en los años 2015 y 2017, para posteriormente comenzar una reducción debido – muy posiblemente – a la intensificación de los bombeos en el área y a la condición de menor recarga en los años posteriores al 2017. Esta disminución continua de los niveles del agua subterránea en el sector acuífero cercano al socavón se vio intensificada durante el período en que en el cual el área del socavón se encontró hidrogeológicamente conectado con el área de la mina subterránea.

Con posterioridad a la construcción de muros que permitieron sellar sectores de la mina subterránea se logró contener el efecto de esta conexión hidrogeológica, de tal manera que los niveles de agua subterránea en pozos del entorno (y que dieron cuenta inicialmente de los efectos del socavón) comenzaron paulatinamente a recuperar las tendencias de descenso que se observaban con anterioridad a Julio de 2022.

Desde el punto de vista de la calidad de aguas, se cuenta con la data histórica del acuífero monitoreada y comprometida para los compromisos ambientales de Compañía Contractual Minera Candelaria (CCMC), la que se ha utilizado para contrastarla con información de calidad posterior a la ocurrencia del socavón tanto en el mismo sector acuífero, así como de las aguas subterráneas que han migrado hacia el interior de la mina subterránea.

### 1.2 Alcances del Informe

En este informe se presentan las siguientes secciones, cuyo objetivo es abordar la situación del acuífero de Copiapó, antes y luego de la ocurrencia del socavón, incluyendo el efecto de medidas para el control y manejo de la conexión hidrogeológica producida entre el acuífero de Copiapó y los caserones de la mina subterránea de Alcaparrosa, debido a la ocurrencia del socavón:

- Descripción conceptual de la situación del socavón y sus efectos sobre el entorno
- Efectos sobre la Cantidad de las Aguas Subterráneas en el acuífero de Copiapó
- Efectos sobre la Calidad de las Aguas Subterráneas en el acuífero de Copiapó
- Efectos sobre los servicios ecosistémicos del acuífero de Copiapó

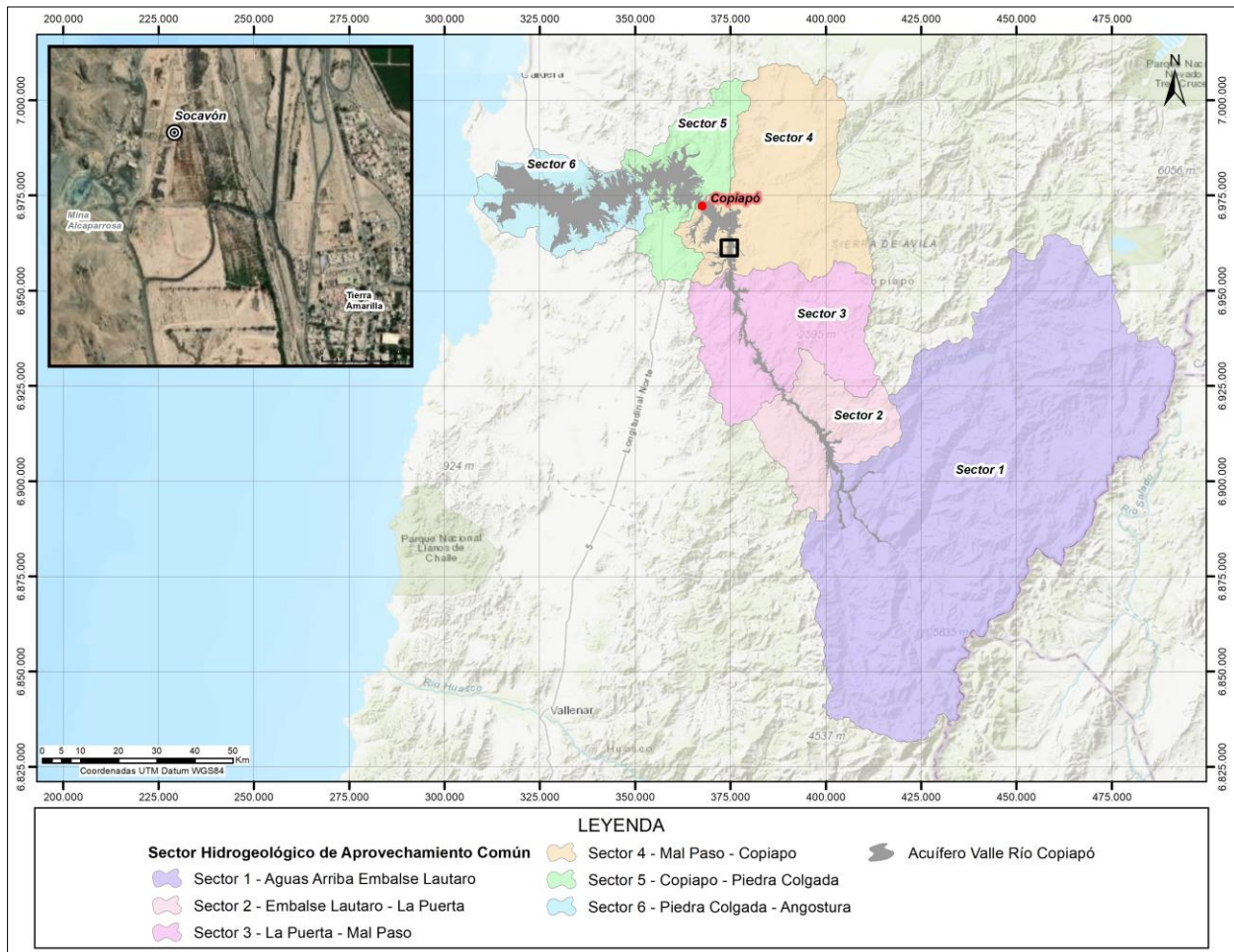


## 2 OCURRENCIA DEL SOCAVÓN EN SECTOR ALCAPARROSA

### 2.1 Ubicación del Área de Estudio

El área de interés para el análisis de la situación del socavón en el sector de Alcaparrosa se localiza en el acuífero de Copiapó, en la región de Atacama, y en particular en el denominado Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común 4 (SHAC 4 o Sector 4). En la Figura 2-1 se muestra la ubicación general del Sector 4 en el contexto del acuífero de Copiapó y la ubicación aproximada del área de Alcaparrosa.

**Figura 2-1: Ubicación General Área de Estudio**



Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en la Figura 2-2 muestra la posición del socavón respecto de la ubicación del Pozo 12 de Alcaparrosa, que cuenta con una extensa data de información histórica de niveles y calidad de aguas subterráneas. El pozo 12 se ubica a una distancia aproximada de 400 m aguas arriba del socavón.

Adicionalmente, en la Figura 2-2 se muestran otros puntos de monitoreo que cuentan con información complementaria y que está siendo informada de manera regular a las autoridades: los pozos de monitoreo de nivel de aguas subterráneas Pozo 8, Pozo 14, HA-01 y el piezómetro de cuerda vibrante HA-02.



Todos estos puntos de monitoreo se ubican en las cercanías del socavón, y en general cuentan con información de niveles de agua subterránea (Pozos de Monitoreo) o presión (piezómetro HA-02), la que ha sido muy importante para entender la dinámica del sistema acuífero de manera histórica y poder identificar cambios observados luego de la ocurrencia del socavón y de la instalación de medidas para la contención de los efectos hidrogeológicos del socavón, que se han realizado desde esa fecha.

**Figura 2-2: Ubicación del Socavón y Pozos de Monitoreo en Áreas Cercana**



Fuente: Elaboración propia

## 2.2 Ocurrencia del Socavón en Sector Alcaparrosa

Con fecha 30 de julio de 2022, se verificó la ocurrencia de un socavón en el área de Alcaparrosa el que presenta desde la superficie una forma circular, de aproximadamente 40 metros de diámetro, tal como se aprecia en la Figura 2-3. En la Figura 2-4 se presenta un esquema con las dimensiones generales del socavón y su ubicación relativa al sector Gaby 4.

**Figura 2-3: Vista Condición Pre y Post Socavón**



Fuente: Google Earth

De acuerdo con estudios técnicos del fenómeno (VAI, 2022; Itasca, 2022), existió un desplazamiento del material hacia el Caserón Gaby 4, provocando además una entrada de agua subterránea desde esa fecha hasta mediados del mes de octubre de 2022, con un caudal aproximado de 300 L/s, los que provienen del acuífero del río Copiapó.

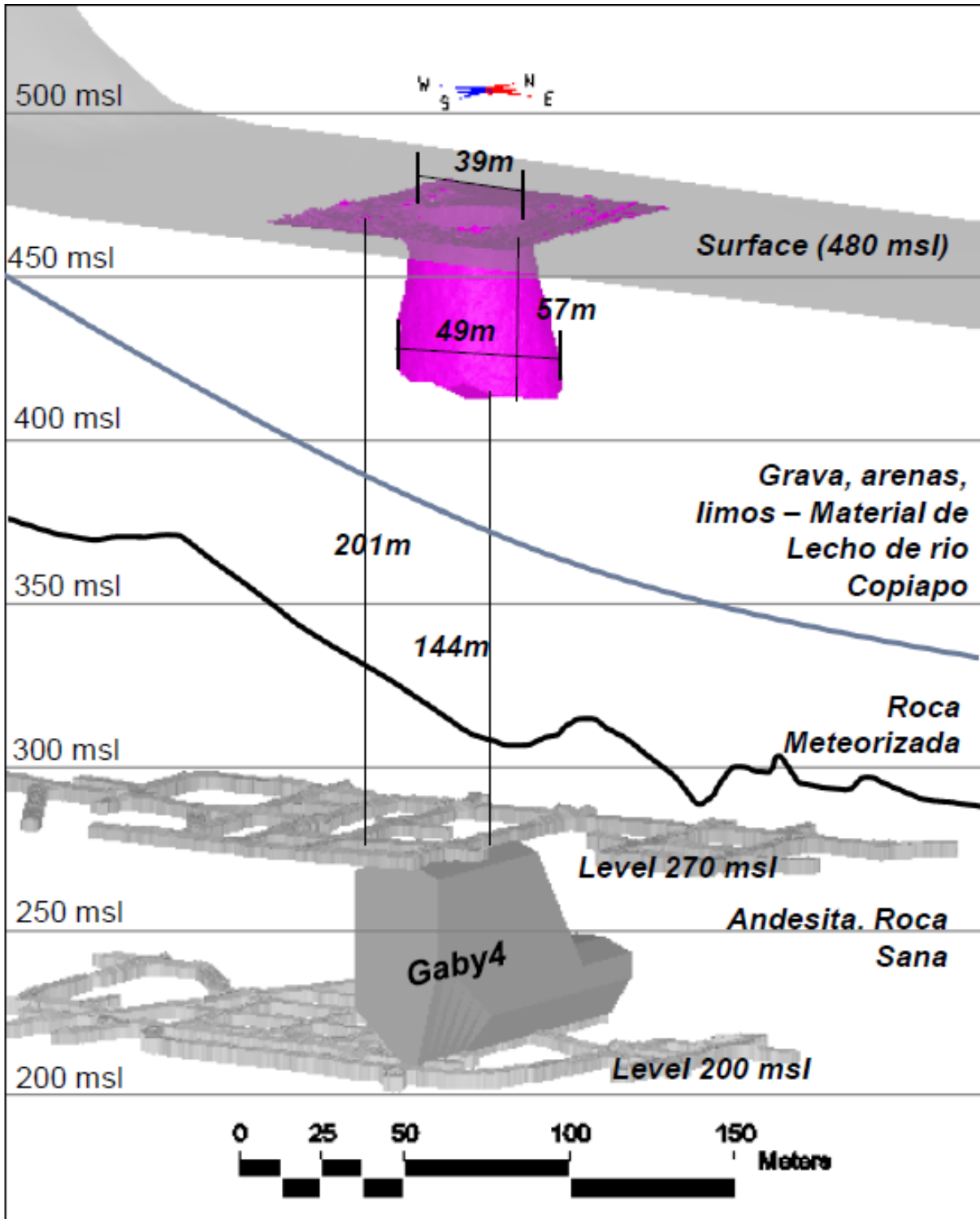
De esta forma, durante el período en que se produjo este vaciamiento de agua desde el acuífero de Copiapó hasta el sector Mina, a través del socavón, el efecto sobre el acuífero fue equivalente a tener un pozo o dren de gran diámetro, lo que genera un efecto del tipo cono de depresión en su entorno el que altera los niveles de agua subterránea debido a un fenómeno de drenaje que se extendió de manera espacial, tanto aguas arriba como aguas abajo del socavón.

Tal como se explica en la sección siguiente, esta conexión hidrogeológica original ya estaría reparada, a través de la construcción de sellos o muros de hormigón armado que permiten contener el aporte de agua original en sector limitado del área de mina, con lo cual se ha terminado el drenaje desde el acuífero.

La Figura 2-5 muestra un esquema de la zona de desplazamiento entre el socavón y el Caserón Gaby 4 a través del cual se generó la conexión entre el relleno acuífero y los caserones de la mina subterránea Alcaparrosa. En la Figura 2-6 se muestra una imagen del escurrimiento de agua al interior de la mina Alcaparrosa, el que fue controlado debido a la instalación de sellos de hormigón, los que a partir del día 16 de septiembre de 2022 comienzan a funcionar, al detenerse la operación de válvulas de drenaje, todo lo cual se confirma a través de diversos seguimientos de información técnica posteriores a dicha fecha.

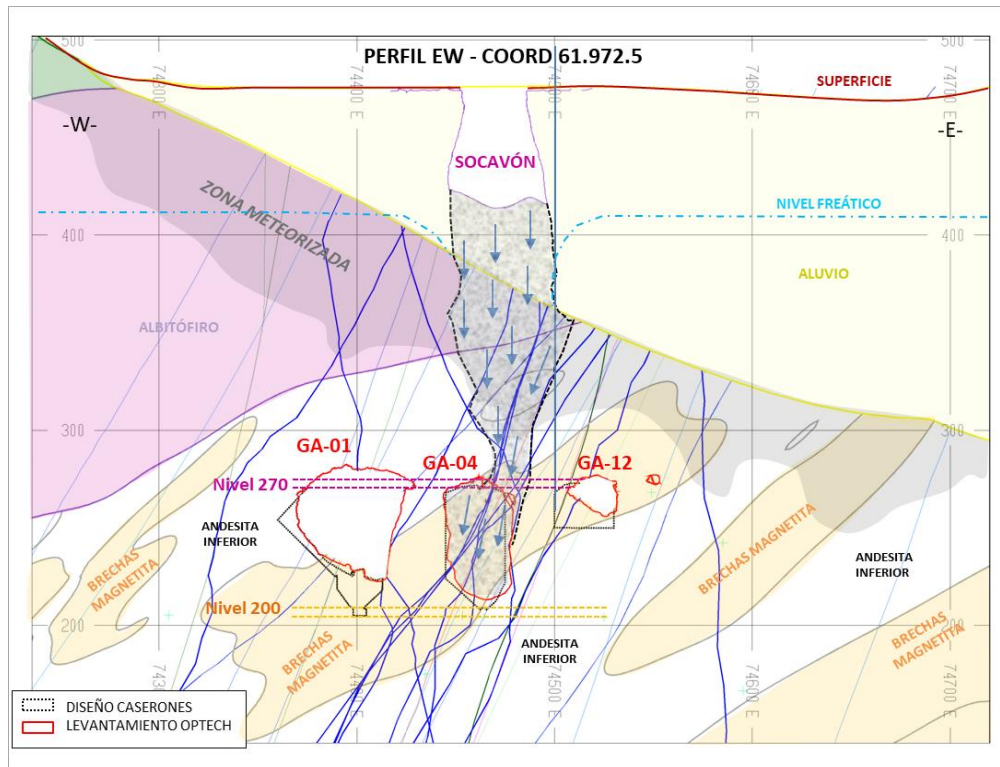


**Figura 2-4: Esquema General Socavón Sector Alcaparrosa**



Fuente: información proporcionada por CCMO

Figura 2-5: Sección Transversal en Socavón y Efecto Intercepción de Agua desde el Acuífero



Fuente: Adaptado de VAIGS (2022)

Figura 2-6: Esguerrimiento de Agua Interior Mina Subterránea



Fuente: VAIGS (2023)

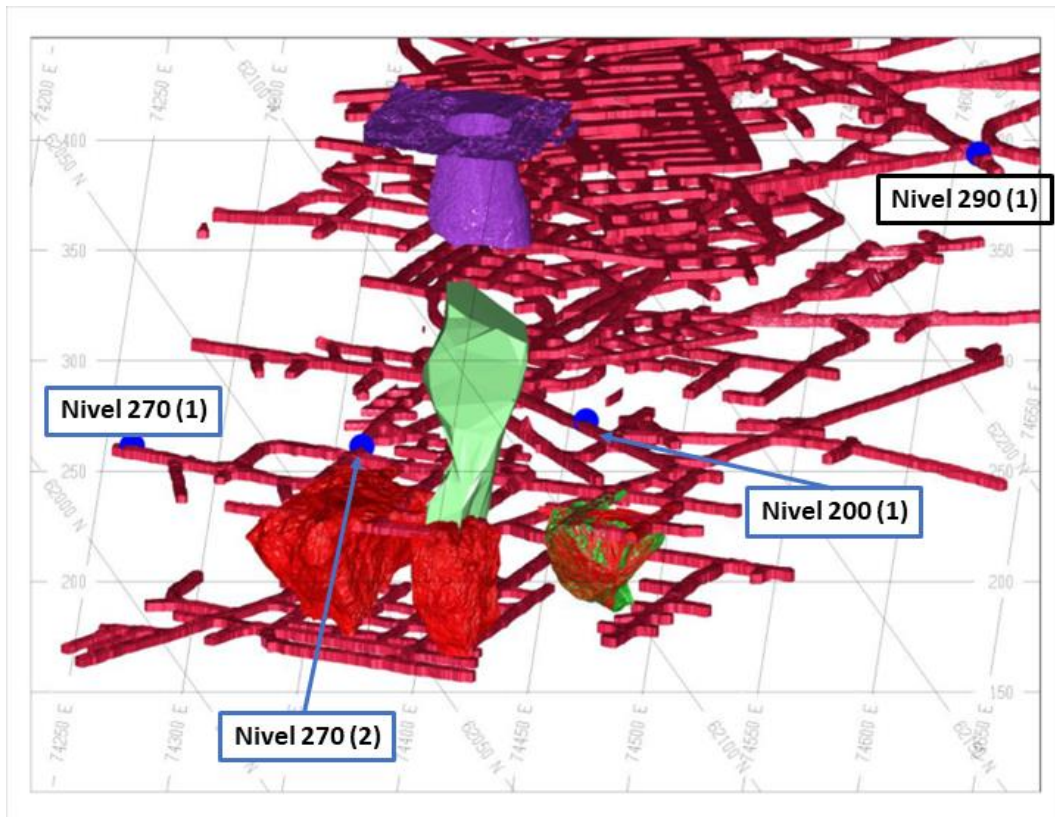
## 2.3 Medidas de Cierre Conexión Socavón y Caserones Mina Alcaparrosa

### 2.3.1 Muros o Sellos de Contención

Para contener el ingreso de aguas subterráneas al sector mina se construyeron 4 muros o sellos de hormigón armado en sectores claves de los Niveles 200 (1), 270 (2) y 290 (1) que conectan el sector de Gaby con el resto de la mina subterránea.

En la Figura 2-7 se presenta la ubicación relativa de estos sellos, cuyo objetivo principal es permitir la acumulación de aguas en un sector interior de la mina subterránea, conectada hidrogeológicamente con el socavón, y de esta forma permitir el llenado paulatino de dicho sector para presurizar nuevamente el acuífero y permitir el llenado paulatino de los niveles de agua subterránea en los pozos de monitoreo localizados alrededor del socavón.

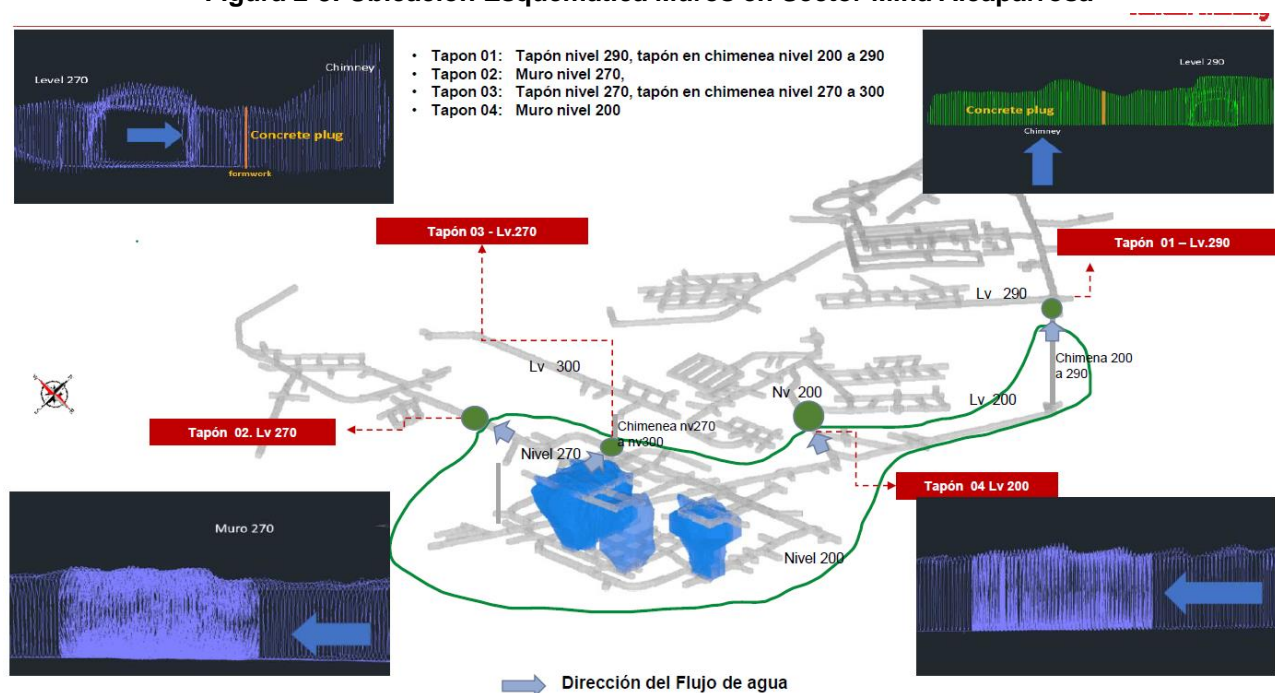
**Figura 2-7: Ubicación Esquemática Interior Mina Subterránea y Sellos**



Fuente: Modificado de VAIGS (2022)

Una visión esquemática del sistema de muros usados para el sellado del sector socavón y el área mina, se presenta en la Figura 2-8. En esta figura se indican de manera referencial la dirección del flujo de agua en cada uno de los sectores en que ellos se ubican.

Figura 2-8: Ubicación Esquemática Muros en Sector Mina Alcaparrosa



Fuente: información proporcionada por CCMO

### 2.3.2 Inicio del Efecto de Sellado de la Conexión Hidrogeológica Generada por Socavón

La instalación y construcción de estos muros o sellos de contención se llevó a cabo durante los meses de agosto y septiembre de 2022.

El día 16 de septiembre de 2022, a la 7 AM, una vez terminados los sellos y verificada su estabilidad, se detuvo el sistema de bombeo (se cerraron las válvulas) y con esto se detuvo el flujo de agua hacia el resto de la mina, por lo que paulatinamente se comenzó a llenar el sector Gaby hasta alcanzar el nivel del acuífero y a reducirse también el caudal de entrega hacia el interior de la mina subterránea, lo que se registra de manera efectiva en diversos sistemas de control instalados para dicho efecto.

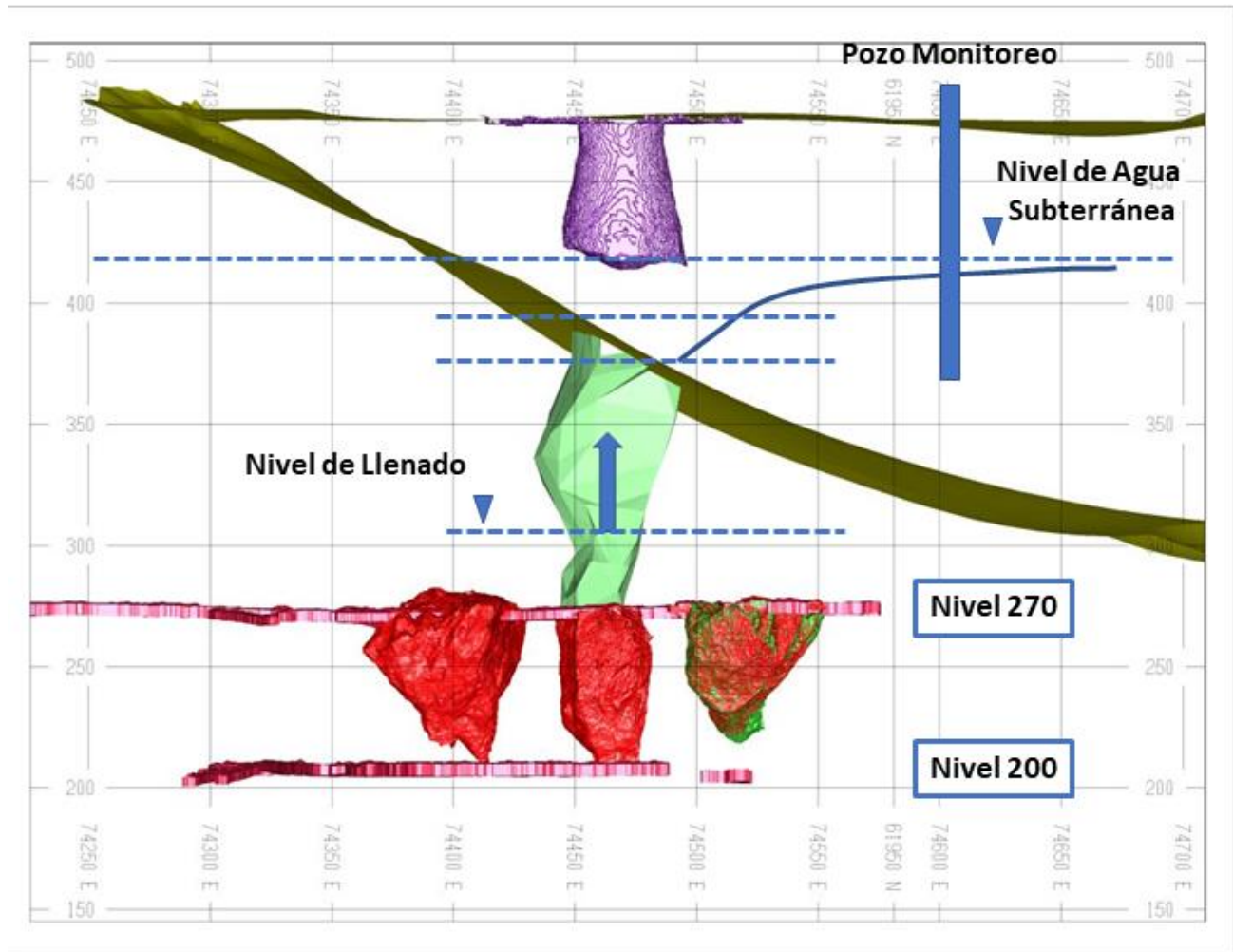
En particular, lo anterior se verifica en pozos de observación cercanos al socavón, particularmente en el Pozo 12, así como en el Pozo HA-01 y en el Piezómetro HA-02, los que con fecha 19 de octubre de 2022 comienzan a evidenciar un cambio de tendencia, opuesto a aquel observado luego de la ocurrencia del socavón.

En la Figura 2-9 se muestra un esquema que ilustra la situación planteada y que, en secciones posteriores del informe se complementa con información medida en los pozos de observación y con la información de caudales de ingreso al sector mina Alcaparrosa.

Por otra parte, en la Figura 2-10 se presenta la evolución de los niveles piezométricos en sensores instalados al interior de los caserones Gaby, en particular en el Nivel 200 (Sensor P180836\_200, Sensor P180848\_200 y Sensor VW128577\_200) que dan cuenta del aumento progresivo del nivel de agua en debido a la inundación del sector de los caserones Gaby, en la columna de material desplazado y en el sistema acuífero, entre el cierre de las válvulas en los muros (16 de septiembre de 2023) y fines de octubre (20 de octubre de 2023).

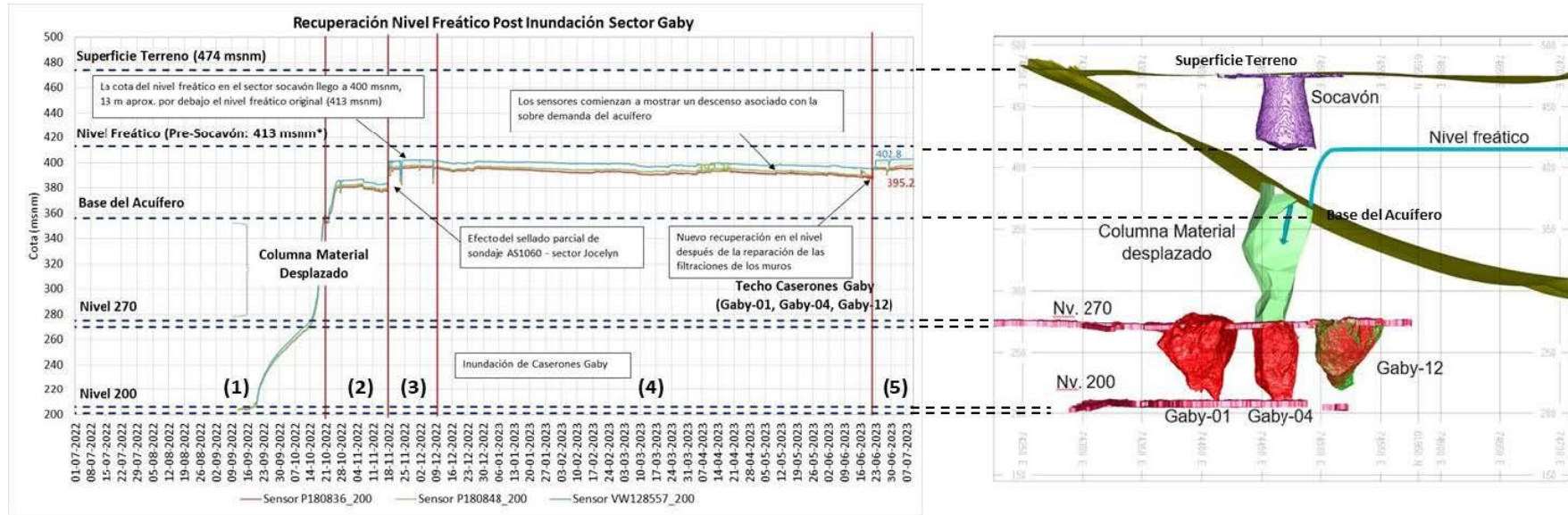


Figura 2-9: Ubicación Esquemática Llenado Sector Gaby y Socavón



Fuente: Modificado de VAIGS (2023)

**Figura 2-10: Comportamiento de los niveles post evento socavón y post sellado a julio de 2023 (sensores Nv 200)**



Fuente: Modificado de VAIGS (2023)

## 2.4 Efecto del Socavón sobre la Morfología del Acuífero

En relación al efecto del socavón sobre la estructura geológica del basamento rocoso donde se sustenta el medio que aloja las aguas subterráneas, es importante recalcar que esto es una situación particular en la zona de ocurrencia del socavón y no debe ser extendida a todo el SHAC 4.

El área que abarca la estructura geológica modificada por el socavón, y que dio origen a la conexión hidrogeológica entre el acuífero de Copiapó y el interior del área mina Alcaparrosa, se extiende a un área del orden de 1.100 m<sup>2</sup>, asociado a la descripción de los 37 m de diámetro que se identifica para el socavón.

El área del acuífero del SHAC 4 es de aproximadamente 23 Km<sup>2</sup> (23.000.000 m<sup>2</sup>), por lo que el cambio de estructura geológica que se generó es sobre aproximadamente un 0,005% de la extensión del acuífero, es decir, esta situación corresponde a un efecto muy particular y acotado espacialmente una vez que se hicieron efectivos los sellos de hormigón el 16 de septiembre de 2022, logrando la recuperación de las tasas de descenso de la condición pre-socavón.

### 3 EFECTOS SOBRE CANTIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

#### 3.1 Contexto General

En esta sección del informe se presenta información sobre la situación de variables asociadas a los temas de cantidad del agua subterránea (niveles, caudales pasantes, volúmenes acumulados, entre otros), tanto en una situación histórica previa a la ocurrencia del socavón, como también en fechas posteriores al inicio de la conexión hidrogeológica y su posterior contención.

La información que se describe en esta sección permite de manera particular visualizar la magnitud de los efectos observados durante la etapa en que la conexión hidrogeológica entre el acuífero de Copiapó y la mina Alcaparrosa se mantuvo activa, y por lo tanto se produjo el ingreso de agua hacia dicho sector.

De igual forma, es posible apreciar la evolución posterior de estas variables una vez que los muros y sellos, que se instalaron en el interior de la mina, comienzan a generar un efecto positivo en la contención de los efectos de la conexión hidrogeológica causada por el socavón.

#### 3.2 Red de Monitoreo de Niveles de Agua Subterránea

Compañía Contractual Minera Candelaria (CCMC) cuenta con una red de monitoreo de niveles de aguas subterráneas en el SHAC 4 del acuífero del río Copiapó (SHAC 4 o Sistema Hidrogeológico de Aprovechamiento Común 4), específicamente en los sectores Alcaparrosa y Paipote, cuya información ha sido puesta a disposición para estos análisis. Los pozos de monitoreo con información de niveles freáticos que CCMC registra regularmente se resumen en la Tabla 3-1.

**Tabla 3-1: Pozos de Red de Monitoreo Compañía Minera Candelaria**

Pozos	Sector	UTM - Norte (m)	UTM - Este (m)	Distancia desde Socavón (m)
Pozo 8	Alcaparrosa	6.961.084	374.564	593
Pozo 12	Alcaparrosa	6.961.292	374.529	399
Pozo 14	Alcaparrosa	6.960.814	374.632	856
Pozo HA-01	Alcaparrosa	6.961.865	374.391	279
Piezómetro HA-02	Alcaparrosa	6.961.891	374.392	303
Pozo 2A	Tierra Amarilla	6.960.851	374.496	785
Pozo 3	Tierra Amarilla	6.960.783	374.408	833
Pozo 5	Tierra Amarilla	6.960.583	374.552	1.058
Pozo 6	Tierra Amarilla	6.960.582	374.402	1.032
Pozo 10	Paipote	6.967.226	372.767	5.800
Pozo 11	Paipote	6.967.004	372.953	5.580
Pozo 15	Paipote	6.967.368	372.646	5.990
Pozo 16	Paipote	6.967.825	371.732	6.722
Pozo 9	Palermo	6.958.117	374.862	3.537
Pozo 13	Palermo	6.957.990	374.862	3.640

Fuente: Elaboración Propia

En este caso, y debido a su inclusión en compromisos de seguimiento ambiental, se dispone de registros de niveles de agua subterránea en diversos pozos de monitoreo, con información histórica que se extiende desde comienzos de los años 1990, y cuya ubicación se presenta de manera regional en la Figura 3-1 y de manera más local en la Figura 3-2.

En las figuras anteriores se han separado los pozos de monitoreo según sectores geográficos, correspondiendo los pozos de color verde al sector de Alcaparrosa (Pozo 8, Pozo 12, Pozo 14, Pozo HA-01 y Piezómetro HA-02) y los pozos de color rojo a Tierra Amarilla (Pozo 2A, Pozo 3, Pozo 5 y Pozo 6).

En sectores más alejados del área del socavón, aguas arriba del mismo, se ubican pozos de color amarillo que corresponden al sector de Palermo (Pozo 9 y Pozo 13). Finalmente, los pozos de color naranja corresponden al sector de Paipote y se ubican aguas abajo del socavón (Pozo 10, Pozo 11, Pozo 15 y Pozo 16).

Tal como se puede apreciar en las figuras anteriores, los pozos de los sectores Alcaparrosa y Tierra Amarilla permiten caracterizar el comportamiento de los niveles de agua subterránea en las proximidades del socavón ya que se encuentran en sus inmediaciones, tanto agua arriba como aguas abajo del socavón. El punto de monitoreo más cercano al socavón es el Pozo HA-01, ubicado a 280 m, mientras que el más alejado (en este sector cercano al socavón) es el Pozo 6 ubicado a 1 Km aguas arriba.

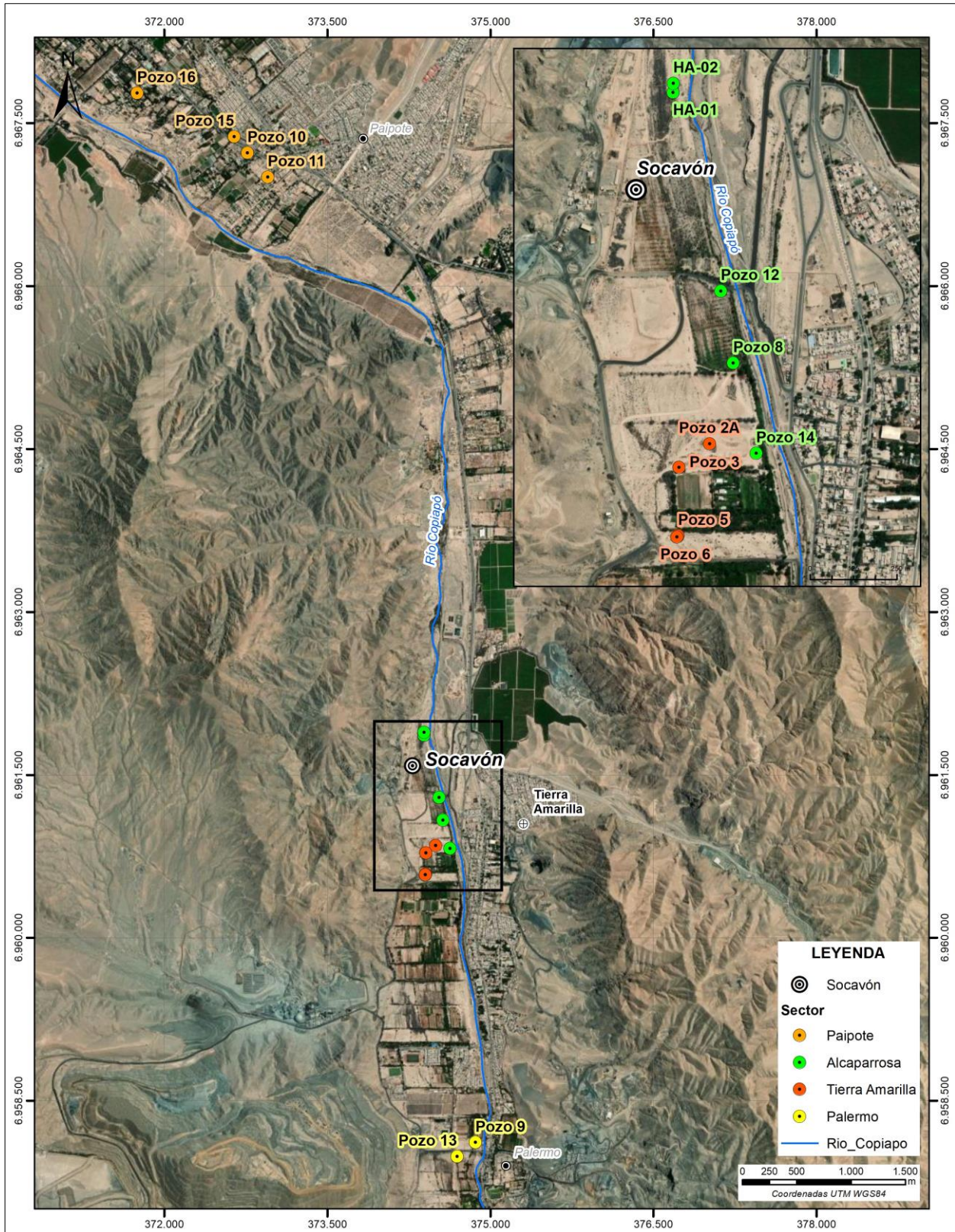
El conjunto de pozos de monitoreo utilizados para este estudio no fue diseñado de manera expresa para monitorear el efecto de una situación como el socavón, pero por su localización actual, y principalmente por la información histórica que disponen (niveles de agua subterránea), son muy buenos puntos de control o seguimiento ya que permiten poner en contexto el efecto hidráulico de la conexión hidrológica generada por el socavón entre el acuífero y el fondo del área mina, al disponer de información de detalle sobre la dinámica del acuífero. En general, la información que ha sido utilizada en estos análisis, pozos de monitoreo y datos medidos en ellos, es la misma que ha estado disponible para la autoridad en términos de los requerimientos de información que se han realizado a raíz de la situación del socavón y los estudios ambientales en períodos previos.

Lo anterior ha permitido usar la información hidrogeológica disponible, principalmente niveles de agua subterránea y calidad del agua, para poder separar los efectos propios del bombeo generado por los usuarios del sector acuífero cercano al socavón, y la situación de la conexión hidrogeológica generada por el socavón entre el relleno acuífero de Copiapó y el sector interior de la Mina Alcaparrosa.

El registro de niveles de agua subterránea con el que se cuenta tiene relación con la construcción de cada pozo. Con esto, el registro es a partir del año 1993 a la fecha para los pozos del sector Alcaparrosa (Pozo 8, Pozo 12, Pozo 14) y Tierra Amarilla (Pozo 2A), y desde 2004 a la fecha en el sector de Paipote (Pozo 10, Pozo 11, Pozo 15 y Pozo 16), por lo que la serie histórica de datos es suficiente como para observar el comportamiento de niveles de agua subterránea en la zona.



**Figura 3-1: Ubicación Regional Pozos de Observación Minera Candelaria**



Fuente: Elaboración propia



Figura 3-2: Ubicación Pozos de Observación Sectores Alcaparrosa y Tierra Amarilla



Fuente: Elaboración propia

### 3.3 Niveles de Agua Subterránea Sector de Interés

#### 3.3.1 Niveles de Agua Subterránea y su Situación Histórica

La dinámica histórica del acuífero del río Copiapó en el Sector 4, previa al año 2015, observada a través de la evolución de sus niveles de agua subterránea obedece a múltiples factores, siendo los principales la extracción de aguas (mediante bombeos autorizados sectorialmente y para diversos usuarios de tipo agua potable, agricultura y minería) que tuvo el acuífero y la menor recarga superficial por diversas intervenciones en el sistema natural.

En la Figura 3-3 se presenta un gráfico con la evolución de los caudales de bombeo estimados para uso minero en el sistema acuífero de Copiapó, la que llegó en total hasta valores cercanos a 800 L/s en el año 2008. En el caso particular del Sector 4 este caudal se estima en 600 L/s como caudal medio mensual, en su punto más alto de consumo. En lo que respecta a consumos para agua potable, estos se muestran en la Figura 3-4 para los sectores 2 a 6 y alcanzan valores mensuales de hasta 950 L/s el año 2017.

La extracción de aguas subterráneas para uso agrícola es también muy relevante en el sistema acuífero de Copiapó y varía de manera estacional en función de los requerimientos de agua para los cultivos, así como de la disponibilidad de aguas superficiales en el área.

En particular, la extracción realizada por Minera Candelaria hasta el año 2011 era de 300 L/s en promedio, luego entre 2011 a 2013 el caudal promedio extraído disminuyó a 200 L/s. A comienzos del año 2013, específicamente en el mes de mayo, entra en operación la planta desalinizadora para Candelaria, por lo que CCMC abandona la extracción de agua subterránea del Sector 4 del acuífero de Copiapó, dejando su uso sólo en casos asociados a contingencias.

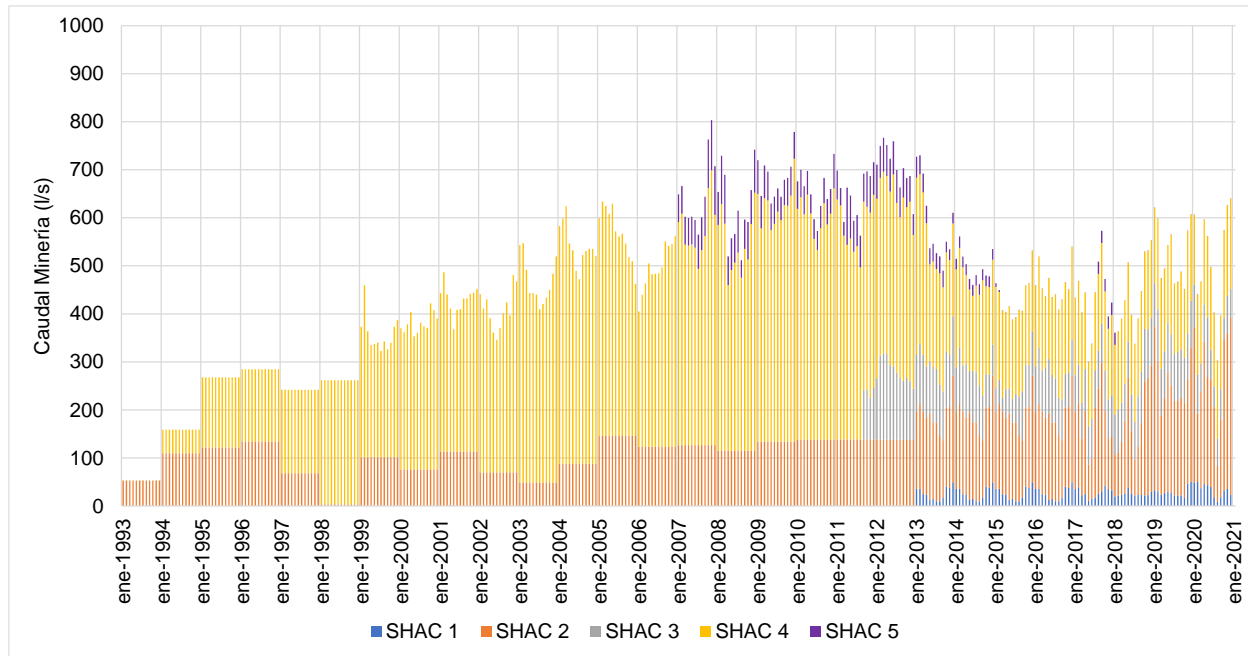
Adicionalmente existen otros usuarios mineros en el Sector 4, donde destaca Compañía Minera del Pacífico S.A con caudales promedios de 15 L/s, ENAMI con caudales medios cercanos a los 90 L/s. Con respecto al Agua Potable, hasta el año 2010 la extracción se concentró en el Sector 4, con magnitudes que varían entre 600 y 700 L/s, a partir de 2011 se trasladaron cerca de 400 L/s hacia el Sector 5. Con respecto al uso agrícola del agua del acuífero en el Sector 4, estimaciones señalan caudales que varían entre 500 y 700 L/s en promedio.

Entre 24 y 25 de marzo del año 2015, se produjeron fuertes precipitaciones que inundaron partes del valle del río Copiapó. Este evento no mostró mayor incidencia en la recuperación del acuífero debido a las condiciones secas que precedieron al evento. A diferencia de los eventos anteriores, el 17 de mayo de 2017 se identifican varios eventos importantes de precipitación que llenaron el embalse Lautaro y generaron una condición húmeda en la parte alta de la cuenca, lo que mantuvo hasta el año 2020, aproximadamente. Adicionalmente, se produjeron aluviones que dañaron sectores agrícolas e infraestructura de riego.

Así, los eventos extremos de los años 2015 y 2017 generaron condiciones de humedad favorables para el escurrimiento de agua superficial en la cuenca del Copiapó y para aumentar de esa forma la recarga al acuífero. La mayor oferta de aguas superficiales trajo, como consecuencia directa, una disminución de los caudales de extracción desde pozos agrícolas. Adicionalmente, los aluviones que ocurren en ese período generaron daños en la infraestructura de pozos de bombeo, colaborando con la disminución de extracción de aguas subterráneas.

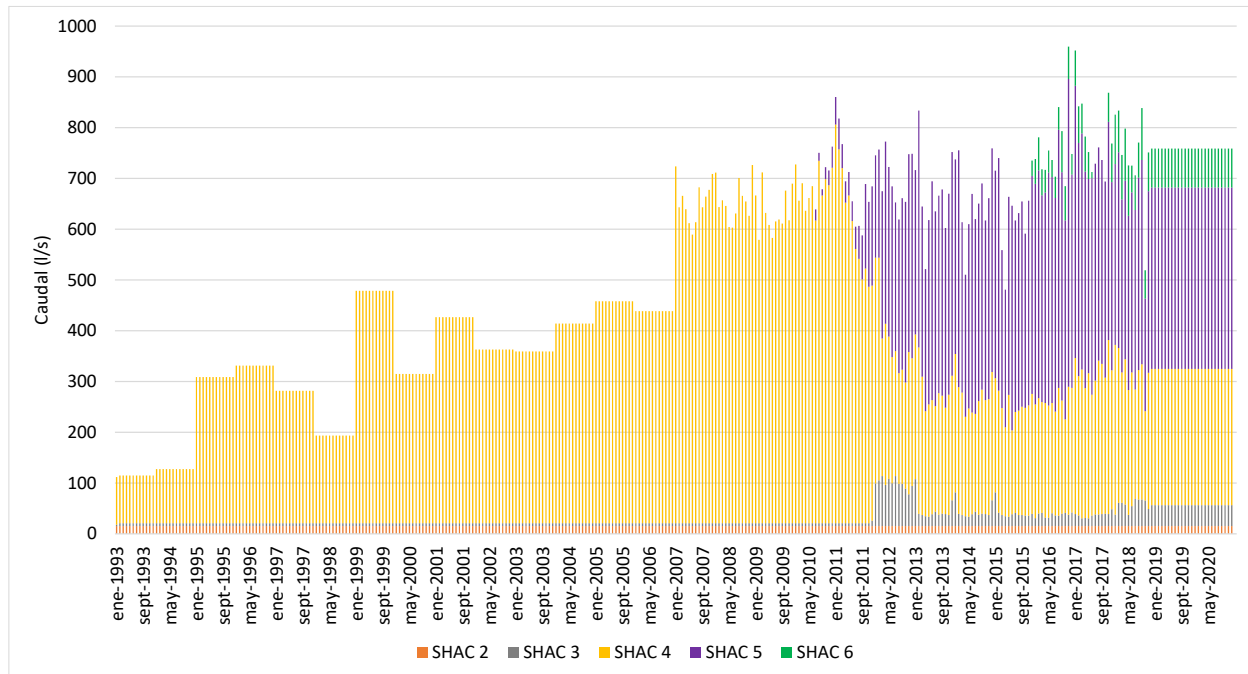
Todo lo anterior corresponde a efectos que ocurrieron de manera secuencial, dando origen a una reducción importante de los bombeos totales en el sector y un aumento significativo de la disponibilidad de agua en el río Copiapó, con el consiguiente aumento de la recarga directa al sistema acuífero.

**Figura 3-3: Caudales de Bombeo Mensuales para Sector Minero**



Fuente: HIDROMAS. Informe Técnico. Estudio de Demanda Hídrica Sistema Acuífero del Río Copiapó. 2021.

**Figura 3-4: Caudales de Bombeo Mensuales para Sector Agua Potable**



Fuente: HIDROMAS. Informe Técnico. Estudio de Demanda Hídrica Sistema Acuífero del Río Copiapó. 2021.



En la Figura 3-5 y la Figura 3-6, se puede apreciar la dinámica de los niveles de agua subterránea en el Sector 4 y cada uno de los hitos identificados en los párrafos anteriores. A lo anterior debe sumarse el traslado de los pozos de agua potable al SHAC 5<sup>1</sup> desde el año 2011 por caudales cercanos a 400 L/s y, por lo tanto, el término de la extracción de Nueva Atacama (ex Aguas Chañar) en el Sector 4, así como el término de la extracción de CCMC en el mismo sector desde el 2013.

Todos esos hechos contribuyeron de manera directa a la recuperación del acuífero, lo que se evidencia en el aumento de los niveles de agua subterránea hasta aproximadamente comienzos del año 2020.

En particular, se puede apreciar que, en Alcaparrosa, próximo al socavón y frente a la Mina Subterránea de Alcaparrosa, los niveles de agua subterránea se recuperaron desde 120 metros de profundidad en el año 2015 hasta 40 metros de profundidad a inicios del año 2020, donde se alcanzó un valor máximo, para luego descender paulatinamente hasta bajo los 60 metros de profundidad en la condición actual.

En el sector de Paipote se observa una situación similar, en donde los niveles de agua subterránea se recuperaron desde los 130 metros de profundidad, en el año 2015, hasta 85 metros de profundidad a inicios de 2020, para luego descender paulatinamente a los 90 metros de profundidad en la condición actual.

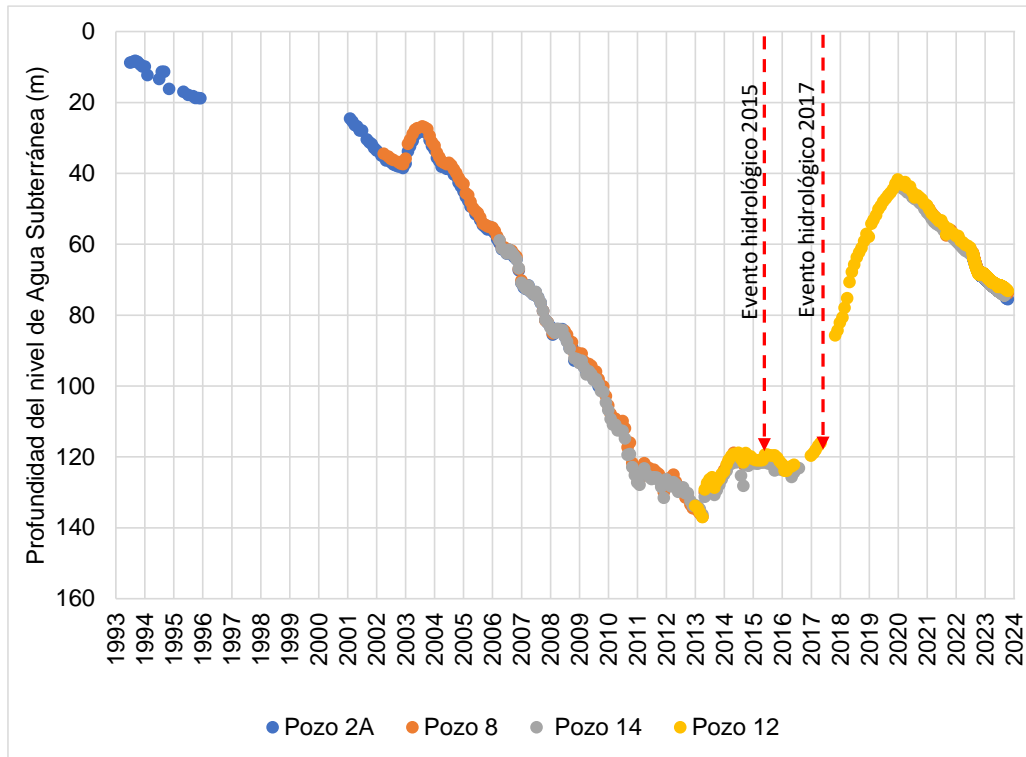
Tal como se observa en las Figura 3-5 y Figura 3-6, los niveles de agua subterránea en el área de estudio han sido dinámicos y dan cuenta de los efectos históricos de la extracción de agua subterránea mediante pozos de bombeo, así como los efectos de recarga asociados a eventos hidrológicos que han permitido recuperar los niveles de agua subterránea con posterioridad a los eventos hidrológicos de los años 2015 y 2017.

Lo anterior permite verificar que, en el caso del socavón, y las consecuencias sobre las condiciones hidrogeológicas en el área, los pozos de monitoreo históricos permiten observar la evolución tanto del drenaje ocasionado por el socavón, y luego el efecto de recuperación debido a las medidas de contención que fueron implementadas al interior de Mina Alcaparrosa.

---

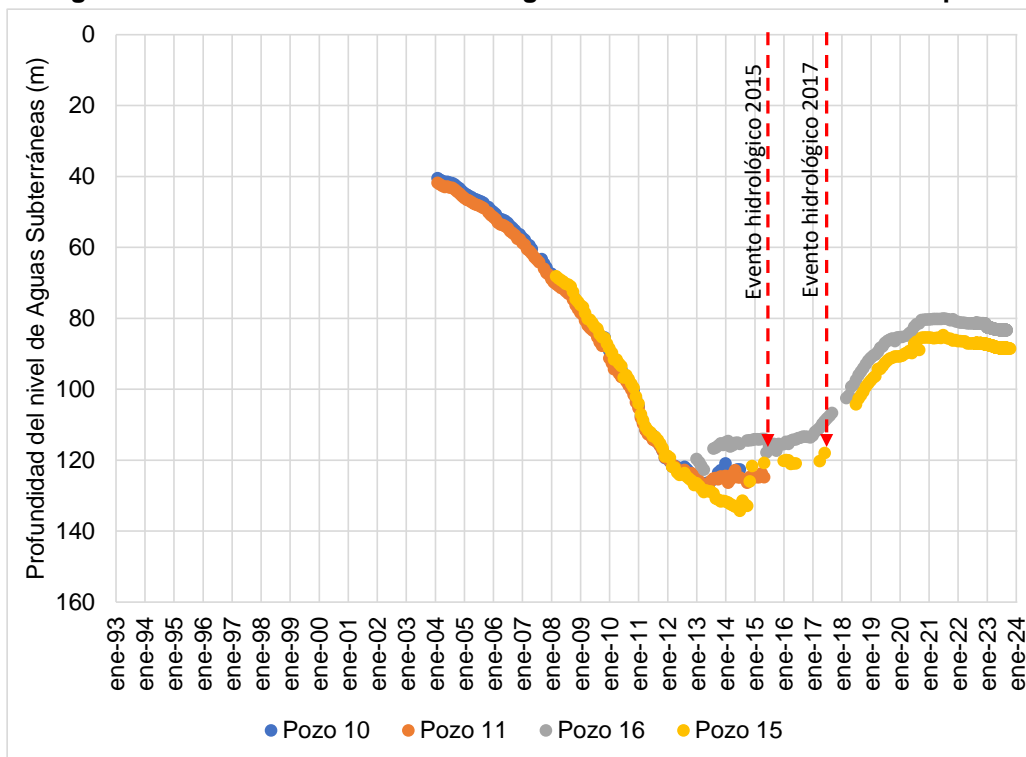
<sup>1</sup> Esto se refiere a pozos de extracción de Aguas Chañar.

**Figura 3-5: Evolución de Niveles de Agua Subterránea en Pozos de Alcaparrosa y Tierra Amarilla**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3-6: Evolución de Niveles de Agua Subterránea en Pozos de Paipote**



Fuente: Elaboración propia

### 3.3.2 Niveles Freáticos Posteriores a la Ocurrencia del Socavón

Los niveles de agua subterráneas, una vez que alcanzaron un máximo en el sector de Alcaparrosa en febrero de 2020, comenzaron a disminuir nuevamente, debido probablemente a que el efecto de la recarga asociado a los años 2015 y 2017 fue mermando, y comenzó a dominar la extracción de aguas subterráneas para los usos en la cuenca.

A partir del 30 de julio de 2022, el efecto del socavón sobre la condición hidrogeológica en el área se evidencia de manera directa con un aumento en las tasas de descensos de los niveles de agua subterránea medidos en los pozos de los sectores de Alcaparrosa (Pozo 8, Pozo 12, Pozo 14, Pozo HA-01 y piezómetro HA-02) y Tierra Amarilla (Pozo 2A, Pozo 3, Pozo 5 y Pozo 6) como se observa en las Figura 3-7 a Figura 3-9. En el caso de los pozos de monitoreo del sector Palermo, ubicados a 3.500 m aguas arriba del socavón (Pozo 9 y Pozo 13), los efectos que se observan responden al uso de terceros, no apreciando un cambio de pendiente (Figura 3-10) debido a la distancia desde el socavón.

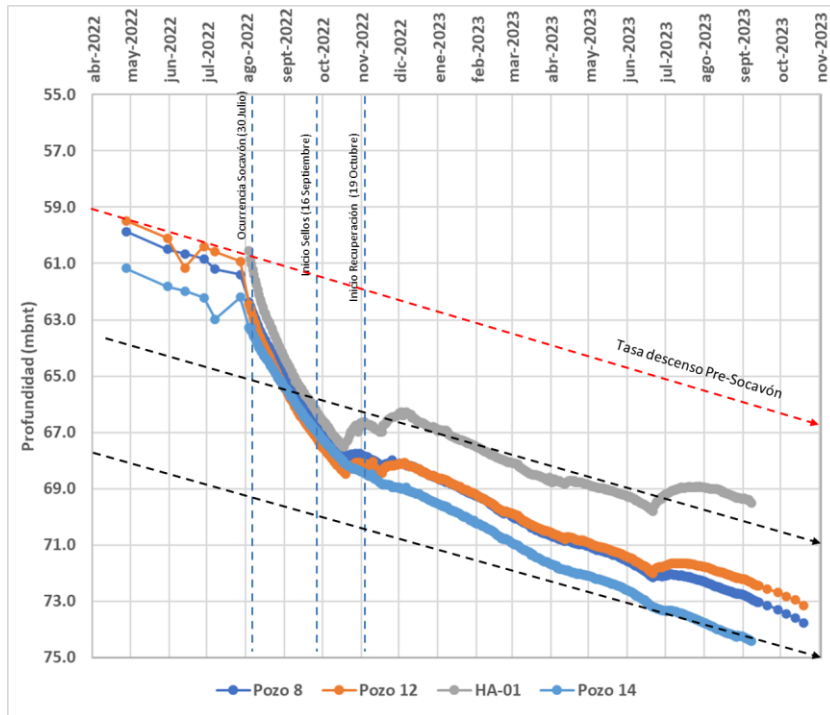
En el caso de los pozos del sector de Paipote, ubicados a 6 km aguas abajo del socavón (Pozo 15 y Pozo 16) (Figura 3-11 y Figura 3-12), no se observan efectos a la fecha relacionados con el socavón debido a que, por la distancia a la que se encuentran, los efectos del cono de depresión generado por el drenaje hacia el área de la mina Alcaparrosa se atenúan. Tal como se observa en la Figura 3-12, el Pozo 15 de Paipote alcanzó su máximo de recuperación al principios del año 2020 producto de los eventos de los años 2015 y 2017. Al igual que en el sector Alcaparrosa, en febrero de 2020 retoma la tendencia al descenso, producto de la mayor extracción de aguas subterráneas, en relación a la recarga, esta tendencia no se ha visto modificada.

El efecto de aumento en la tasa de descenso de niveles de agua subterránea, a partir del 30 de Julio de 2022, en los pozos de monitoreo del Sector Alcaparrosa se puede apreciar en las Figura 3-7 y Figura 3-8, y es consistente con la propagación del efecto en el acuífero debido al caudal drenado a través del socavón hacia la mina subterránea. Con posterioridad a este cambio, el que se mantiene hasta mediados del mes de octubre de 2022, se observa una estabilización en los niveles, detectándose incluso alguna tendencia a la recuperación de estos lo que daría cuenta del efecto del sellado de la conexión hidrogeológica entre el acuífero y los caserones de la mina subterránea, lograda a través de la construcción de cuatro tapones o sellos de hormigón armado en sectores de la mina subterránea. Estos tapones lograron aislar el sector de conexión entre el acuífero de Copiapó y los caserones subterráneos, lo que ha permitido la presurización e inicio de la recuperación del nivel freático en el acuífero sedimentario.

El efecto más directo del socavón sobre los niveles de agua subterránea en el acuífero se puede observar en el registro la presión en el piezómetro HA-02, como se presenta en la Figura 3-8. Este pozo cuenta con un sensor de medición continua ubicado en la roca fracturada que subyace inmediatamente al acuífero aluvial y que entrega registros de presión de la columna de agua subterránea cada 6 horas, lo que permite observar de manera directa el cambio de tendencia que se observa luego del 30 de julio de 2022, con un cambio brusco seguido de una reducción paulatina, pero continua del nivel de agua subterránea (aumento de la tasa de descenso original). Cabe mencionar un efecto de reducción de la presión del orden de un metro a mediados de mayo de 2023, que genera un cambio en la interpretación de la pendiente de descenso en dicho pozo, sin embargo, es algo puntual y que no se refleja en los niveles de agua subterránea medido en los pozos que miden el nivel freático. Este efecto se revierte a partir del día 19 de octubre de 2022, fecha a partir de la cual se produce un cambio de tendencia viendo una estabilización de los niveles e incluso cierto nivel de recuperación de estos respecto de lo acontecido a fines de julio de 2022. Lo anterior se puede entender como un indicador de la efectividad del sellado de la conexión acuífero-caserones generado por el socavón, el que debiera llevar al sistema acuífero a una condición equivalente a la que habría tenido a esta fecha de no haber ocurrido el socavón.

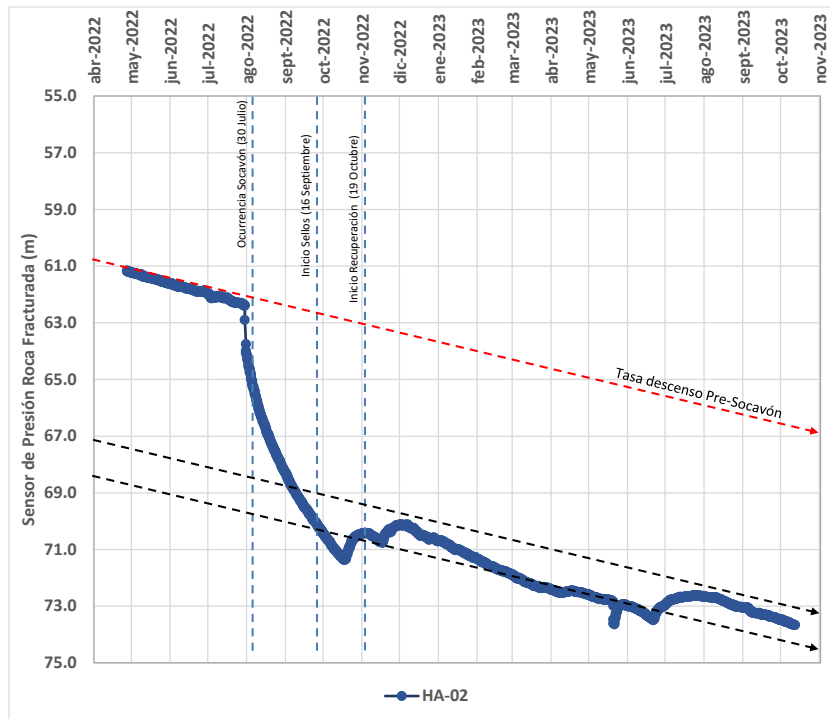


**Figura 3-7: Variación de Niveles de Agua Subterránea en Pozos de Monitoreo Alcaparrosa**



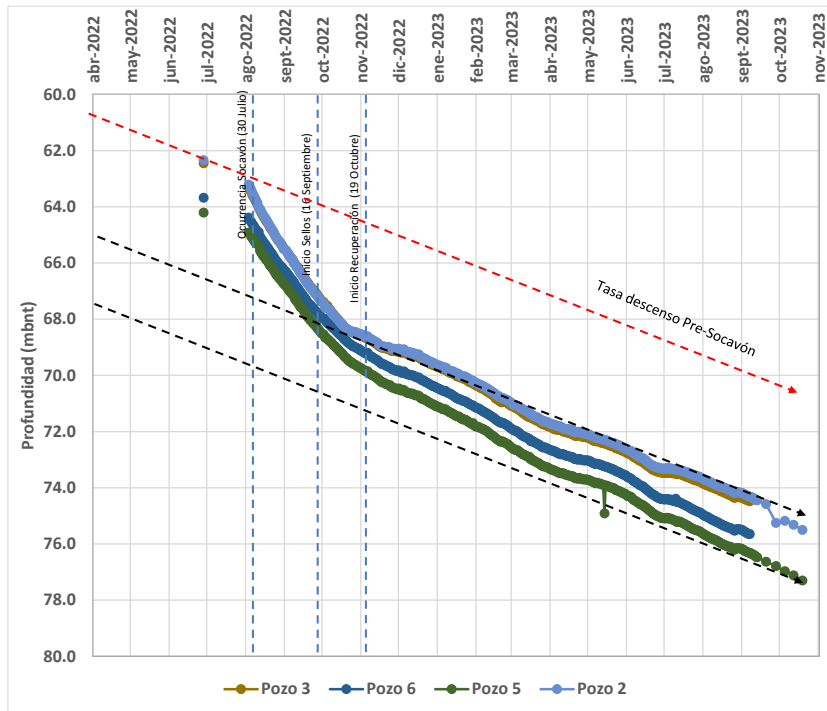
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de monitoreo

**Figura 3-8: Variación de Presión en Pozo de Monitoreo HA-02 Alcaparrosa**



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de monitoreo

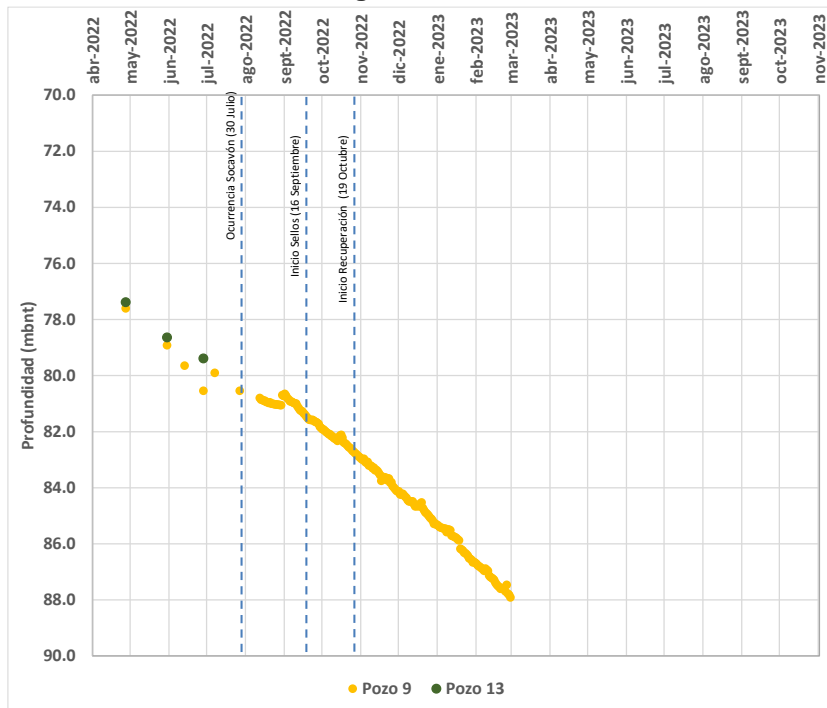
**Figura 3-9: Variación de Niveles de Agua Subterránea en Pozos de Monitoreo Tierra Amarilla**



Nota: Pozo 5, presenta dato anómalo del 14/05/23. Corresponde a un error de registro, se indica 74,91m en vez de 73,91m. Sin embargo, se ha mantenido el dato informado.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de monitoreo

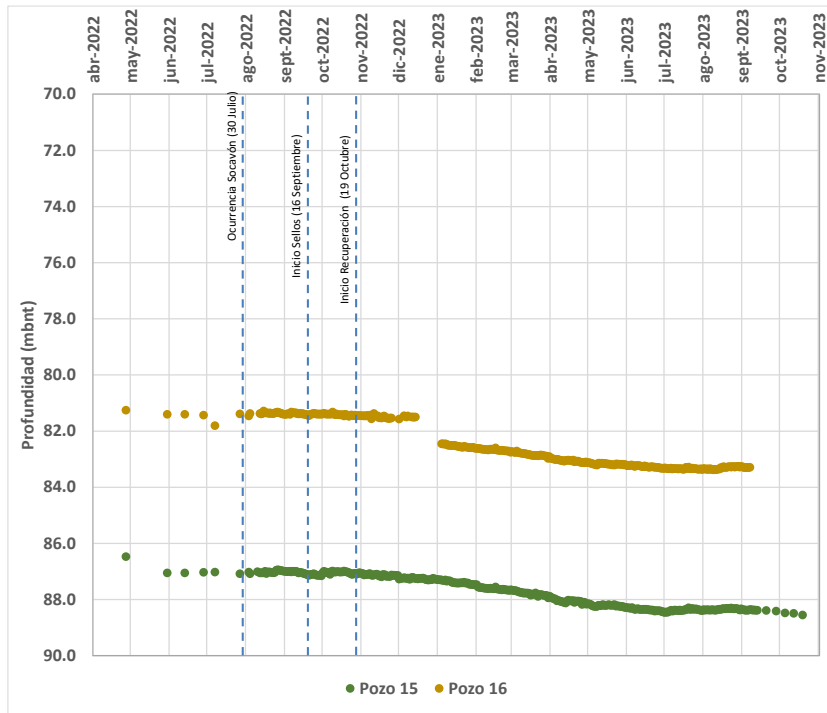
**Figura 3-10: Variación de Niveles de Agua Subterránea en Pozos de Monitoreo Palermo**



Nota: Pozos 9 y 13 se encuentran actualmente obstruidos sin posibilidad de medirlos

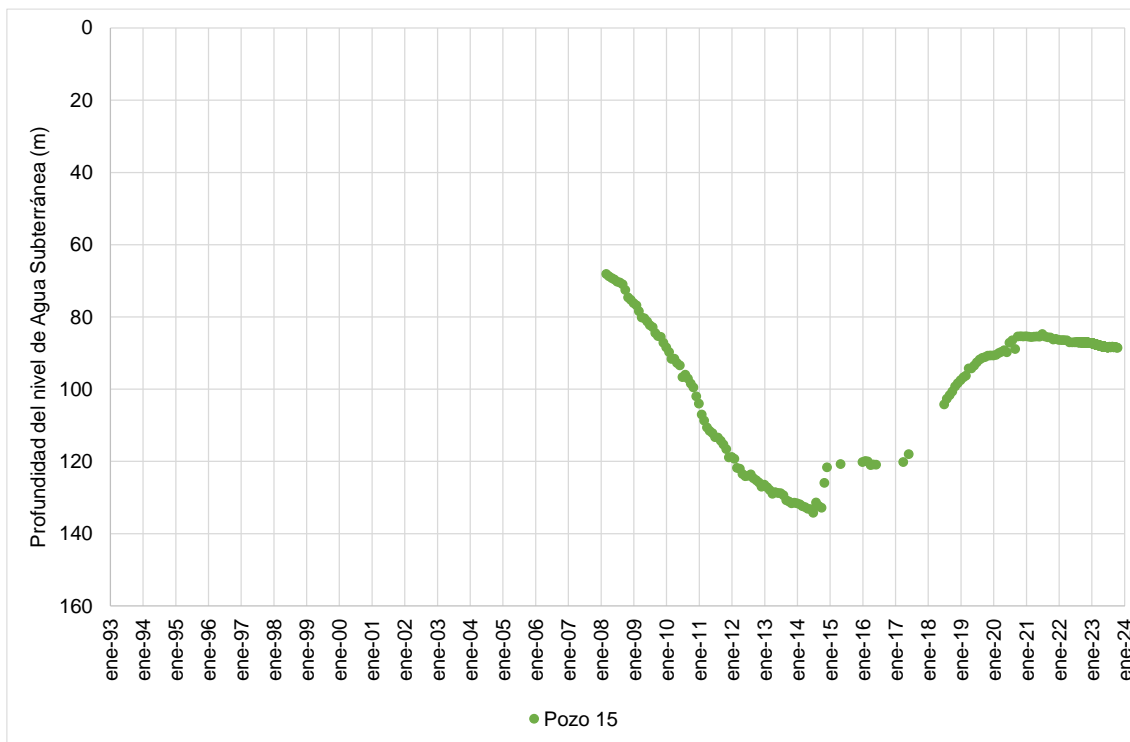
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de monitoreo

**Figura 3-11: Variación de Niveles de Agua Subterránea en Pozos de Monitoreo Paipote**



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de monitoreo

**Figura 3-12: Variación Histórica de Niveles de Agua Subterránea en Pozo de Monitoreo 15 (Paipote)**



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de monitoreo

### 3.3.3 Tasas de Cambio de los Niveles Freáticos Pre y Post-Socavón

Al analizar de manera detallada la situación de niveles de agua subterránea, justo después de la ocurrencia del socavón, es posible evidenciar los cambios en los niveles de agua subterránea en los pozos de monitoreo y en particular en las tasas de cambio de dichos niveles.

La tasa de cambio de niveles de agua subterránea corresponde a la diferencia entre mediciones de nivel de agua subterránea en un período de tiempo determinado, lo que da cuenta de la velocidad en que los niveles de agua subterránea cambian en el tiempo, permitiendo de esta manera estimar una tasa de cambio en términos de centímetros por día. Para lo anterior se dispone de registros que permiten determinar la tasa en función de mediciones específicas en días consecutivos.

Tal como se ha visto en la situación histórica, existen diversos procesos hidráulicos que puedan hacer cambiar los niveles de agua subterránea y la presión del agua en un acuífero. De esta forma, el bombeo de usuarios autorizados que hacen bajar los niveles de agua de manera continua en el tiempo genera tasas de cambio negativas. Por otro lado, la situación del acuífero evidencia que ha habido fenómenos, como la recarga superficial generada por eventos hidrológicos (crecidas), que permiten aumentar los niveles de agua subterránea y por lo tanto cuando este efecto domina sobre el bombeo la tasa de cambio es positiva.

Para el piezómetro HA-02, que cuenta con información detallada de la presión del agua subterránea (equivalente al nivel de agua subterránea en el sector), se evaluó la tasa de cambio como la variación de la presión promedio en 1 y 2 días con el objetivo de verificar que no hay diferencias significativas al estimar esta variable usando ambos períodos de tiempo. Para los otros pozos de monitoreo en que la información de niveles es más espaciada en el tiempo se evaluó la tasa de cambio de niveles como el promedio en 5 días de la diferencia de niveles diaria (media móvil de 5 días).

La imagen superior de la Figura 3-13 muestra gráficamente la evolución del nivel de presión del agua subterránea en el Piezómetro HA-02 (piezómetro de cuerda vibrante), donde se aprecian los hitos asociados a la generación del socavón a fines de Julio de 2022, así como el cambio de tendencia del nivel de presión producto del fin del llenado (19 de octubre 2022).

En particular justo antes de la ocurrencia del socavón los niveles de agua subterránea descienden de manera continua debido al bombeo de diversos usuarios en el acuífero de Copiapó y en particular en pozos del Sector 4. Inmediatamente después de la ocurrencia del socavón el nivel de agua subterránea muestra un cambio muy intenso debido al inicio del drenaje de aguas subterráneas a través de la conexión hidrogeológica que se generó debido al desplazamiento de material del acuífero de Copiapó hacia el sector Gaby 04. El drenaje o salida de agua subterránea hacia el interior mina (medido en el orden de 300 L/s) genera un efecto similar a la salida del agua desde el acuífero, formando un cono de depresión, lo que se traduce en un descenso fuerte del nivel de agua subterránea que se va reduciendo paulatinamente al extenderse el cono de efecto desde el área del socavón hacia su entorno. Este efecto se mantiene hasta que luego de instalados los muros o sellos de contención, la conexión hidrogeológica generada por el socavón se detiene y por lo tanto el acuífero del Copiapó comienza un proceso de recuperación, hasta que la forma del descenso de niveles vuelve nuevamente a una situación como la existente antes de la ocurrencia del socavón.

La misma información anterior se puede observar a través de las tasas de cambio de la presión en el piezómetro HA-02 (velocidad de descenso), obtenidas como la variación de niveles de agua subterránea en uno y dos días (imagen inferior de la Figura 3-13), donde se aprecia una tasa de cambio pre-socavón de aproximadamente 1,0 a 2,0 cm/día, en promedio, que luego de ocurrido el evento se aumenta a más de 20 cm/día. El presentar las tasas de cambio calculadas para 1 o 2 días de desfase entre mediciones es sólo para destacar que la tendencia promedio es independiente de los datos que se tomen para su estimación.

Es importante recalcar que luego de producido el llenado del sector Gaby (luego de la contención de la conexión hidrogeológica por el efecto de los muros o sellos de hormigón), la tasa de cambio de niveles se ha ido acercando de manera paulatina a la tendencia original pre-socavón de 1,0 a 2,0 cm/día, lo que da cuenta de la efectividad de los sellos de hormigón en contener la entrada de agua subterránea desde el acuífero al sector mina Alcaparrosa. Lo anterior permite verificar que, desde el punto de vista del balance hídrico, el sistema acuífero del Sector 4 se devuelve a una situación como la existente con anterioridad a fines de Julio de 2022, en la cual los usuarios de agua subterránea se encuentran bombeando el agua del entorno de manera continua, con caudales similares a los que se verificaban antes de la ocurrencia del socavón.

En los últimos meses, y más allá de situaciones específicas, la tasa de cambio de niveles de presión en el Pozo HA-02 se ha mantenido del orden de 1,0 a 2,0 cm/día (enero a octubre de 2023).

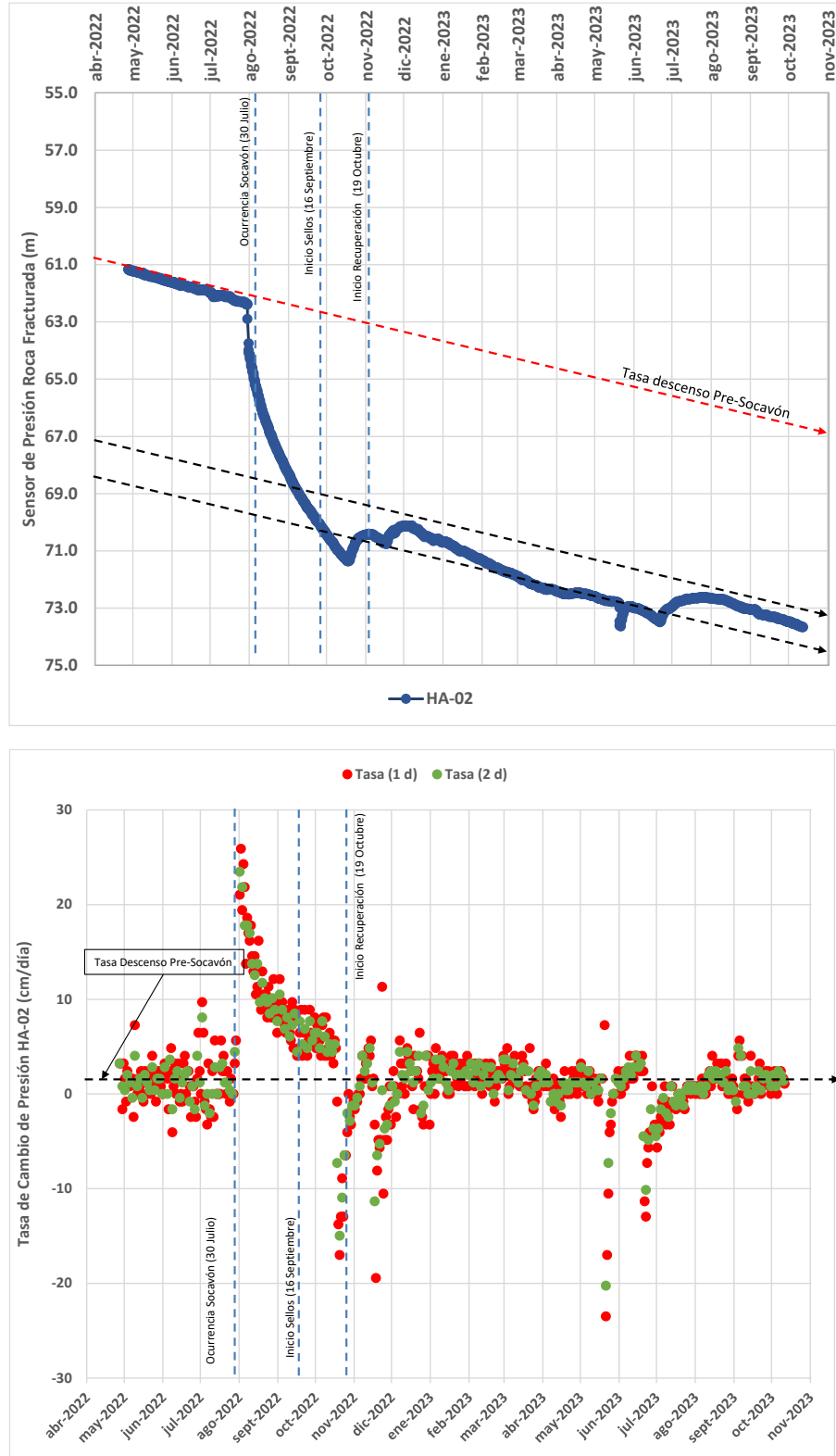
Una situación similar a la del piezómetro HA-02 se observa en otros pozos de monitoreo del entorno, en los cuales la información de niveles de agua subterránea es más espaciada en el tiempo, pero permite verificar la existencia de una situación equivalente a la del piezómetro HA-02, pero más atenuada debido a la mayor distancia entre el socavón y cada pozo de monitoreo.

La Figura 3-14, la imagen superior, muestra la evolución de los niveles de el Pozo 12, Pozo 8 y Pozo 14, aguas arriba del socavón y el Pozo HA-01, aguas abajo del socavón. Los pozos más cercanos al socavón muestran una tendencia muy similar al piezómetro HA-02, observándose la recuperación del acuífero en el entorno del socavón para luego alcanzar la tendencia general de descensos observada en la situación pre-socavón. Para el Pozo 8 y Pozo 14, ubicados aguas arriba del Pozo 12, se aprecia el cambio de tendencia producto de la efectividad del llenado, tal que a mediados de diciembre ya todos los pozos muestran que se alcanza la tendencia general de descensos observada en la condición pre-socavón. Lo anterior se corrobora con en el análisis de las tasas de cambio de niveles, considerando el promedio de 5 días de las variaciones diarias de nivel (media móvil 5 días), donde se puede apreciar que después del llenado por los sellos e iniciada la recuperación del acuífero, la tasa de cambio de niveles se comienza a recuperar a condiciones pre-socavón desde mediados de diciembre de 2022.

La Figura 3-15 muestra la situación de los pozos en el sector denominado Tierra Amarilla (Pozo 2A, Pozo 3, Pozo 5 y Pozo 6), donde se aprecia claramente tanto el efecto en los niveles y tasas de descensos asociadas al socavón, así como también el proceso de recuperación de la tendencia y la tasa de descensos a la condición previa al socavón, demostrando la efectividad de los sellos de hormigón.

Finalmente, en la Figura 3-16 se han graficado todos los pozos de monitoreo del nivel freático, donde se aprecia claramente que todos los pozos desde diciembre de 2022 están siguiendo la tendencia de la situación pre-socavón, demostrándose la efectividad de la medida de los sellos de hormigón y llenado del sector Gaby.

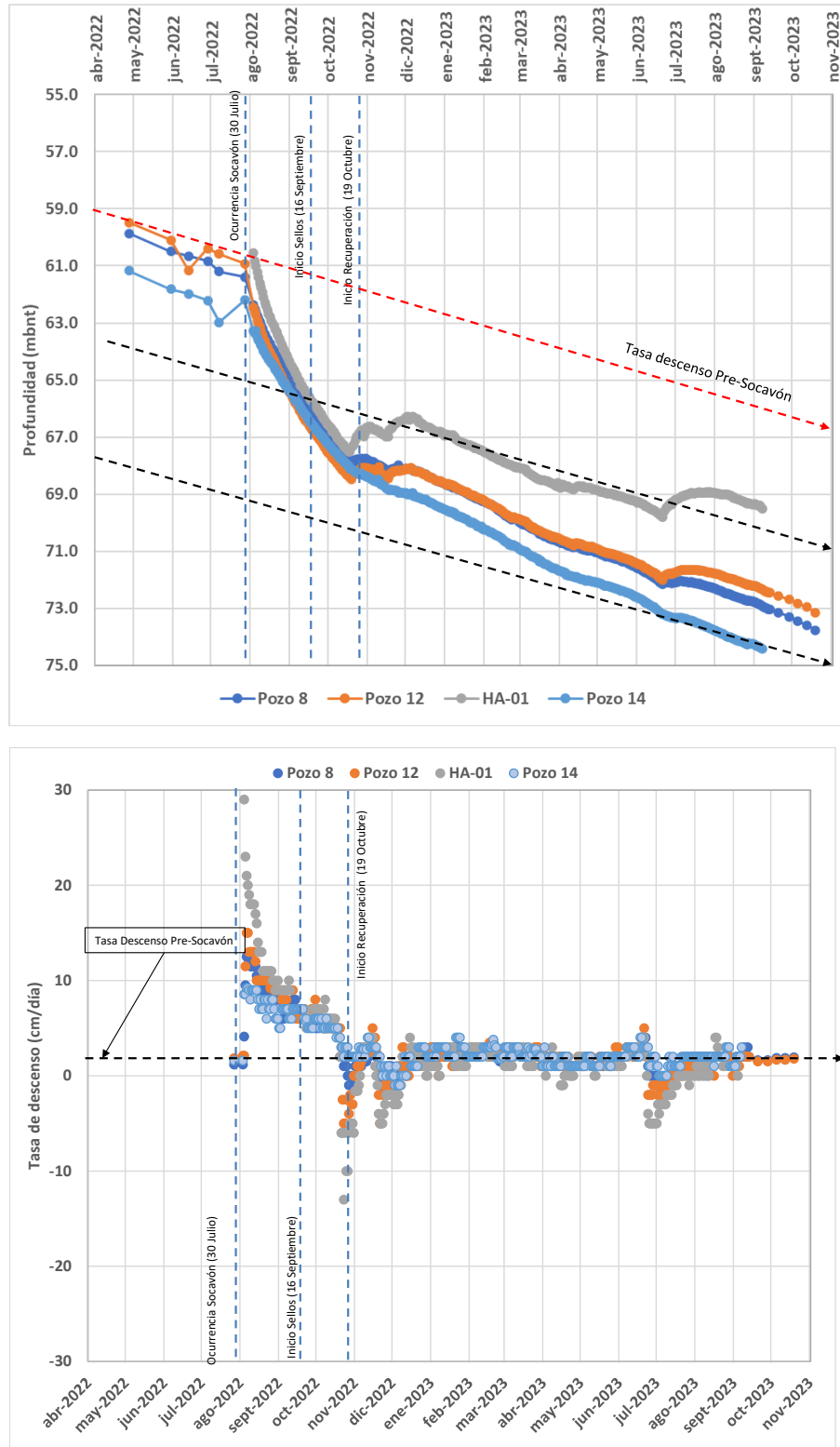
**Figura 3-13: Presión y Cambio Tasas de Presión Pozo HA-02**



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de monitoreo

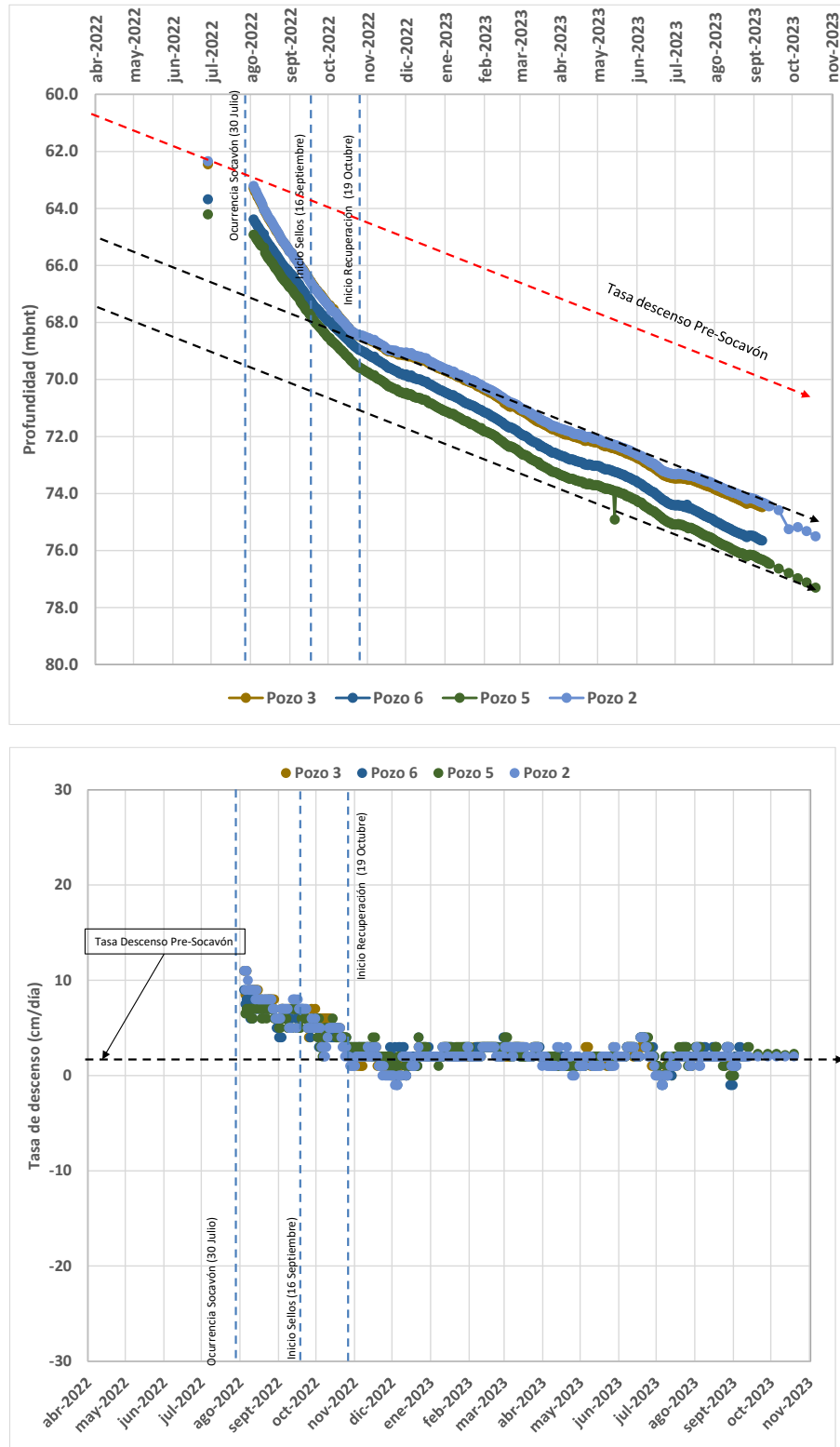


**Figura 3-14: Niveles Freáticos y Tasas de Descensos Pozos 8, 12, 14 y HA-01**



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de monitoreo

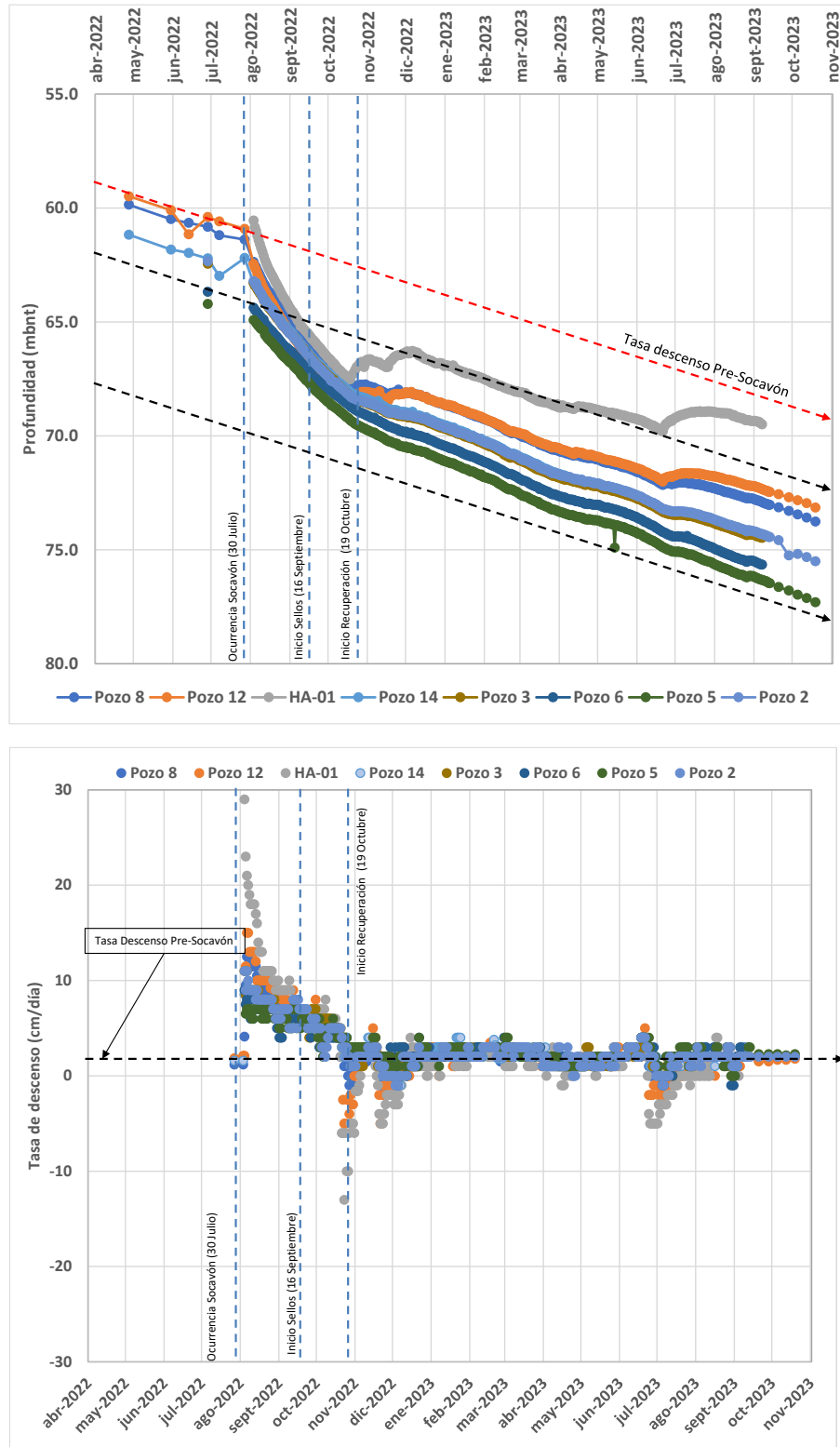
**Figura 3-15: Niveles Freáticos y Tasas de Descensos Pozos 2, 3, 5 y 6**



Nota: Pozo 5, presenta dato anómalo del 14/05/23. Corresponde a un error de registro, se indica 74,91m en vez de 73,91m. Sin embargo, se ha mantenido el dato informado.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de monitoreo

**Figura 3-16: Niveles Freáticos y Tasas de Descensos Pozos 2, 3, 5 y 6; Pozos 8, 12, 14 y HA-01**



*Nota: Pozo 5, presenta dato anómalo del 14/05/23. Corresponde a un error de registro, se indica 74,91m en vez de 73,91m. Sin embargo, se ha mantenido el dato informado.*

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos de monitoreo*

### 3.4 Caudales de Infiltración a la Mina Subterránea

#### 3.4.1 Información Histórica a Nivel Mensual

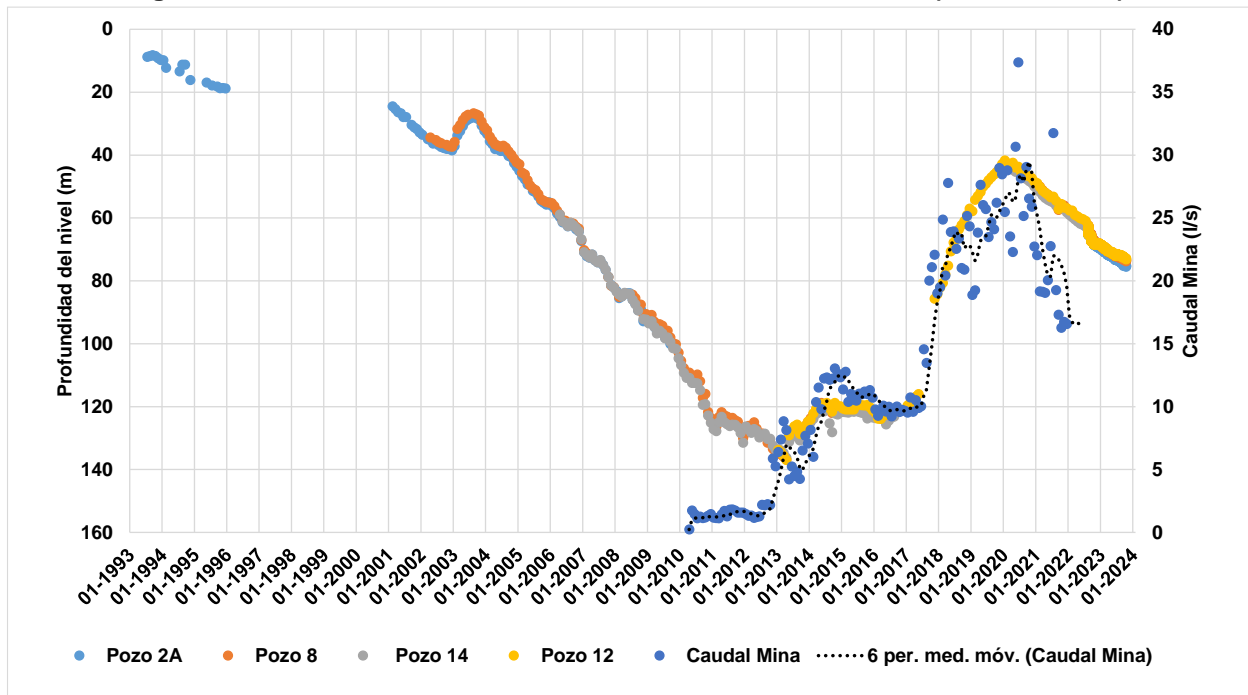
La Mina Subterránea Alcaparrosa, se encontraba operando según la RCA N°158/2017, contando con una aprobación ambiental para extender su operación en el corto plazo según la RCA N°163/2021.

La actividad minera genera un efecto sobre las aguas subterráneas de su entorno debido al caudal de alumbramiento que se produce en su interior y que ocurrirá durante la ejecución de las galerías subterráneas, caserones y sondajes. La estimación de este caudal alumbrado fue presentada en los estudios técnicos, asociados a las condiciones imperantes en el área a la fecha de los estudios. Las aguas alumbradas en la mina subterránea son actualmente compensadas, dejando de extraer la misma cantidad de agua subterránea en el Pozo 15 de Paipote, que utiliza Aguas Chañar – hoy Nueva Atacama – para producción de agua potable, con el objetivo de lograr un balance cero en el Sector 4 del acuífero del río Copiapó.

Las aguas alumbradas desde el inicio de la operación de la Mina Alcaparrosa se muestran en la Figura 3-17, donde se aprecia que ha existido una estrecha relación entre el caudal afloramiento en la Mina respecto de la posición del nivel freático en la zona de Alcaparrosa, Sector 4 del acuífero de Copiapó, evidenciando que a medida que el nivel freático asciende, el caudal de afloramiento se incrementa y viceversa.

Así, en el año 2020, cuando el nivel freático alcanzó un valor máximo de 40 metros de profundidad, el caudal de afloramiento en la mina alcanzó en promedio (media móvil 6 meses) del orden de los 30 L/s, caudal que ha ido decreciendo hasta la actualidad (pre-socavón) conforme con la disminución del nivel freático.

**Figura 3-17: Caudal Alumbrado Mina Subterránea Pre-Socavón (nivel mensual)**



Fuente: Elaboración propia



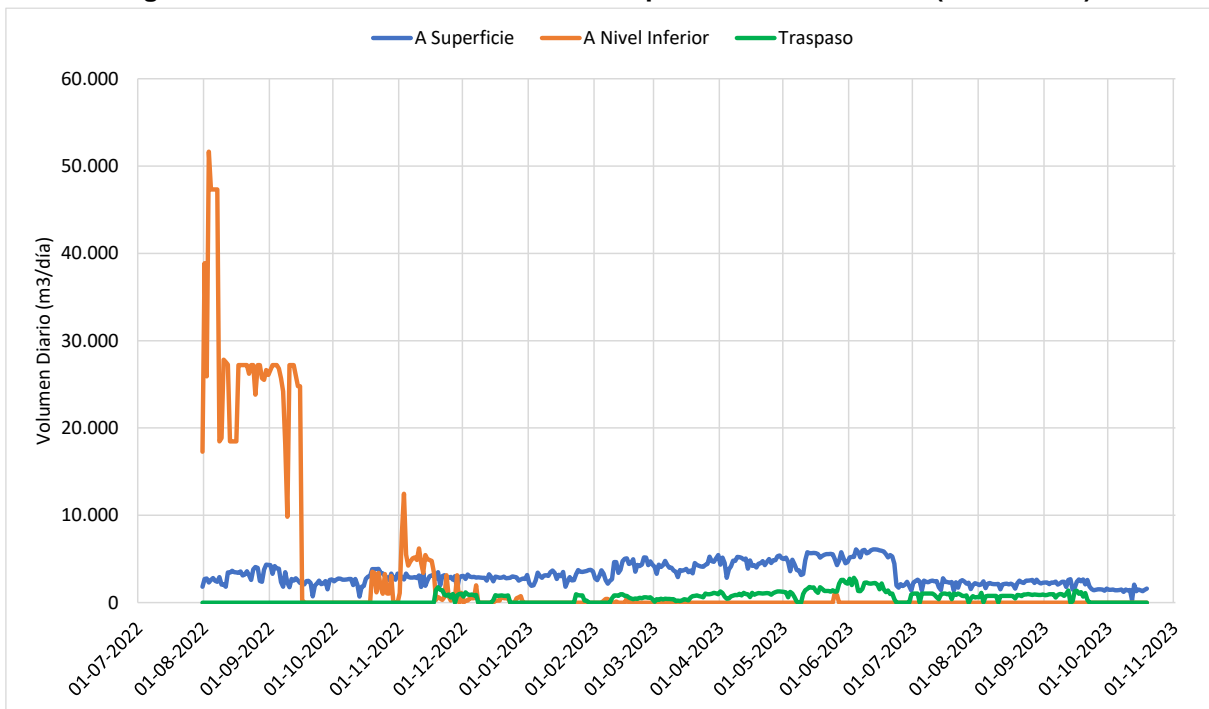
### 3.4.2 Información de Caudales a Nivel Diario Post-Socavón

La Figura 3-18 muestra la serie de volúmenes diarios bombeados al interior de la mina subterránea (Nivel Inferior), a partir de la fecha en que ocurre el socavón (fines de julio de 2022).

Después del 30 de julio de 2022, luego de ocurrido el socavón en el sector de Alcaparrosa, se generó un incremento en los caudales de afloramiento en el interior mina, los que estabilizaron en torno a 300 l/s (aproximadamente 26.000 m<sup>3</sup>/día), y que fueron conducidos hacia niveles inferiores en la mina. En el mismo período existe un caudal de afloramiento adicional, cuyo monto promedio es inferior a 40 L/s (aproximadamente 3.500 m<sup>3</sup>/día) y que se conducen a superficie hacia la Planta PAC (Planta Pedro Aguirre Cerda). Adicionalmente se incluye un caudal asociado al traspaso de agua acumulada desde el Nivel Inferior hacia la Planta PAC, lo que en todo caso ya está incluido en el caudal enviado hacia Planta PAC.

Esta información da cuenta de una reducción importante del caudal al nivel inferior mina a partir de mediados de septiembre de 2022 que es cuando se controla el efecto de la conexión hidrogeológica y el sistema interior de los caserones Gaby queda cerrado hacia la mina y deja de haber drenaje hacia dicho sector.

**Figura 3-18: Caudal Observado Mina Alcaparrosa Post Socavón (nivel diario)**



Fuente: Elaboración propia

Durante un período de tiempo posterior al 16 de septiembre de 2022 el agua subterránea del acuífero de Copiapó sigue entrando hacia el sector de los caserones Gaby, como parte de proceso de llenado de los mismos, lo que da paso a la recuperación posterior del nivel de agua subterránea en el acuífero. Este último efecto ya se observa en los pozos de monitoreo cercanos al socavón (Pozo 12, Pozo HA-01 y Pozo HA-02), cuyo cambio de tendencia producto de esta situación, se observa desde el 19 de octubre de 2022. De esta forma, este período de llenado ocurre aproximadamente entre el 16 de septiembre y el 19 de octubre de 2022, durante el cual no se constata caudal que se dirija hacia el interior de la mina subterránea.

Esta situación se modifica parcialmente a partir de mediados del mes de octubre de 2022 donde un caudal adicional se comienza a dirigir hacia el nivel inferior mina, y se observa en particular entre mediados de octubre y fines de diciembre de 2022. Este caudal se origina en filtraciones internas, entre el área inundada y otros caserones cercanos, lo que es controlado a través de sellos o manejos locales al interior mina. En mucha menor escala esto se observa en los meses posteriores (VAIGS, 2023<sup>2</sup>).

Es importante asociar el cambio de caudal de infiltración total observado desde mediados de octubre de 2022, lo que se traduce en una recuperación de los niveles de agua subterránea, lo que se observa (ver Figura 3-14 y Figura 3-16) no sólo en los pozos de monitoreo más cercanos (Pozo 12, Pozo HA-01 y Pozo HA-02), sino también en pozos algo más alejados (Pozo 14 y Pozo 8, por ejemplo).

### 3.4.3 Volumen Drenado hacia Mina Subterránea debido a Conexión Hidrogeológica por Socavón

Para efectos de estimar el volumen de agua drenado desde el acuífero granular o sedimentario de Copiapó hacia el sector de la mina Subterránea Alcaparrosa (VD), debido a la conexión hidrogeológica generada por el socavón que ocurrió a fines del mes de julio de 2022, se deben identificar tres factores complementarios:

- VAD: Volumen de agua evacuada a los niveles inferiores de la Mina Alcaparrosa, incluye un traspaso de aguas desde el nivel inferior hacia Planta PAC.
- VAB: Volumen de agua bombeada a superficie a Planta Pedro Aguirre Cerda (Planta PAC).
- VAI: Volumen de agua encapsulada al interior de los caserones Gaby, Galerías 200 y 270, así como en la columna de material desplazado por el socavón, debido a la construcción de los muros.

Los dos primeros factores (VAD y VAB) dan cuenta del agua subterránea proveniente del acuífero del río Copiapó cuyo monto es estimado a partir de la información de caudales aforados en secciones específicas al interior del área mina y cuyos montos diarios son informados de manera regular a la autoridad. En la Figura 3-18 se presenta esta información a nivel diario, hasta el 18 de octubre de 2023:

- Para efectos de estimar el volumen drenado que se asocia al flujo que se dirige hacia el sector inferior mina (VAD), se presenta la Figura 3-19 en la cual se observa el volumen acumulado en el período de información. Tal como se observa en la Figura 3-19, al final del período de información (18 de octubre de 2023) se han conducido hacia el sector inferior mina del orden de 1.182.665 m<sup>3</sup>.
- El segundo término, VAB, se estima a partir de los registros de caudal conducido a la superficie, y cuyos valores diarios se presentan en la Figura 3-20. Tal como se observa en la Figura 3-20, en promedio se han conducido hacia el sector de la Planta Pedro Aguirre Cerda del orden de 37 L/s, inferiores a los 40 L/s que se consignaron en los procesos ambientales que llevaron a las RCA N°158/2017 y RCA N°163/2021, como compensación por las infiltraciones hacia el interior del sector mina. Este volumen alcanza al 18 de octubre de 2023 un valor de 1.424.715 m<sup>3</sup>.

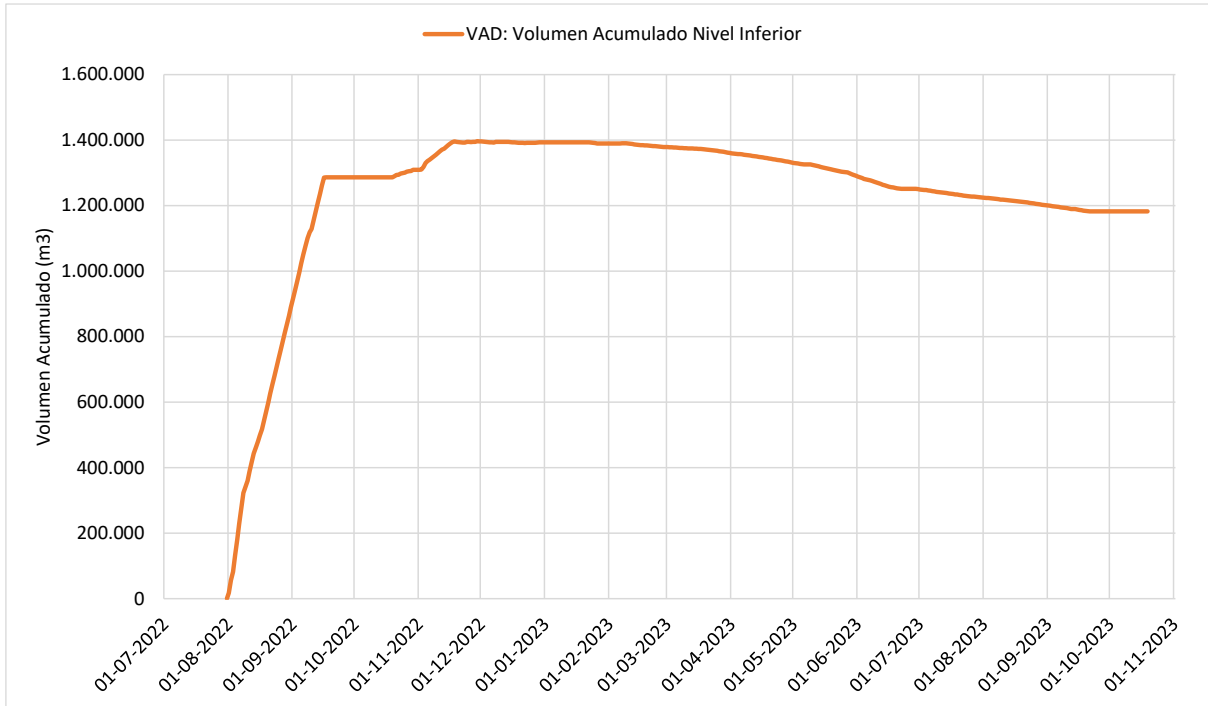
Finalmente, el tercer factor (VAI) se asocia al monto de agua subterránea que se acumuló al interior del área encapsulada por la construcción de los muros que controlan el efecto de la conexión hidrogeológica generada por el socavón, tal como se observa en la Figura 3-21. Este monto fue estimado por VAIGS (2023) a partir de información geométrica de los caserones Gaby-01, Gaby-04, Gaby-12, Galerías 200 y 270, así como de la columna de material desplazado por el socavón y asciende a 425.908 m<sup>3</sup>.

De esta forma, el volumen total drenado al 18 de octubre de 2023, como conjunto de los tres factores antes indicados, alcanza a 3.033.288 m<sup>3</sup>.

---

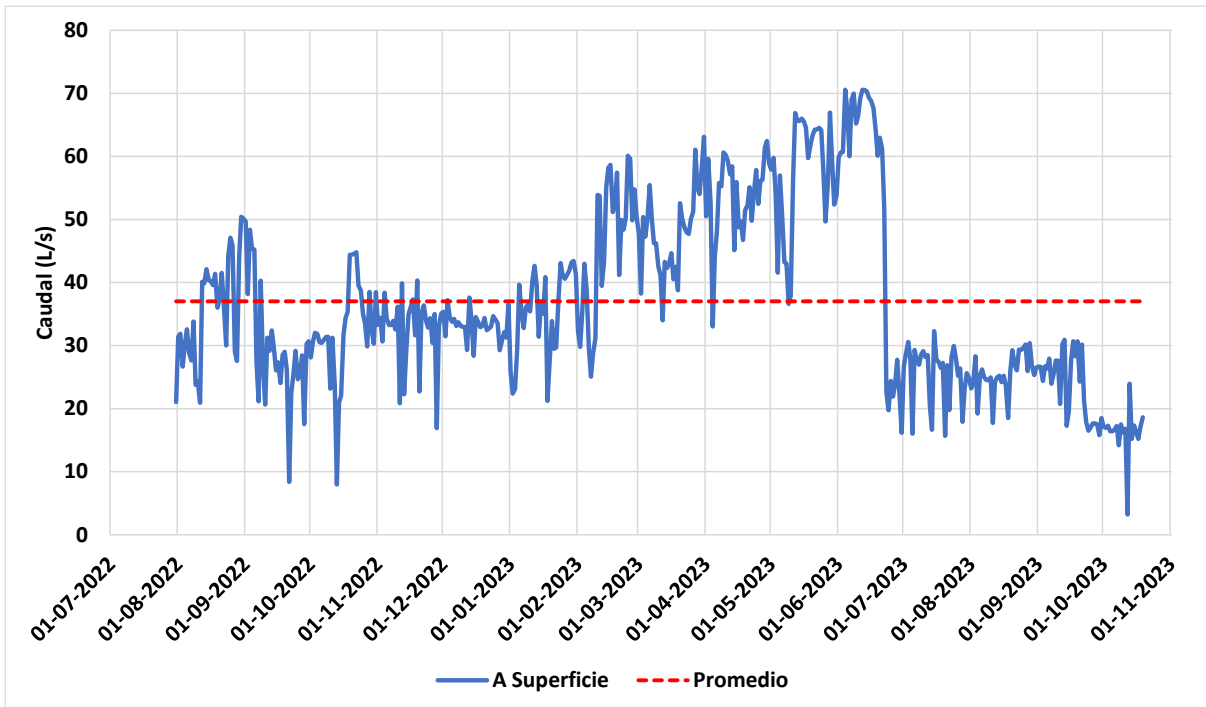
<sup>2</sup> VAIGS. Evaluación Hidrogeológica de Mina Alcaparrosa con relación a la Demanda de Daño Ambiental Causa Rol D-22-2023 del TA. 2023.

**Figura 3-19: Volumen de Infiltraciones Netas Conducidas a Sector Inferior Mina (VAD)**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3-20: Volumen de Infiltraciones Conducidas a Planta PAC (VAB)**



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-21: Volumen de Agua Encapsulada en Caserones y sector Socavón (VAI)

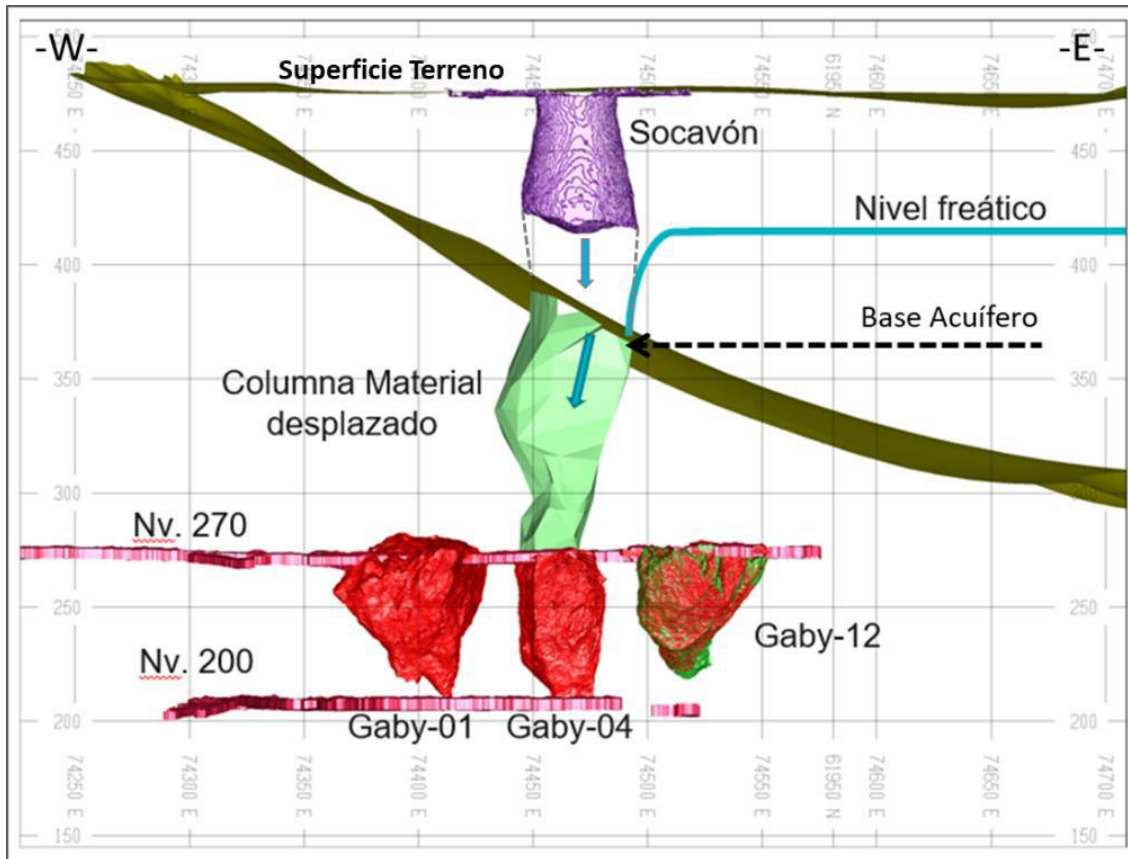


Tabla 2-2 Volúmenes de Geometrías a inundar Sector Gaby

GEOMETRÍAS	VOLUMEN GEOMETRÍA (m³)	ESTADO (*)	VOLUMEN DE VACIO	VOLUMEN A INUNDAR (m³)
CASERON Gaby-01 LEVANTAMIENTO OPTTECH 12/08/2022	170,609	VACÍO	100%	170,609
CASERON Gaby -012 LEVANTAMIENTO OPTTECH 12/08/2022	57,868	VACÍO	100%	57,868
CASERON Gaby -04 DISEÑO (FUENTE: CCMO 2022)	128,592	RELLENO	40%	51,437
GALERÍAS NIVEL 200	87,719	VACÍO	100%	87,719
GALERIAS NIVEL 270	37,975	VACÍO	100%	37,975
COLUMNA MATERIAL DESPLAZADO	67,669	RELLENO	30%	20,301
			<b>TOTAL</b>	<b>425,908</b>

Fuente: Modificado de VAlgs (2023)



#### 3.4.4 Volumen Acumulado en Sector Mina Alcaparrosa

En función de los análisis anteriores, y considerando además que el volumen conducido a la Planta PAC está consignado en los procesos ambientales de Alcaparrosa, el Volumen Acumulado al interior mina se compone de aquel monto conducido al sector inferior mina (VAD = 1.182.665 m<sup>3</sup>), junto con el volumen encapsulado en el sector de los caserones Gaby-01, Gaby-04, Gaby-12, Galerías 200 y 270, así como de la columna de material desplazado por el socavón y que asciende a 425.908 m<sup>3</sup>.

De esta forma, al 18 de octubre de 2023 habría un monto acumulado en el sector interior de la mina Alcaparrosa del orden de 1.608.573 m<sup>3</sup>.

### 3.5 Efectos Socavón sobre el Agua Subterránea en el Acuífero de Copiapó

#### 3.5.1 Efecto General sobre los Niveles de Agua Subterránea en Sector Alcaparrosa.

Respecto de la disponibilidad del acuífero y de las aguas almacenadas en el SHAC 4, se debe indicar que la situación histórica observada en el acuífero de Copiapó y en específico en el sector de Alcaparrosa, como muestra la Figura 3-22, los niveles freáticos próximos al sector del socavón, monitoreados en el Pozo 12, Pozo 8 y Pozo 14, alcanzaron rangos de entre 120 a 140 metros de profundidad entre los años 2012 a 2017, situación en la que el flujo pasante regional llegó a una condición mínima o casi nula. Posterior a eso, producto de los eventos hidrológicos de la cuenca, principalmente el ocurrido en 2017, se generó un aumento de los niveles freáticos hasta caso los 40 metros de profundidad en febrero de 2020, para luego comenzar a disminuir hasta alcanzar profundidades de 61 metros en el pozo 12, previo al socavón, y de casi 70 metros cuando se logra recuperar la tasa de descensos a condiciones pre-socavón.

Por lo tanto, en términos de la disponibilidad, se puede indicar que el acuífero en el sector de Alcaparrosa presenta condiciones medias históricas de aproximadamente 70 metros de profundidad, tal como se aprecia en la Figura 3-22. La influencia del socavón en los niveles de agua subterránea no cambia dicha condición media, por lo tanto, los pozos de terceros seguirán operando bajo la misma condición como si no hubiese ocurrido el socavón (no verán afectada su disponibilidad en esta condición media del acuífero).

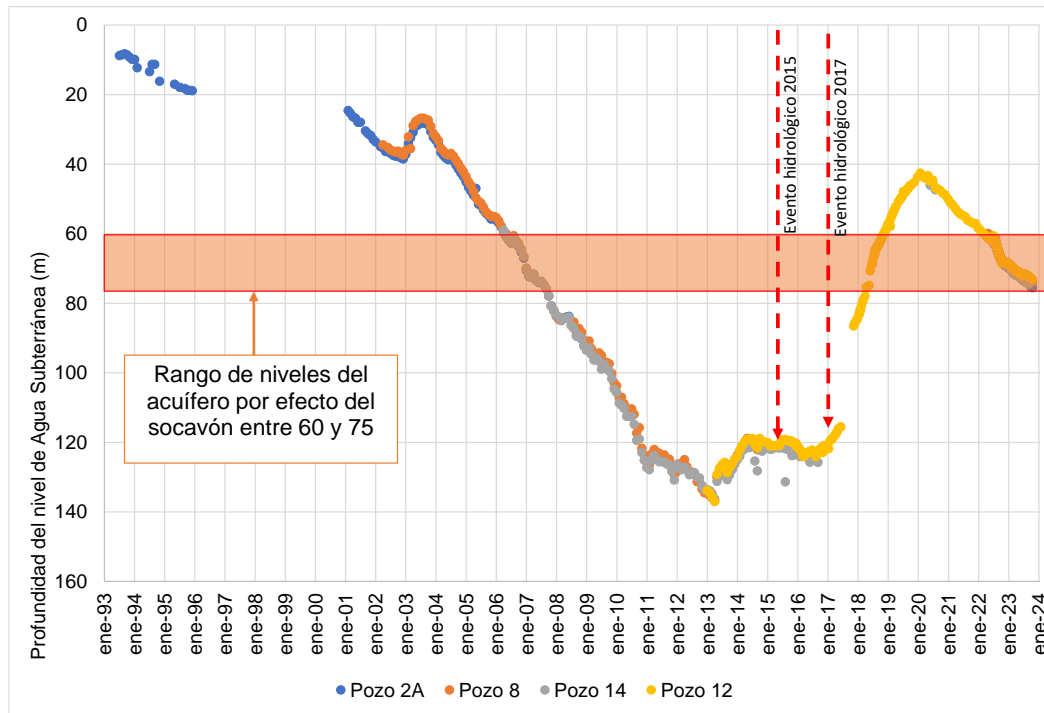
Es importante mencionar que el acuífero en el sector de Alcaparrosa, desde febrero de 2020 ya evidenciaba una condición de descensos sostenidos, y tal como se ha comentado en este documento, la información de niveles en los pozos de monitoreo muestra que debido a las medidas implementadas, tales como la construcción de los sellos de hormigón, así como el llenado del sector Gaby, se generó una recuperación del sistema, tal que desde mediados de diciembre se logran recuperar las tasas de descenso (como se aprecia en la Figura 3-23).

#### 3.5.2 Efecto sobre los Pozos para Consumo de Agua Potable

Respecto de los usos de agua potable en el SHAC 4, estos se localizan en el sector de Paipote, a más de 7 km aguas abajo de la posición del socavón, tal como se presenta de manera general en la Figura 3-24.

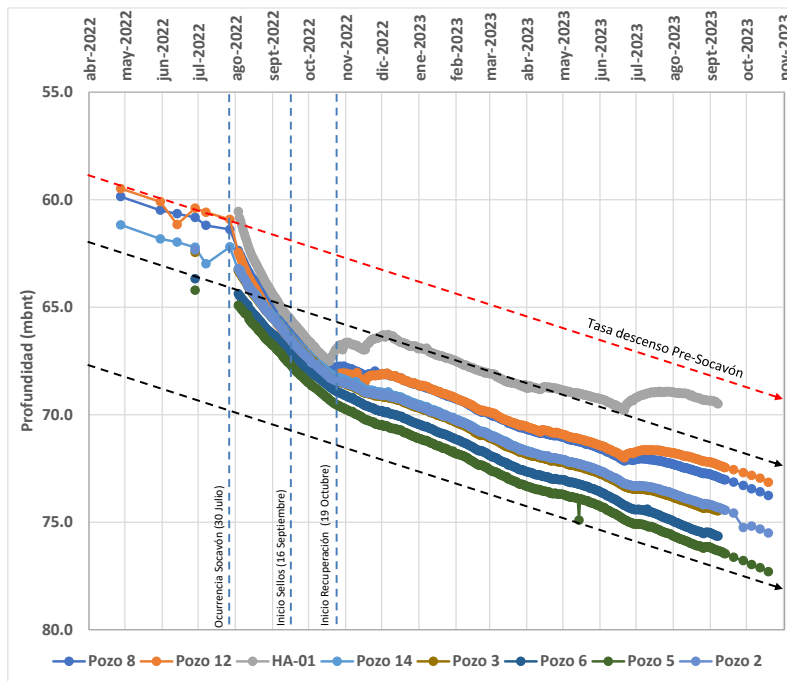
En particular el Pozo 15 ubicado en dicho sector no ha mostrado una merma del nivel producto de la situación del socavón, debido a que su influencia sólo abarca el área de Alcaparrosa. Además, tal como se indicó previamente, los pozos de Tierra Amarilla (Pozo 2, Pozo 3, Pozo 5 y Pozo 6) y Alcaparrosa (Pozo 8, Pozo 12, Pozo 14 y Pozo HA-01) desde mediados de diciembre recuperaron la tasa de descenso histórica pre-socavón (como se aprecia en la Figura 3-23).

**Figura 3-22: Evolución de los niveles históricos en acuífero de Copiapó y rango del acuífero en periodo afectado por el socavón**



Fuente: Elaboración propia

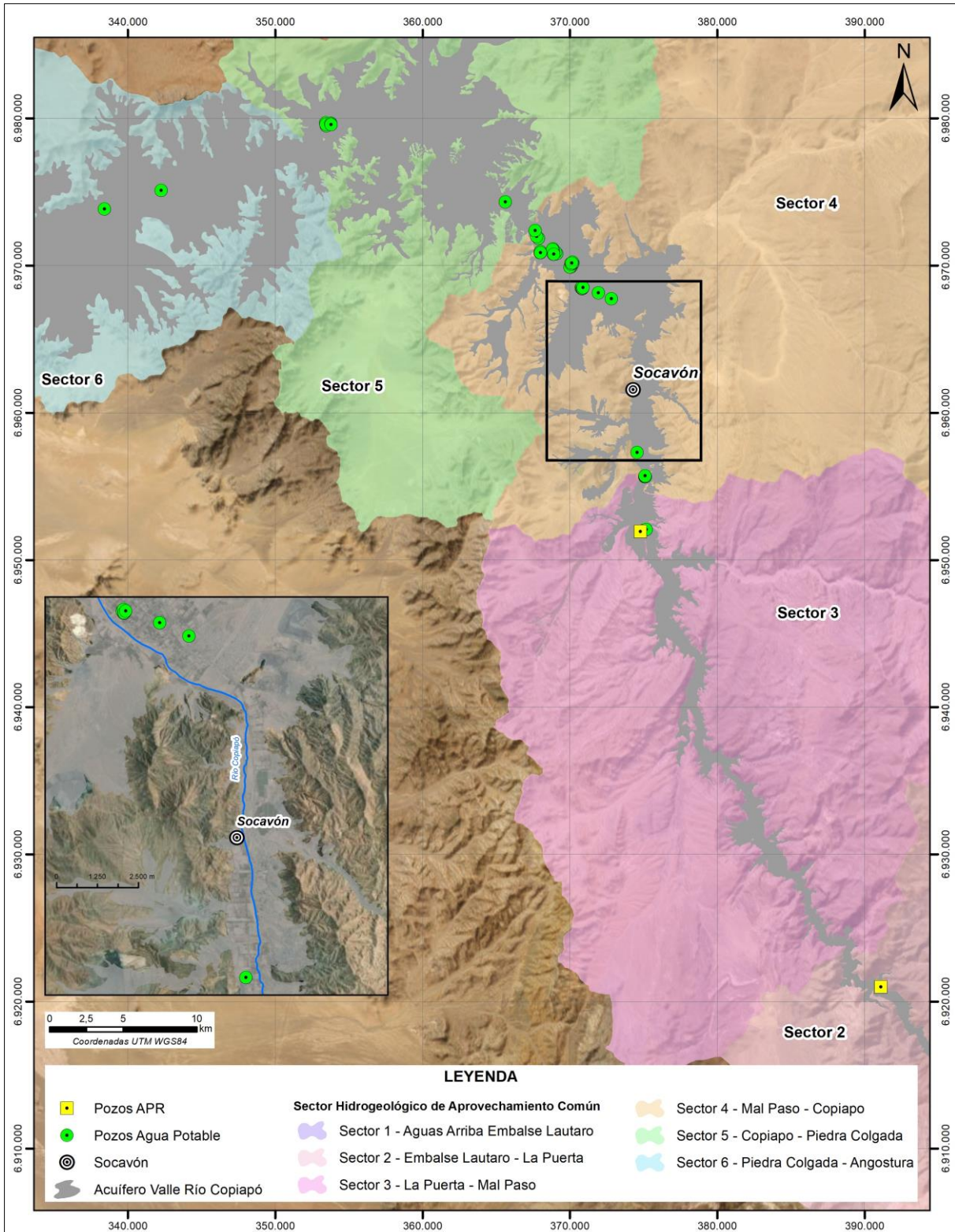
**Figura 3-23: Niveles Freáticos Pozos de Monitoreo Tierra Amarilla y Alcaparrosa**



Nota: Pozo 5, presenta dato anómalo del 14/05/23. Corresponde a un error de registro, se indica 74,91m en vez de 73,91m. Sin embargo, se ha mantenido el dato informado.

Fuente: Elaboración propia

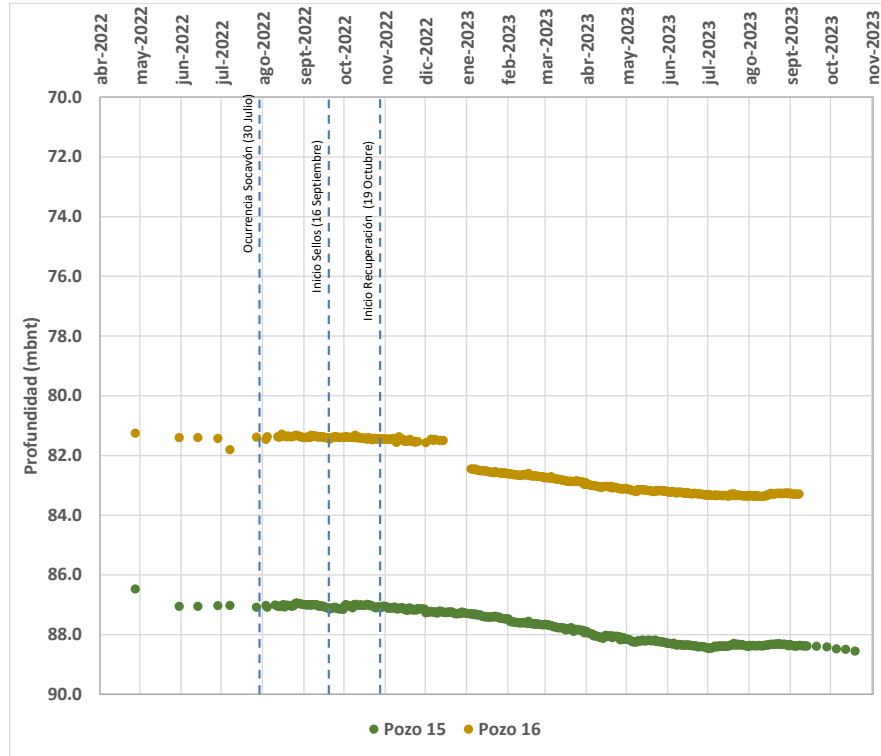
**Figura 3-24: Ubicación Pozos de Bombeo para Agua Potable**



Fuente: HIDROMAS. Informe Técnico. Estudio de Demanda Hídrica Sistema Acuífero del Río Copiapó. 2021.

Por lo tanto, se descarta la afectación de los pozos de agua potable ubicados aguas abajo de Paipote, y con mayor razón no existe posibilidad de afectación de los pozos del SHAC 5 y SHAC 6. En la Figura 3-25 se muestra el nivel freático del pozo de Paipote, Pozo 15.

**Figura 3-25: Variación de Niveles de Agua Subterránea en Pozos de Monitoreo Paipote**



Fuente: Elaboración propia

### 3.5.3 Propagación del Cono de Descenso debido al Efecto del Socavón

Para el análisis del cono de depresión provocado de manera directa por el volumen drenado desde el acuífero de Copiapó debido al Socavón, se preparó un análisis basado en un modelo numérico de tipo regional (HIDROMAS, 2023) que permite comparar la situación de dos casos simulados:

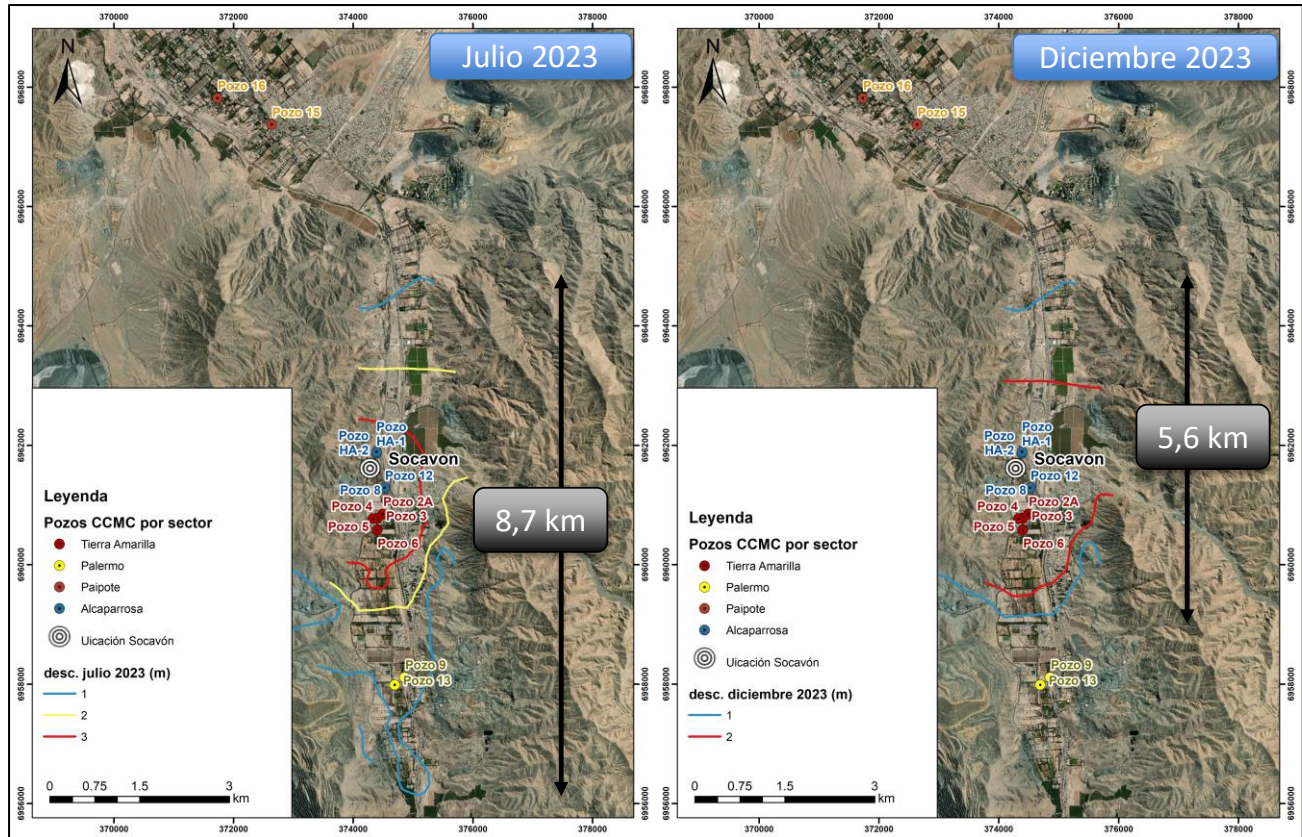
- Escenario Sin Ocurrencia del Socavón: Considera una situación hipotética en donde el socavón nunca hubiese ocurrido, y el acuífero mantiene la dinámica de extracciones y recargas históricas.
- Escenario Con Ocurrencia del Socavón: Considera la situación real, donde se construyeron los sellos en el sector Gaby, simulando los caudales que ingresaron al fondo mina y enviados a superficie.

Los resultados de ambos análisis se presentan de manera gráfica en la Figura 3-26 para las siguientes fechas específicas:

- Julio 2023.
- Diciembre de 2023



**Figura 3-26: Evolución Cono de Depresión Asociado al Socavón**



Fuente: Elaboración propia a partir de resultados Modelo Hidrogeológico

Para este análisis se ha simulado que los efectos de drenaje del acuífero a través del socavón se extienden por 30 días adicionales luego de construidos los sellos de hormigón y detenido el flujo a través de las válvulas (16 de septiembre de 2022), periodo en el que se inundaría el sector Gaby de la mina subterránea (VAIGS, 2023). El cono de descenso se ha definido hasta donde la diferencia de niveles es de 1 metro entre los casos con y sin socavón, lo que se considera un descenso menor en comparación a los descensos globales.

La Figura 3-26 muestra que el cono de descenso, a un año de producirse el socavón en julio de 2023, se habría propagado unos 8,7 km de distancia, en tanto que, a diciembre 2023, se proyecta que el cono disminuye su extensión alcanzando aproximadamente 5,6 km de distancia. Es importante recalcar que al alejarse del sector mismo del socavón el descenso de los niveles de agua subterránea se reducen.

Un aspecto importante que resaltar, es que, si bien el socavón ha generado un efecto en términos de niveles de aguas subterráneas en el acuífero, y que este efecto se ha propagado en el Sector de Alcaparrosa, los niveles de agua subterránea están lejos de llegar a la condición observada entre los años 2013 y 2017, cuando en este mismo sector el nivel freático sobrepasó los 130 m de profundidad.

### 3.5.4 Efecto sobre el Flujo Pasante a Sector Paipote

A partir de la determinación de los conos de depresión asociados al drenaje del acuífero provocado por el socavón, se han evaluado dos secciones de flujo pasante, ubicadas aguas abajo de éste. En la Figura 3-27 se presenta la Sección 1, que representa el flujo pasante desde el sector de Alcaparrosa al sector de Paipote, y se presenta la Sección 2 que representa el flujo pasante desde Paipote hacia la zona de la ciudad de Copiapó.

En la Figura 3-28 se presentan los caudales pasantes en los escenarios Sin Socavón y Con Socavón con sellos de hormigón instalados el 16 de septiembre de 2022, para las dos secciones de interés. Los resultados del análisis muestran que el efecto en los caudales subterráneos es poco significativo en la Sección 1 hacia Paipote, con una reducción de 13 L/s equivalente al 6 % del flujo pasante, mientras que el efecto del socavón sería imperceptible en el flujo pasante hacia la ciudad de Copiapó, con una reducción de 3 L/s, que equivale a menos del 1 % del flujo pasante. Por lo tanto, el efecto quedaría contenido sólo en la zona de Alcaparrosa.

Del análisis de los antecedentes disponibles, en lo principal sobre los niveles de aguas subterráneas, se debe indicar que no se generó ni se generará un cambio en la dirección del flujo regional pasante por efectos del socavón.

En este contexto se debe indicar que se revisaron los informes técnicos de SERNAGEOMIN (2022 y 2023)<sup>3</sup>, que consideró un análisis simplificado para la complejidad del problema hidráulico e hidrogeológico. El cambio en la dinámica regional que se expone en dicho informe proviene de un análisis simplificado donde “asume” que el acuífero no tiene capacidad de almacenamiento y por lo tanto el análisis es que todo el flujo subterráneo que pasa por el acuífero en la sección de Alcaparrosa se va directamente por el socavón a la mina subterránea. Este análisis supondría entonces que, hacia aguas abajo de la sección del socavón, no habrá flujo subterráneo pasante y por lo tanto todos los usuarios aguas abajo no tendrían oferta de agua para satisfacer sus usos. A continuación, se cita texto del informe:

*“Posterior al evento, el descenso de los niveles piezométricos acentuados hacia la subsidencia indicó la formación de un cono de depresión que permitió estimar un flujo de entrada entre 330 y 340 l/s, congruente con los 287 l/s calculados a partir de los volúmenes acumulados en el interior de la mina hasta la fecha. Este cambio en los niveles modificó la dirección del flujo regional sobrepasando el caudal de aguas disponibles en la sección del valle.”*

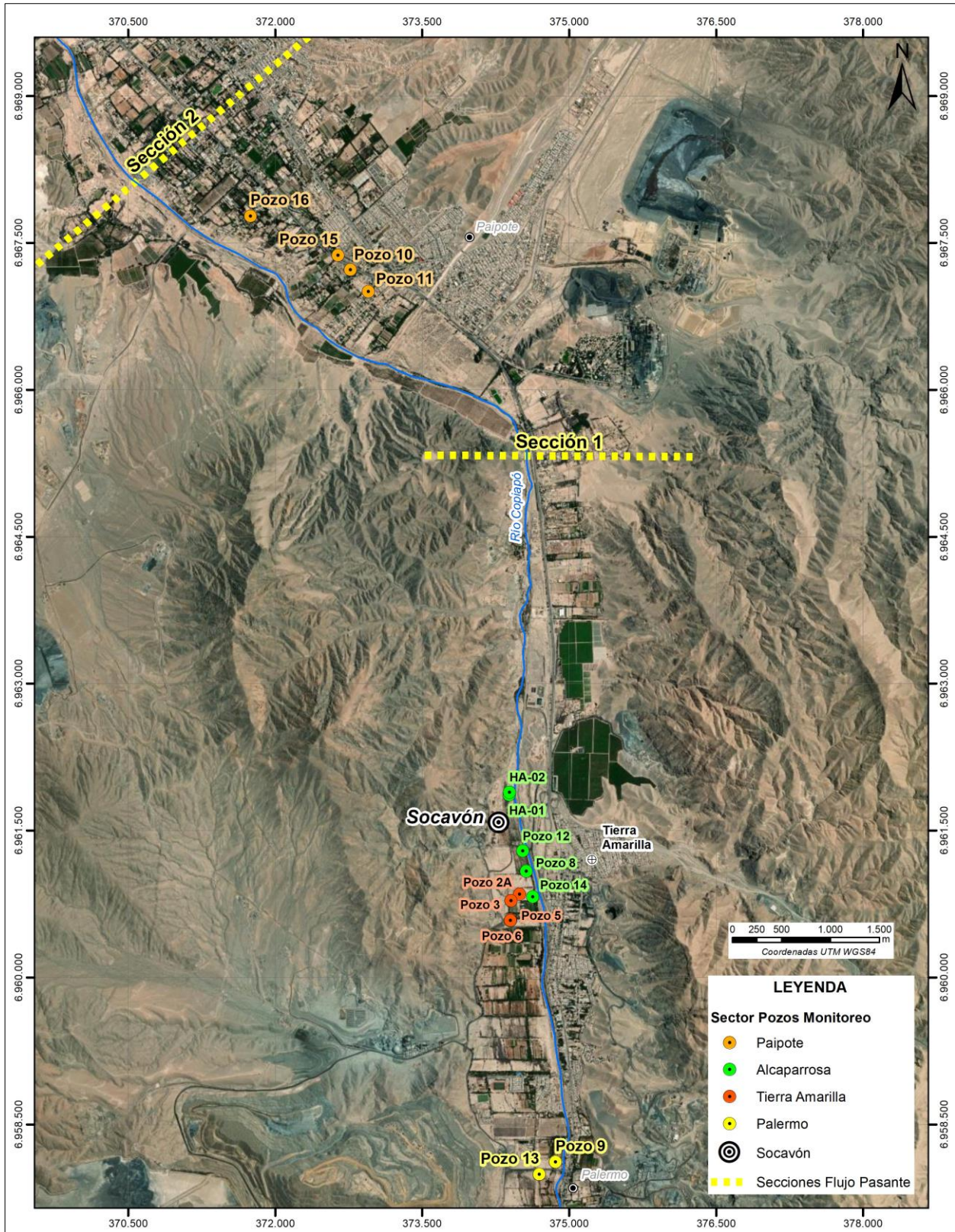
Ese juicio se ratifica en su análisis conceptual mediante la Figura 56 de su informe del año 2023 (Figura 3-29 del presente informe), donde se aprecia la interpretación de un flujo subterráneo transversal a la sección en la situación pre-socavón (flujo sur-norte), mientras que en la situación post-socavón se interpreta como que el flujo regional es ahora hacia el socavón, cortándose por completo el flujo hacia aguas abajo.

<sup>3</sup> SERNAGEOMIN. 2022. Antecedentes Hidrogeológicos Preliminares sobre la Subsidencia en la Mina Alcaparrosa, Tierra Amarilla, Región de Atacama.

SERNAGEOMIN 2023. Informe Técnico “Caracterización Hidrogeológica del Área Afectada por la Subsidencia del 30 de Julio de 2022 en la Mina Alcaparrosa, Comuna de Tierra Amarilla, Región de Atacama, Chile”.



**Figura 3-27: Secciones de Flujo Pasante Aguas Abajo del Socavón**



Fuente: Elaboración propia a partir de resultados Modelo Hidrogeológico

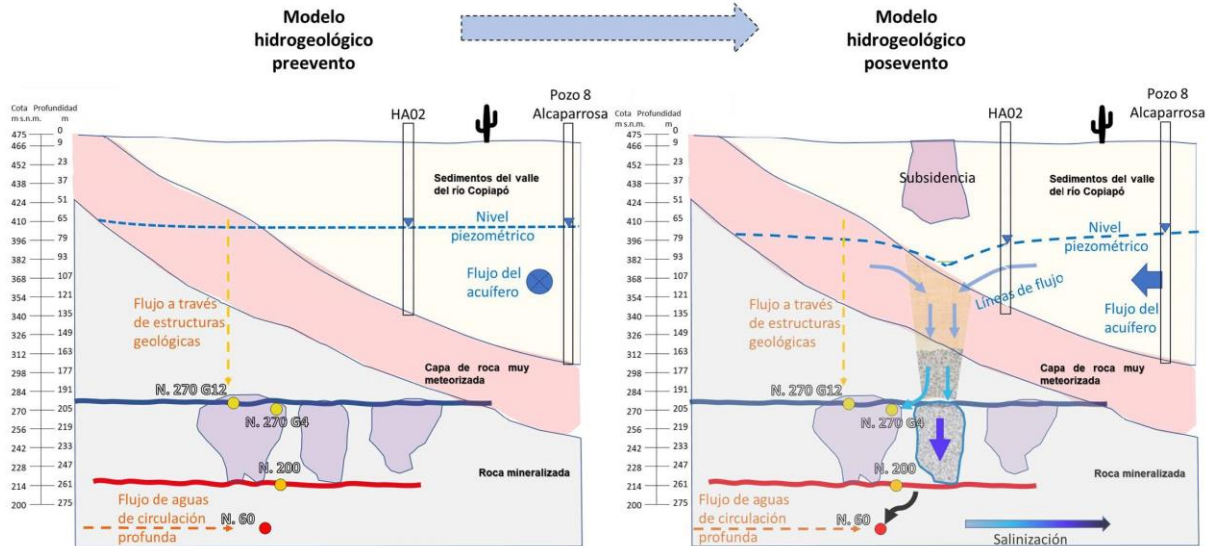
**Figura 3-28: Caudales Pasantes en Secciones 1 y 2. Casos Con Socavón y Sin Socavón**



Fuente: Elaboración propia a partir de resultados Modelo Hidrogeológico



**Figura 3-29: Modelo Conceptual SERNAGEOMIN situación Socavón.**



Fuente: Extraído de la Figura 17 Informe SERNAGEOMIN (2023)

El modelo conceptual de SERNAGEOMIN no considera la situación histórica observada en el acuífero de Copiapó y en específico en el sector de Alcaparrosa, donde tal como muestra la Figura 3-22, los niveles freáticos próximos al sector del socavón, monitoreados en el Pozo 12 alcanzaron rangos de entre 120 a 140 metros de profundidad entre los años 2012 a 2017, situación en el que el flujo pasante regional llegó a una condición mínima o casi nula. Posterior a eso, producto de los eventos hidrológicos de la cuenca, principalmente el ocurrido en 2017, se generó un aumento de los niveles freáticos hasta casi los 40 metros de profundidad en febrero de 2020, para luego comenzar a disminuir hasta alcanzar profundidades de 61 metros en el Pozo 12, previo al socavón, y de casi 69 metros cuando se logra recuperar la tasa de descensos a condiciones pre-socavón.

Por lo tanto, al comparar la situación actual de niveles en los Pozo HA-01, Pozo HA-02 y Pozo 12, próximos al socavón, se puede indicar que:

- La situación actual de la profundidad del nivel es una condición intermedia de la evolución histórica de los niveles en el sector de Alcaparrosa y en el área del socavón, muy lejos aún de los 120 a 140 metros de profundidad observados entre los años 2012 y 2017.
- La situación anterior, muestra que los descensos observados producto del socavón no han generado una reducción o corte total del flujo pasante, ya que, el espesor saturado de la zona afectado se ha mantenido y no ha llegado a sus niveles mínimos registrados entre 2012 y 2017,, a diferencia de lo señalado en el modelo conceptual de SERNAGEOMIN (2022).
- Al proyectar el descenso del sector en los pozos de Alcaparrosa se estima que el efecto del socavón sería de aproximadamente 4 a 5 metros en los Pozo HA-01 y Pozo 12 (Figura 3-23). Esto implicaría que el espesor saturado sería del orden de los 70 metros al menos, considerando que en la condición de 2012 a 2017 el nivel estuvo a 140 metros de profundidad.
- Ante lo anterior, es posible indicar que el espesor saturado se disminuyó del orden del 5 a 7%, por lo tanto, es factible indicar que en la misma proporción se disminuyó el flujo subterráneo pasante y, por lo tanto, el mayor aporte de agua ingresado al interior mina proviene del almacenamiento del acuífero.

Ante la baja disminución del flujo pasante es posible indicar que no se afectan los niveles en el sector de Paipote (aguas abajo), donde están las extracciones de agua potable (Figura 3-24). Tal como se observa en la Figura 3-9, el Pozo 15 de Paipote a inicios del año 2020 estaba en un máximo producto de la recuperación que observó el acuífero producto de los eventos 2015 y 2017, y a partir de febrero del 2020 retomó la tasa de descenso histórica que se mantiene en la actualidad, al igual que en el resto del acuífero.

Por lo tanto, tal como lo muestran los niveles aguas subterráneas, se descarta que el socavón haya provocado un cambio en la dirección del flujo regional e inclusive, aguas abajo en la zona de Paipote (Pozo 15) no se evidencian efectos asociados al flujo pasante por efectos del socavón, y considerando la operación de los sellos y que desde mediados de diciembre se está retomando la tendencia histórica de las tasas de descensos, es que se descarta además, que se genere un cambio futuro en la dirección del flujo regional.

### 3.5.5 Efecto sobre Pozos de Terceros

En referencia al efecto sobre el uso de terceros, en las cercanías del socavón, se identificaron nueve (9) pozos con derechos de aprovechamiento de aguas que operan o han operado en el último período, cuya distribución espacial se presenta en la Figura 3-30. La información de estos pozos fue obtenida del sistema de Monitoreo de Extracciones Efectivas (MEE, 2022) de la DGA.

El análisis consiste en evaluar la capacidad de extracción de estos pozos, considerando el caudal impuesto en el modelo numérico y así verificar que, durante el período de simulación y ante los efectos adicionales de disminución de nivel por el socavón, no reduzcan la capacidad de extracción de ninguno de los pozos de análisis.

En la Tabla 3-2 se presenta información de los pozos del MEE (2022), señalando el código de obra, a que rubro o sector de producción pertenecen, el titular, el derecho de agua otorgado, si se encuentra activo o habilitado el pozo, caudal promedio según registro del MEE (2022), disminución del caudal impuesto según resultado del modelo numérico, la distancia al socavón y el efecto máximo que corresponde a la máxima diferencia entre la modelación sin Socavón y con Socavón.

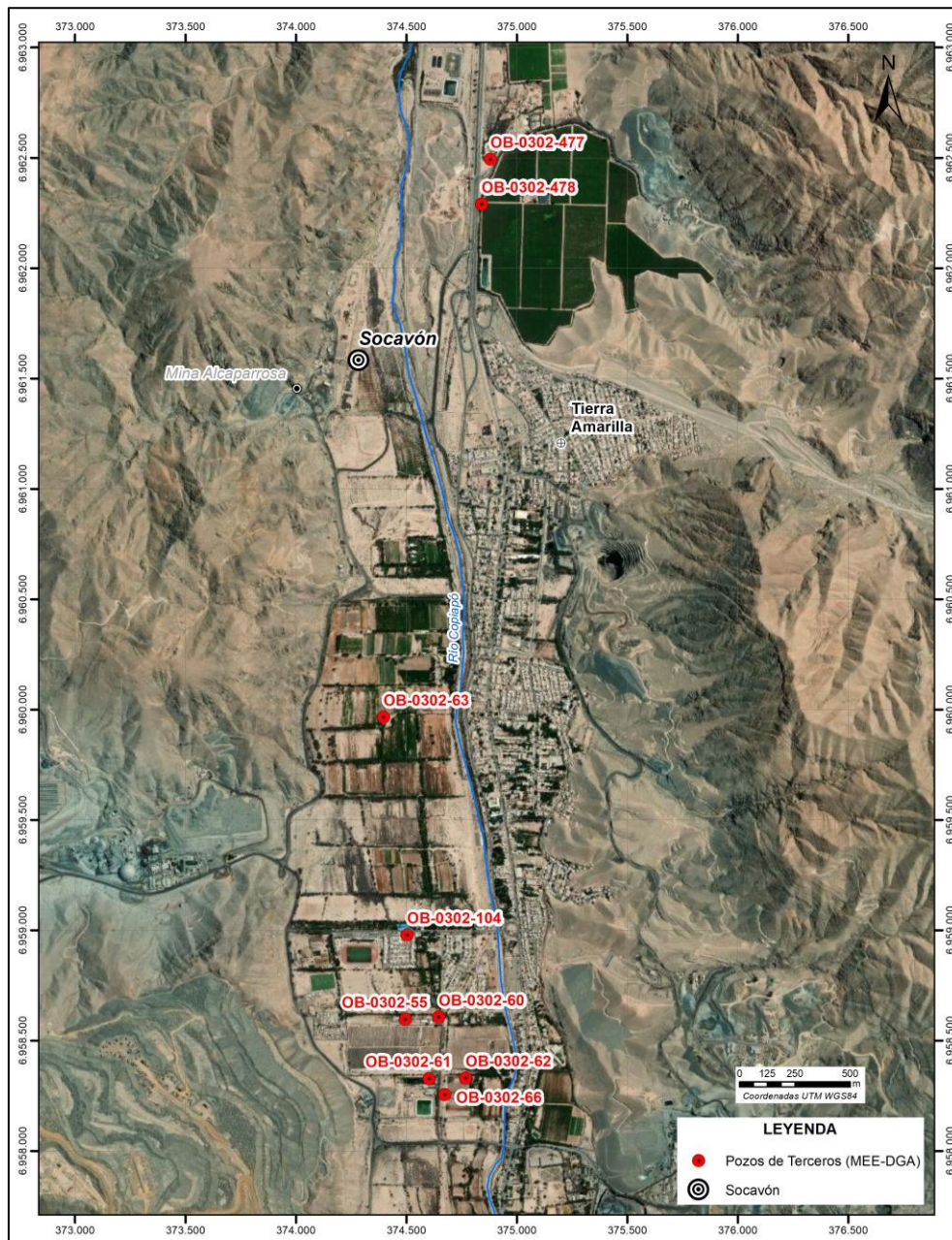
**Tabla 3-2: Efectos Sobre Terceros, Pozos del MEE (2022)**

Código de Obra	Titular	Rubro	DDA (L/s)	Activo	Caudal MEE (L/s)	Disminución de caudal según modelo (%)	Distancia a Socavón (m)	Efecto máx. en descenso adicional (m)	Efecto máx. a Junio 2023 (m)
OB-0302-477	Jacobo Riff	Agrícola	40	Si	3,6	0%	1068	3,0	2,8
OB-0302-478	Jacobo Riff	Agrícola	60	Si	8,7	0%	880	3,4	3,0
OB-0302-63	Pucobre	Minería	44	No	0,0	-	1645	3,3	3,0
OB-0302-55	Pucobre	Minería	10	No	0,0	-	3018	2,6	1,3
OB-0302-60	Pucobre	Minería	11	Si	5,3	0%	3022	2,6	1,3
OB-0302-61	Pucobre	Minería	25	Si	23,1	0%	3295	2,6	1,2
OB-0302-62	Pucobre	Minería	23	Si	15,1	0%	3312	2,6	1,2
OB-0302-66	Pucobre	Minería	20	Si	14,7	0%	3374	2,5	1,2
OB-0302-104	Mun. Tierra Amarilla	Otros	30	No	0,0	-	2638	2,6	1,4

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 3-2 se observa que, el efecto máximo adicional de descenso provocado por el socavón se da en los pozos ubicados a menos de 2 km de distancia, variando dicho efecto entre 3,5 y 5,2 m respecto de la condición proyectada sin socavón. Para los pozos ubicados a más de 2 km, el efecto adicional de disminución de niveles no supera los 1,4 m. En todos los casos se verifica que el caudal de extracción de los pozos impuestos en el modelo numérico no se ve disminuido ante la variación de niveles producto del efecto del socavón, por lo que se descarta una afectación a la capacidad de extracción de los pozos de terceros, lo cual resulta lógico considerando que los descensos adicionales no llevan al acuífero a la condición de sequía extrema observada entre 2013 y 2017.

**Figura 3-30: Pozos de Bombeo Registrados en el Monitoreo de Extracciones Efectivas**



Fuente: Elaboración propia a partir de MEE (2022)



### 3.6 Efecto sobre la Disponibilidad de Agua Subterránea del Acuífero de Copiapó

Como conclusión principal de los antecedentes anteriormente expuestos no se puede desconocer la situación ocurrida el día 30 de julio de 2022, donde, debido a la ocurrencia del socavón, se generó una conexión hidrogeológica entre el relleno sedimentario del acuífero de Copiapó y el interior de la Mina Alcaparrosa, lo que permitió la entrada de agua desde el acuífero de Copiapó a la Mina Subterránea.

No obstante lo anteriormente señalado, los antecedentes técnicos planteados previamente permiten concluir lo siguiente en relación con diversos aspectos de la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero de Copiapó, y en particular en el sector de Alcaparrosa:

- En términos de la disponibilidad de las aguas subterráneas, se puede indicar que el acuífero en el sector de Alcaparrosa presenta en la actualidad condiciones medias históricas de aproximadamente 70 metros de profundidad del nivel de agua subterránea. La influencia del socavón en los niveles de agua subterránea no ha cambiado dicha condición media, por lo tanto, dado que los pozos de terceros no fueron afectados por el efecto inicial del descenso de niveles debido al socavón, no se espera que presenten problemas en el futuro cercano, debido a la influencia cada vez menor del socavón. Todo lo anterior indica que ellos (los pozos de terceros) seguirán operando como si el socavón nunca hubiese ocurrido, pero tendrán que adaptarse a las condiciones de descenso generales del acuífero de Copiapó debido a que el uso continuo y permanente de agua subterránea supera la recarga del sistema.
- El acuífero en el sector de Alcaparrosa, desde febrero de 2020, ya evidenciaba con una condición de descensos sostenidos (descensos de 2 cm/día) y, tal como se ha comentado en este documento, la información de niveles en los pozos de monitoreo muestra que debido a las medidas implementadas, tales como la construcción de los sellos de hormigón, así como el llenado del sector Gaby, generó una recuperación del sistema, tal que desde mediados de diciembre se logran recuperar las tasas de descenso previas.
- La estructura geológica fue modificada localmente por efectos del socavón, ya que éste generó un efecto sumidero equivalente al generado por la operación de un pozo o dren de gran diámetro. Sin embargo, el cambio de estructura geológica que se ha informado abarca aproximadamente un 0,005% en el acuífero, es decir, esta situación corresponde a una particularidad en lo que respecta a la conexión hidrogeológica en toda la extensión del sistema acuífero. Es importante indicar además que este efecto de conexión hidrogeológica se ha revertido una vez que se hicieron efectivos los sellos de hormigón el 16 de septiembre de 2022, logrando la recuperación de las tasas de descenso de la condición pre-socavón.
- Una vez ocurrido el socavón el 30 de julio de 2022, los niveles comenzaron a descender a una mayor tasa y tal como se indica, esta superó los 20 cm/día en los tiempos iniciales post-socavón. Ahora bien, el día 16 de septiembre del 2022 se dio inicio al encapsulamiento del sector Gaby debido al funcionamiento de los sellos de hormigón, cuyo efecto se aprecia en el acuífero el día 19 de octubre de 2022, revirtiendo la tendencia al descenso sostenido producto del socavón, observado principalmente en los Pozo HA-01, Pozo HA-02 y Pozo 12, los más cercanos al socavón.
- Posterior a esa situación, los pozos del entorno comienzan a retomar la tasa de descenso original de 2 cm/día, dando cuenta de la efectividad de los sellos en la recuperación de la tendencia de descenso observada en la condición pre-socavón.
- En los últimos meses, y más allá de situaciones específicas que se observan en las figuras que se acompañan, la tasa de descenso en el Pozo HA-02 se ha mantenido del orden de 1,6 cm/d (enero a septiembre de 2023).
- La dinámica del flujo regional no fue modificada por los descensos producidos por el socavón.

Por lo tanto, al recuperar la tendencia original de los niveles de agua subterráneas en el acuífero de Copiapó, se puede concluir que la conexión hidrogeológica que se generó producto del socavón fue controlada, y la efectividad de dicho control se basa en que los muros de hormigón generaron la contención de la entrada de agua a la mina subterránea.

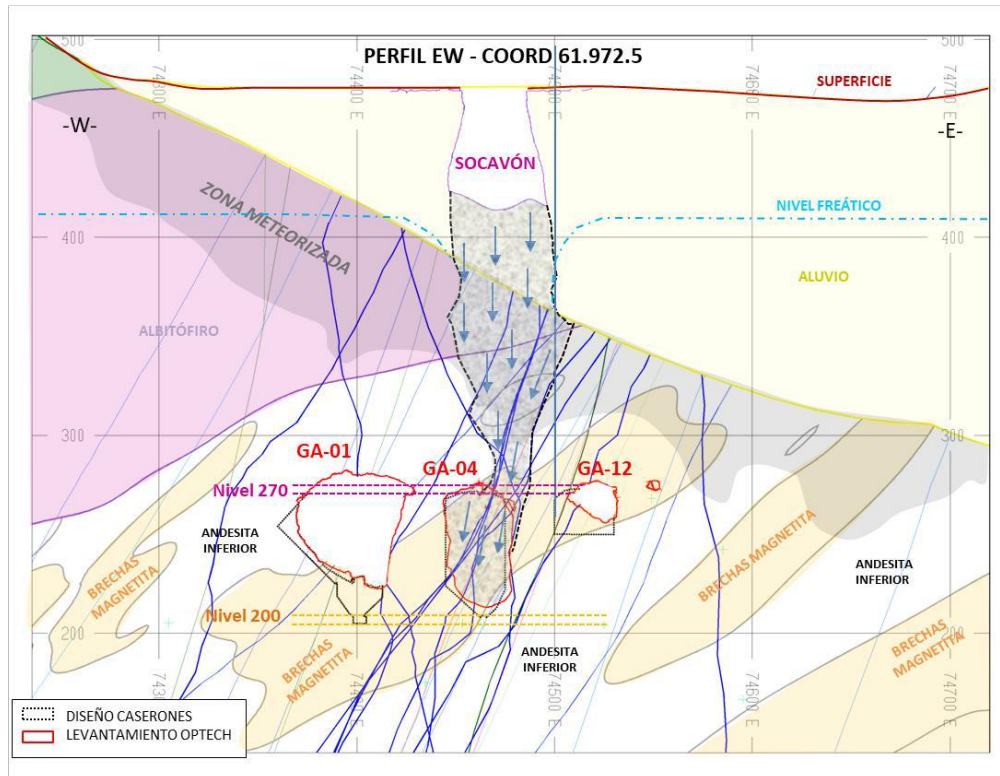


## 4 EFECTOS SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ACUÍFERO

### 4.1 Contexto General

En la Figura 4-1 se muestra una imagen del escurrimiento de agua subterránea, desde el sistema acuífero de Copiapó hacia al interior de la mina Alcaparrosa, debido a la conexión hidrogeológica que se generó debido a la ocurrencia del socavón a fines de julio de 2022.

**Figura 4-1: Sección Transversal en Socavón y Dirección de Flujo desde el Acuífero**



Fuente: Adaptado de VAIGS (2022)

Tal como se observa en esta figura, la dirección del flujo del agua subterránea es desde el sector acuífero hacia el interior mina, lo que indica que no existiría una afectación directa de calidad del agua subterránea en el acuífero de Copiapó, debido a la ocurrencia del socavón, ya que no existen descargas de aguas contactadas hacia el exterior.

La información presentada en la sección anterior indica que el efecto de la conexión hidrogeológica generada por el socavón se encontraría controlada debido a la instalación de sellos de hormigón, los que a partir del día 16 de septiembre de 2022 comienzan a funcionar al detenerse la operación de válvulas de drenaje, todo lo cual se confirma a través de diversos seguimientos de información técnica posteriores a dicha fecha. La información anterior indica que a mediados del mes de octubre de 2023 se habría concluido la inundación o “llenado” de los caserones Gaby-01, Gaby-04, Gaby-12, Galerías 200 y 270, así como de la columna de material desplazado por el socavón. De esta forma, a partir aproximadamente del 19 de octubre de 2022 se habría detenido la infiltración adicional asociada a la conexión hidrogeológica generada por el socavón, lo que

en todo caso no elimina las infiltraciones históricas que se siguen produciendo en montos menores, manteniendo un desplazamiento de aguas del acuífero de Copiapó hacia el interior mina y no viceversa.

En ese sentido, el efecto del socavón y la conexión hidrogeológica que indujo entre el acuífero de Copiapó y el interior mina, sí produjo un desplazamiento adicional de aguas subterráneas que actualmente se encuentran acumuladas en el interior mina, cuya calidad se encuentra alterada debido al desplazamiento a través de un medio rocoso mineralizado, habiendo producido una alteración negativa en la calidad de esa agua subterránea, la que sin embargo se mantiene encapsulada en los niveles inferiores de la mina, así inundando los sectores de los caserones Gaby y el entorno del socavón, con una mínima conexión con las aguas del acuífero.

#### **4.2 Red de Monitoreo de Calidad del Agua Subterránea**

En relación a la calidad de las aguas subterráneas, la red de monitoreo histórica de CCMC cuenta con medición de una batería de parámetros que se miden desde el año 1995, tanto en el Pozo 12 como en su entorno (Grupo de Monitoreo WB-2 que incluye los Pozo 12, Pozo 14 y Pozo 10). En la Figura 4-2 se presentan los puntos de la red de monitoreo de aguas subterráneas.

Luego de la ocurrencia del socavón, Minera Alcaparrosa ha tomado muestras de calidad de las aguas subterráneas en el Pozo 12, debido a que es el pozo de monitoreo más cercano al socavón. Estas muestras corresponden a fechas entre mediados de agosto de 2022 y septiembre de 2023, en las cuales también se levantó información correspondiente al interior de la Mina en tres niveles específicos 90, 200 y 270 m s.n.m. A partir de enero de 2023 los niveles anteriores han quedado inundados o con dificultades de acceso, por lo cual al análisis se han agregado mediciones de los niveles 150 y 290 m s.n.m.

#### **4.3 Calidad del Agua Subterránea en Pozo 12 y su Entorno (Grupo de Monitoreo WB-2)**

La Figura 4-3 muestra la evolución histórica del sulfato en el acuífero aluvial de Copiapó, medido en el Pozo 12, siendo representativo de la última condición entre 400 y 600 mg/l. Esta información se compara con la concentración de sulfato medida post-socavón, encontrándose la concentración de este compuesto dentro del rango histórico de las aguas subterráneas del acuífero. En la Figura 4-4 se muestran los datos más recientes comparados con la situación antes del socavón, desde el año 2020.

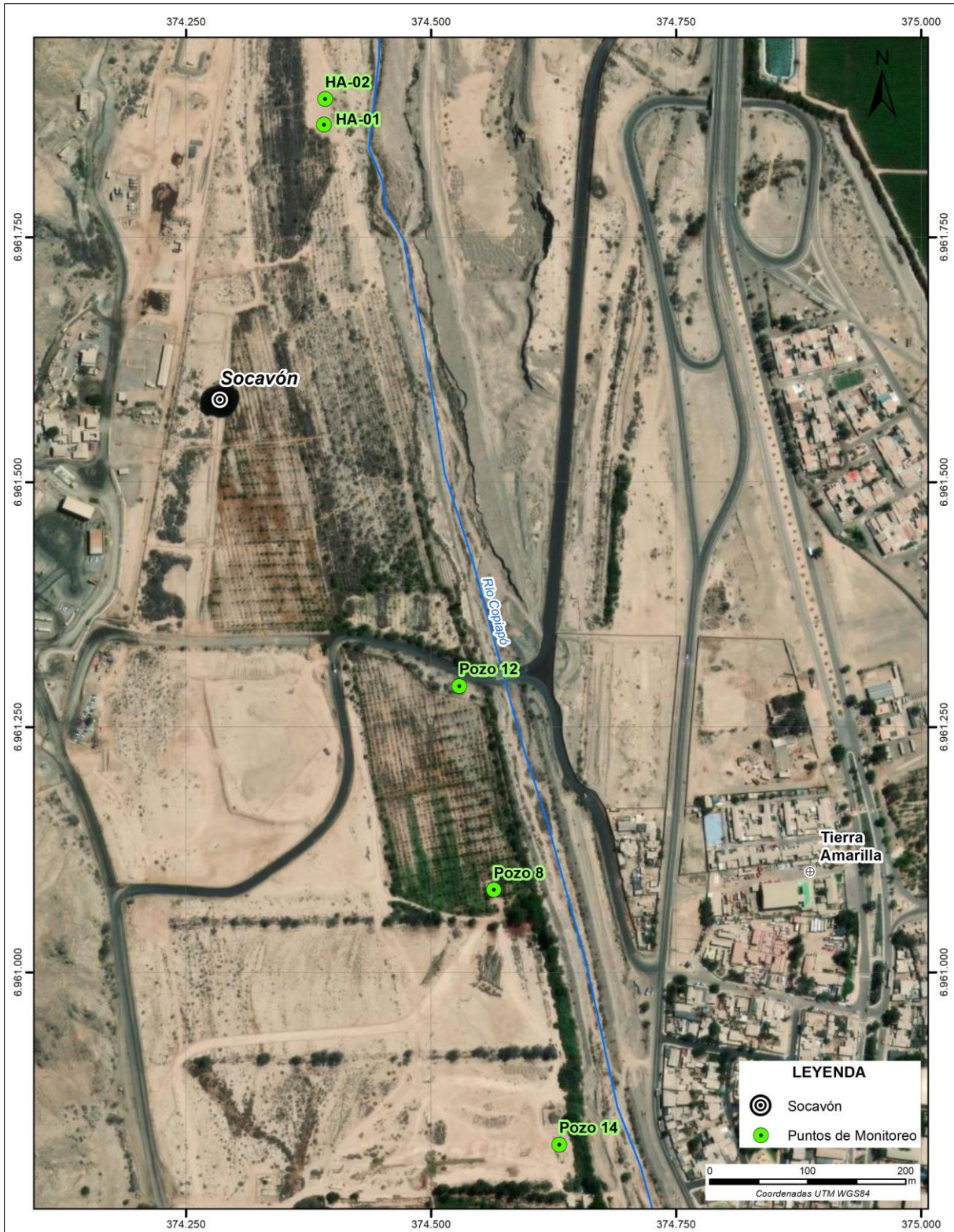
La Figura 4-5 muestra la evolución del pH, el que se encuentra en rangos entre 7,0-8,0 en el acuífero, valor similar al rango identificado post-socavón. En la Figura 4-6 se muestran los datos más recientes comparados con la situación antes el socavón desde el año 2020.

En términos de la Conductividad Eléctrica, la Figura 4-7 muestra que valores representativos del último periodo serían de 1.200 a 1.800 uS/cm para el acuífero. Post-socavón la medición presentó un valor dentro del rango histórico observado. En la Figura 4-8 se muestran los datos más recientes comparados con la situación antes el socavón desde el año 2020.

En conclusión, la calidad del agua subterránea en el acuífero de Copiapó, no se ha visto alterada producto del socavón ocurrido el 30 de julio del 2022, manteniéndose en rangos habituales desde 1995. Lo anterior es razonable dado que los flujos de agua son desde el acuífero hacia el sector Mina de tal manera que no hay descargas de aguas de contacto. Además, los efectos del drenaje en el acuífero no son superiores a los que se observaron en el área en el período 2000 a 2013, de tal manera que las aguas muestreadas no muestran una alteración diferente a las variaciones históricas.

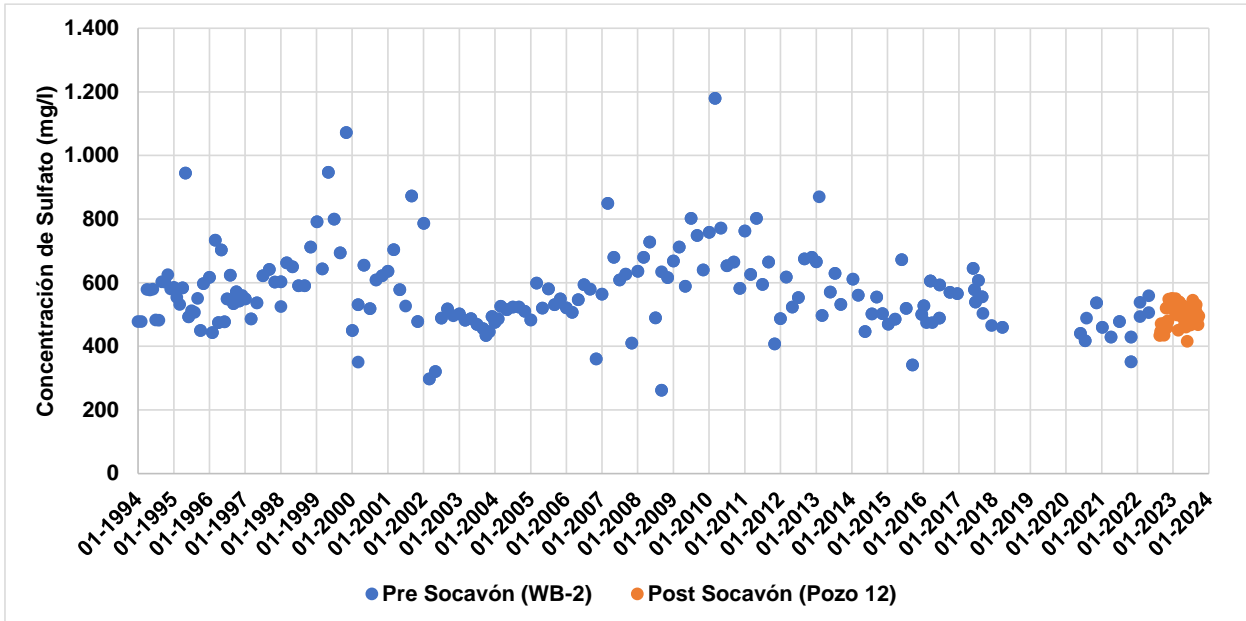


**Figura 4-2: Ubicación Red de Monitoreo de Calidad del Agua y Socavón**



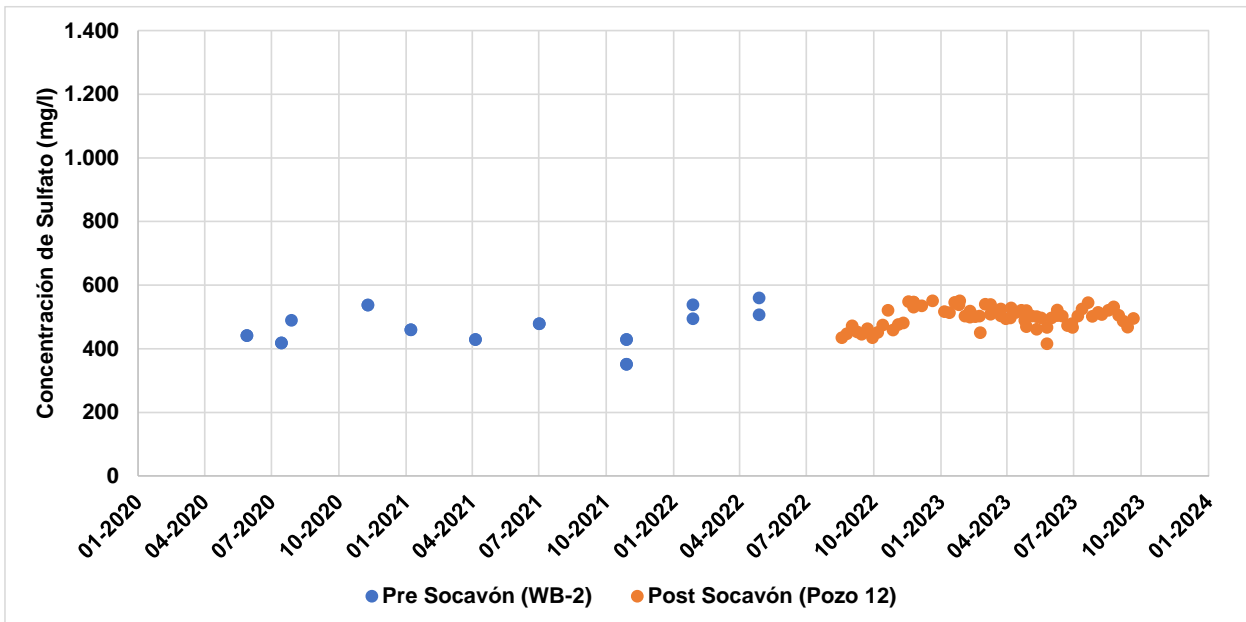
Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-3: Concentración Histórica de Sulfato Pozo 12 y Grupo de Monitoreo WB-2**



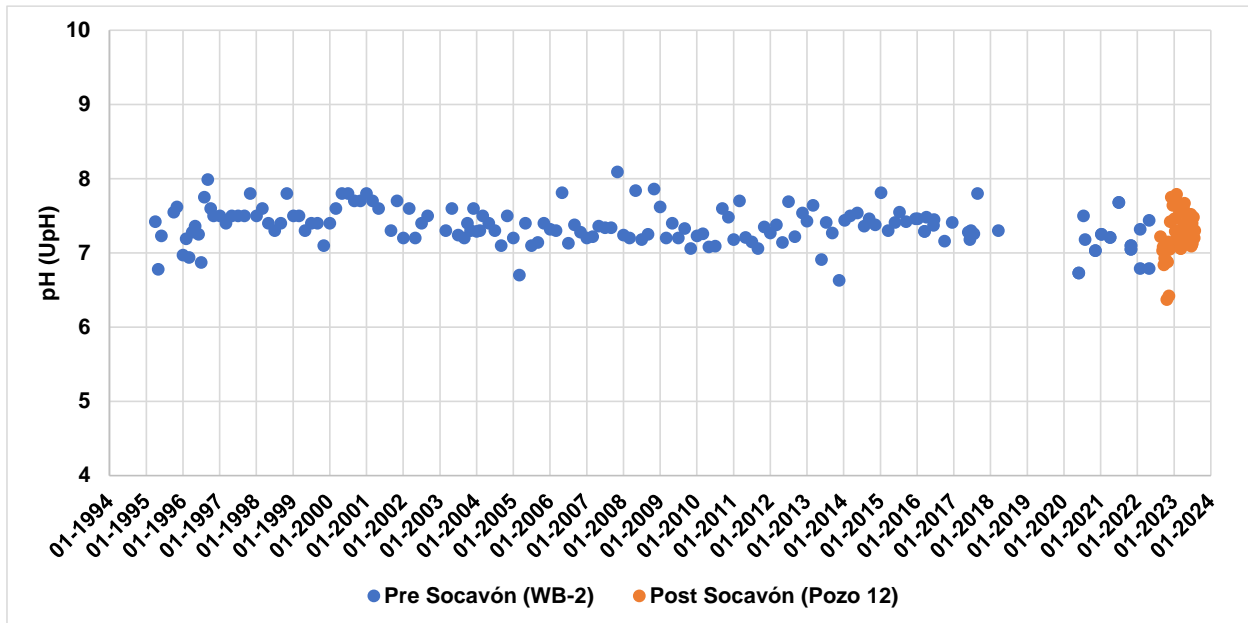
Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-4: Concentración de Sulfato Pozo 12 y Grupo de Monitoreo WB-2 (2020 a la fecha)**



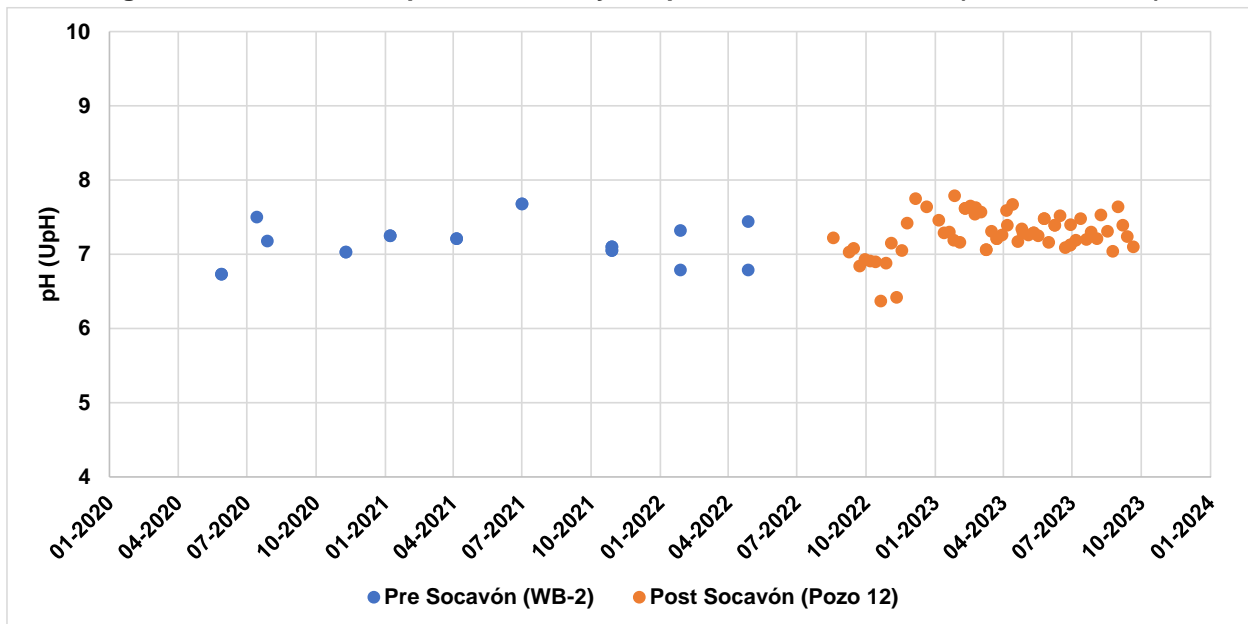
Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-5: Variación Histórica de pH en Pozo 12 y Grupo de Monitoreo WB-2**



Fuente: Elaboración propia

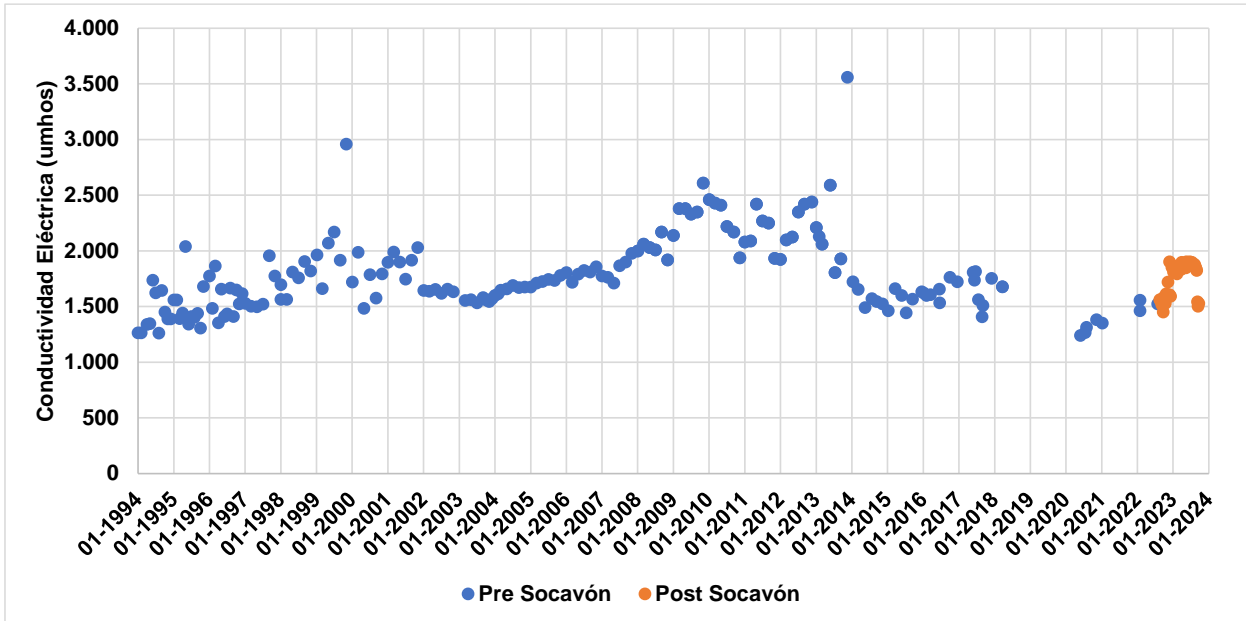
**Figura 4-6: Variación de pH en Pozo 12 y Grupo de Monitoreo WB-2 (2020 a la fecha)**



Fuente: Elaboración propia

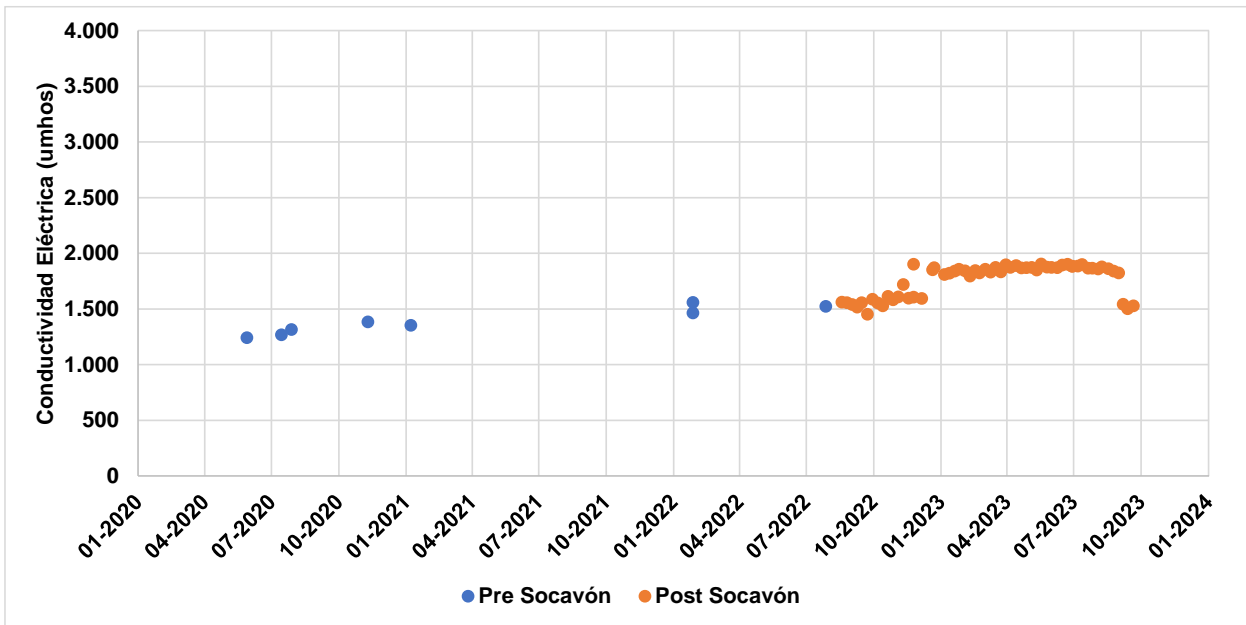


Figura 4-7: Variación Histórica de CE en Pozo 12 y Grupo de Monitoreo WB-2



Fuente: Elaboración propia

Figura 4-8: Variación de CE en Pozo 12 y Grupo de Monitoreo WB-2 (2020 a la fecha)



Fuente: Elaboración propia

#### 4.4 Calidad del Agua Subterránea en Pozo 12, Grupo de Monitoreo WB-2 e Interior Mina (Niveles 200, 270 y 90)

##### 4.4.1 Aspectos Generales

En relación a la calidad de aguas subterráneas, y tal como se indicó previamente, la red de monitoreo cuenta con la medición de una batería de parámetros desde el año 1995. Posterior a la ocurrencia del socavón, Minera Alcaparrosa ha tomado muestras de calidad de las aguas afloradas en el Pozo 12, debido a que es el pozo más cercano al socavón. Estas muestras corresponden a fechas entre mediados de agosto de 2022 y septiembre de 2023, en las cuales también se levantó información correspondiente al interior de la Mina en tres niveles específicos 90, 200 y 270 m s.n.m.

A partir de enero de 2023 los niveles anteriores han quedado inundados o con dificultades de acceso, por lo cual al análisis se han agregado mediciones de los niveles 150 y 290 m s.n.m.

Toda la información anterior se presenta resumida para los parámetros Sulfato, pH, y Conductividad Eléctrica en las Figura 4-9, Figura 4-10 y Figura 4-11, respectivamente, donde a modo de referencia se ha puesto los límites establecidos en las normas NCh 1333 y NCh 409. En estas figuras se aprecia que algunos parámetros como el SO<sub>4</sub> superan algunos de estos límites desde la condición pre-socavón. Lo anterior ocurre en particular para el Pozo 12 y su entorno (grupo WB-02), y corresponde a la situación natural o base en el sistema acuífero. Es importante recordar que los niveles inferiores dentro del interior Mina se encuentran confinados y sin contacto directo con el acuífero de Copiapó.

Otra situación importante de indicar es el incremento en la frecuencia de monitoreo de los pozos de la zona cercana al socavón, lo que ha permitido verificar de manera directa la evolución de la calidad del agua en el período posterior a la ocurrencia del socavón y de las medidas de contención.

##### 4.4.2 Evolución Temporal Parámetros Claves

La evolución histórica del sulfato en el acuífero aluvial de Copiapó, medido en el Pozo 12 y su entorno (Grupo de Monitoreo WB-2), muestra un rango representativo de la última condición, entre 400 y 600 mg/l (franja color gris). Esta información se compara con la concentración de sulfato medida post-socavón, encontrándose la concentración entre 415 y 550 mg/l, es decir, dentro del rango histórico de las aguas subterráneas del acuífero.

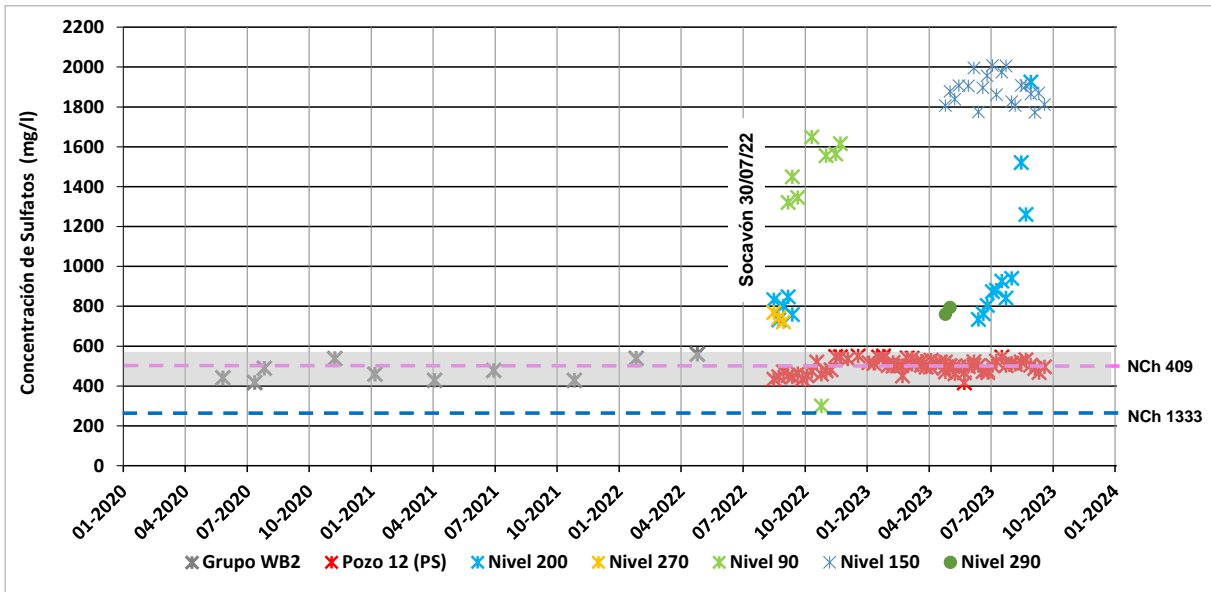
La evolución histórica del pH, el que se encuentra en un rango entre 6,0 y 8,0 en el acuífero (franja color gris), es similar al identificado post-socavón, que se encuentra entre 6,0 y 8,0 unidades de pH.

En términos de la Conductividad Eléctrica, los valores representativos del último periodo estarían aproximadamente entre 1.200 y 1.800 uS/cm para el acuífero (franja color gris). Post-socavón la medición presentó un valor entre 1.450 y 1.900 uS/cm, es decir, dentro del rango histórico observado que llega hasta 2.500 uS/cm.

Se observa que producto de la interacción del agua de drenaje a través del socavón con la roca, en las muestras de interior Mina (Nivel 90, Nivel 200 y Nivel 270 m s.n.m.) existe un cambio en la concentración de algunos parámetros (Sulfato y Conductividad Eléctrica), aumentando al doble o triple de su concentración.

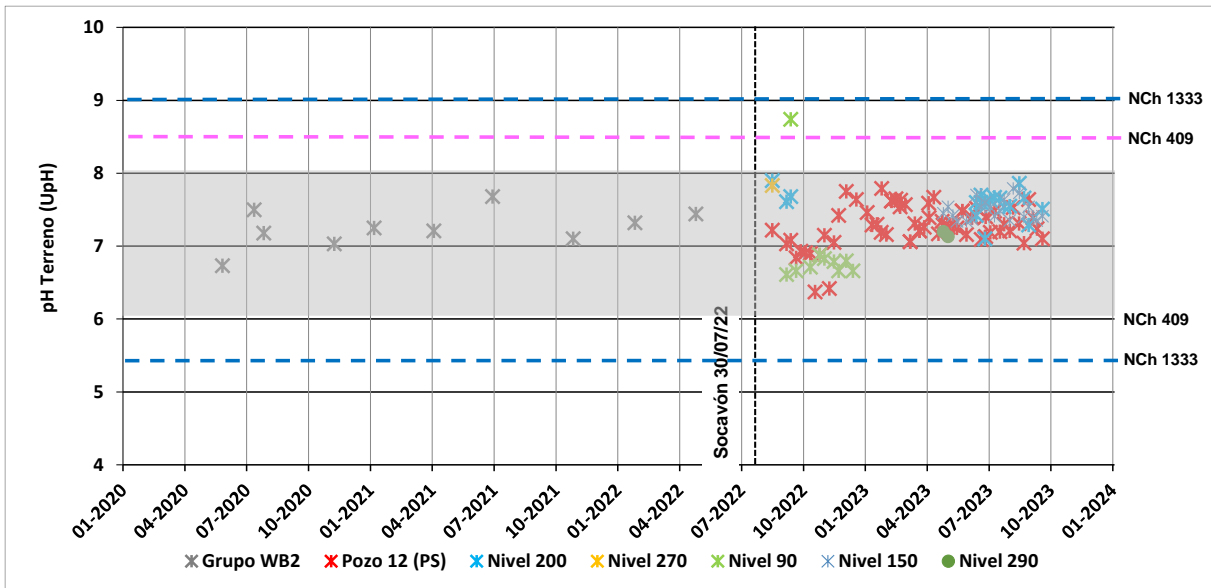
Es importante recordar que estas aguas no interactúan con el acuífero aluvial de Copiapó y permanecen almacenadas en el interior mina.

**Figura 4-9: Concentración de Sulfato Pozo 12 y Sector Interior Mina**



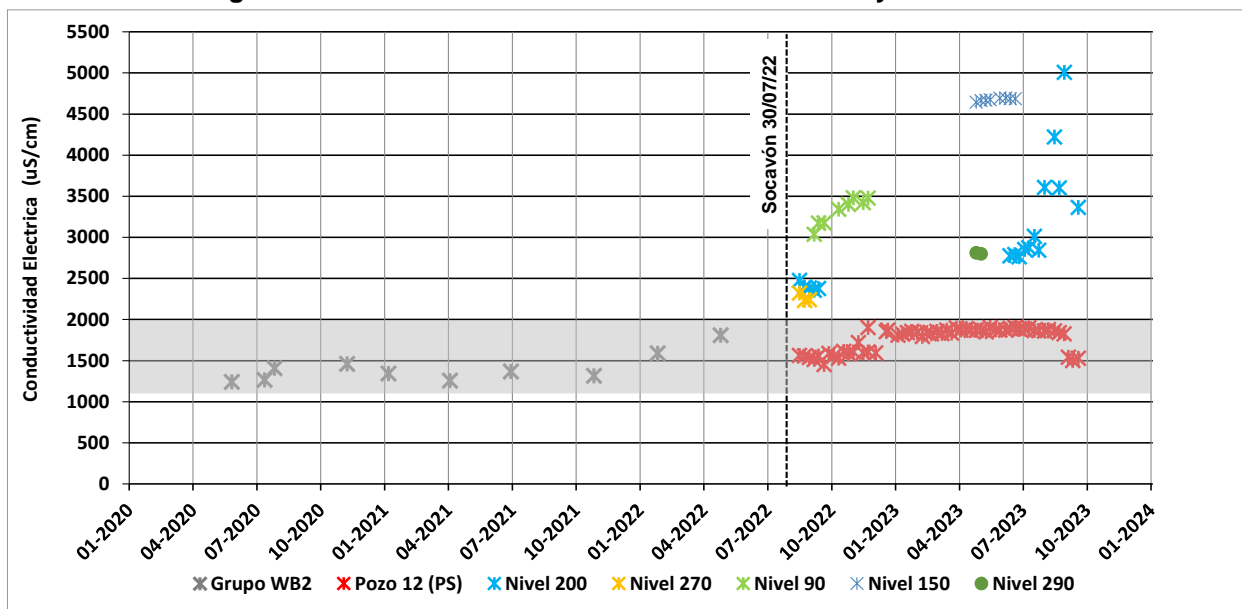
Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-10: Variación de pH en Pozo 12 y Sector Mina**



Fuente: Elaboración propia

Figura 4-11: Variación de CE Laboratorio en Pozo 12 y Sector Mina



Fuente: Elaboración propia

#### 4.5 Evolución Futura Calidad del Agua Subterránea en el Sector Acuífero cercano al Socavón

VAIGS (2023) desarrolló un estudio geoquímico en el cual incluyó un análisis sobre potenciales escenarios sobre la posible evolución de la calidad del agua subterránea en las cercanías del socavón.

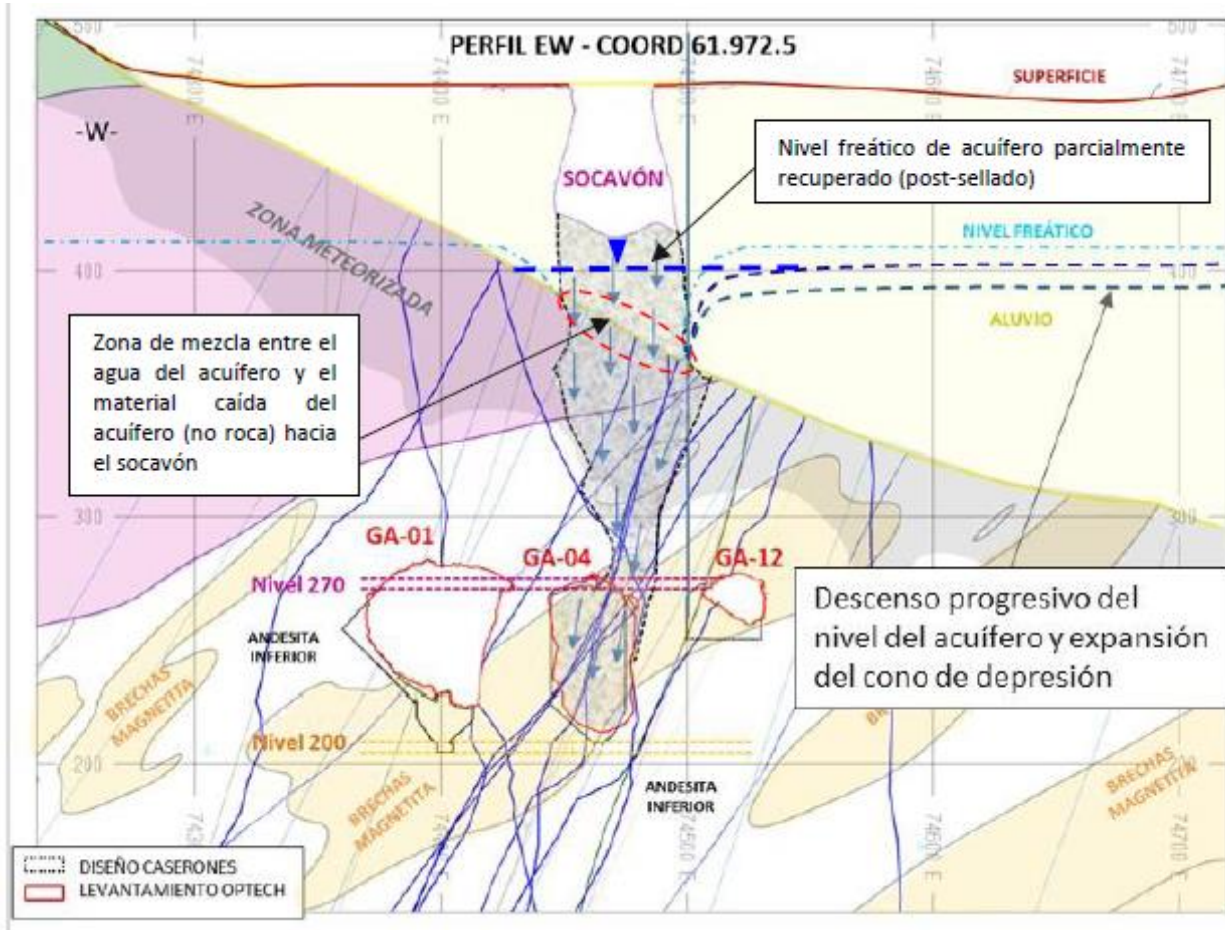
Como parte de su análisis concluye que, en el sector del socavón mismo, en particular en la zona de contacto entre la roca meteorizada y el acuífero (se muestra en la Figura 4-12), puede esperarse que exista una mezcla entre agua en contacto con la roca y el agua del acuífero y, localmente, se podría generar un cambio en la química del agua del acuífero en el entorno del socavón (aumento de conductividad eléctrica, sulfato entre otros).

No obstante lo anterior, y dado el gran flujo de agua subterránea en el acuífero (flujo pasante) y el gradiente vertical descendente reconocido dentro de la columna inundada, es que no se espera un deterioro en la calidad de agua proveniente desde la zona del socavón y aguas abajo de ella. Lo anterior se podrá verificar de manera empírica con un monitoreo de la calidad de agua del acuífero que se logrará a través de la instalación de pozos de monitoreo ubicados aguas abajo del socavón.

Con respecto a una potencial alteración en la calidad de agua, VAIGS (2023) desarrolló un modelo geoquímico que predice la calidad del agua subterránea futura esperada en el sector del socavón inundado y permite analizar la potencial atenuación natural de estas aguas y, por lo tanto, la no afectación de la calidad del agua en el acuífero. Las bases conceptuales del análisis preparado por VAIGS (2023) es consistente con la información técnica disponible y con el análisis general de la hidrogeología e hidrogeoquímica del área. Las herramientas de análisis utilizadas para este análisis son consistentes con el tipo de análisis requerido y acorde con prácticas establecidas.



**Figura 4-12: Perfil Conceptual Sector Socavón y Mina Alcaparrosa**



Fuente: VAIGS (2023)

Según los resultados de la modelación geoquímica, en líneas generales, la oxidación de pirita gatilla la disolución de calcita en forma conjunta con la precipitación de yeso, los que aumentan las concentraciones de sulfato a valores no mayores a 1.713 mg/l en el sector de los caserones Gaby, manteniendo el pH neutro. Las soluciones que saldrían del caserón, con concentraciones de sulfato relativamente más altas que las normales (control de yeso) podrían alcanzar potencialmente el acuífero, mezclándose con aguas con menores concentraciones de sulfato (e.g. 729 mg/l), por lo que se espera que a través de mezcla las concentraciones alcancen cerca de los 800 mg/l, siempre a pH neutro. Todo lo anterior da cuenta que en el caso más desfavorable en el que se produzca una salida de aguas desde el sector de los caserones hacia el acuífero, esto sería en montos muy menores, de tal manera que no cambiaría la condición natural del sistema.

Si bien existe una zona de potencial interacción entre el agua subterránea en la parte inundada del hundimiento y el material de colapso, aunque en todo momento ha existido un gradiente hidráulico descendente entre el acuífero y la roca meteorizada que se ha mantenido constante, no existe un flujo desde la mina hacia el acuífero.

Adicionalmente, en el caso hipotético que exista una salida de estas aguas contactadas (algo muy poco probable debido a las condiciones de gradiente hidráulico local del sistema hidrogeológico desde el acuífero hacia el sistema de roca) las aguas subterráneas que fluyen el acuífero tienen capacidad de diluir las

soluciones en caso de que estas lo alcancen cuando migran (potencial condición futura), manteniendo las concentraciones históricas en términos de concentración de sulfato, Conductividad Eléctrica y pH para estas aguas.

#### **4.6 Conclusiones Preliminares Sobre la Calidad el Agua Subterránea en el Sector Alcaparrosa**

En resumen, se puede indicar que las aguas subterráneas que se drenaron desde el acuífero hacia el sector mina, y que en la actualidad se encuentran encapsuladas en los niveles inferiores de la mina subterránea, modificaron su calidad (aumentaron la concentración de sulfato y la Conductividad Eléctrica), y tal como indicó la Minuta N°23 DCPRH de la Dirección General de Aguas (29 de agosto 2022)<sup>4</sup> en sus conclusiones, es un aspecto que se debe tener presente *“cuando se analicen alternativas para disponer del agua que se está infiltrando hacia la faena, sobre todo si se considera derivar hacia algún otro curso de agua. En este último caso debe considerarse la calidad del cuerpo de agua receptor y los ecosistemas dependientes de aquellos cuerpos de agua de tal forma de evitar un impacto negativo sobre ellos”*.

Sin embargo, estas aguas que se encuentran encapsuladas en el fondo de mina no están, y tampoco lo estarán en el futuro, en contacto directo con el acuífero, asegurando que la calidad histórica del agua subterránea en el acuífero se mantendrá sin alteración. En el caso hipotético futuro que se proponga utilizar estas aguas para su reposición en el acuífero estas deberán ser tratadas para alcanzar una calidad compatible con el punto de recarga, tal como lo indica la DGA.

En conclusión, hasta la fecha indicada en este documento, la calidad del agua subterránea en el acuífero de Copiapó, no se ha visto alterada producto del socavón ocurrido el 30 de julio del 2022, manteniéndose en rangos habituales desde 1995.

Análisis geoquímicos predictivos, los que asumen casos extremos sobre la evolución potencial de la calidad del agua subterránea en el sector, indican que a futuro tampoco existen posibilidades de afectación de la calidad del agua subterránea en el entorno del socavón, lo que será verificado de manera directa a través de una red de monitoreo que se instalará en el sector y que se describe en una sección posterior de este informe.

---

<sup>4</sup> Minuta DCPRH/DGA N°23 (29/08/2022) “Interpretación de datos de calidad de agua subterránea de la emergencia ocurrida por una subsidencia en sector Alcaparrosa, Tierra Amarilla, Atacama”

## 5 EFECTOS SOBRE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DEL ACUÍFERO

### 5.1 Contexto General

De acuerdo con lo indicado por el Primer Tribunal Ambiental (2021)<sup>5</sup>, en el marco de la demanda por Daño Ambiental “Consejo de Defensa del Estado con Compañía Contractual Minera Candelaria”, se entienden como servicios ecosistémicos *“la contribución directa e indirecta de los ecosistemas al bienestar humano”*, que deriva de la propuesta de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA, 2005). Por tanto, son aquellos servicios y beneficios que derivan del ecosistema e importan al ser humano, y tienen valor para quienes viven o no en él (Kelble et al., 2013).

De esta forma, los servicios ecosistémicos se clasifican en cuatro grupos: soporte, provisión, regulación y culturales. Para efecto de cuencas chilenas y en el caso de la situación abordada por el Primer Tribunal Ambiental, se separaron los servicios ecosistémicos en cuatro componentes:

- Servicios de aprovisionamiento: productos o bienes tangibles que se obtienen de cuencas hidrológicas del norte de Chile, y que en su mayoría presentan un mercado estructurado, como son: minerales valiosos, alimentos, aguas dulces, fibras animales y vegetales, recursos vegetales y genéticos, recursos para el pastoreo, entre otros.
- Servicios de regulación: servicios relacionados con los procesos ecosistémicos y con su aporte a la regulación del sistema natural, tales como: la regulación micro climática, el control de crecidas, la purificación del agua, la polinización, el control de plagas/enfermedades, el control biológico, la protección contra riesgos naturales, regulación de la erosión, entre otros.
- Servicios de soporte: servicios necesarios para el funcionamiento del ecosistema y la adecuada producción de servicios ecosistémicos. Su efecto sobre el bienestar de las personas y la sociedad se manifiesta en el largo plazo a través del impacto en la provisión de otros bienes y servicios ecosistémicos, como la producción primaria, provisión de hábitats de especies endémicas y migratorias, el ciclo de nutrientes, el ciclo del agua, entre otros.
- Servicios culturales: servicios no materiales que el ser humano obtiene de los ecosistemas y que están muy ligados a los valores humanos, su identidad y su comportamiento, como la identidad cultural y cosmovisión indígena, desarrollo espiritual y ritual, inspiración, desarrollo cognitivo y salud mental, recreación y turismo, valores estéticos, educación e innovación, sistemas de conocimiento ancestral, entre otros.

En el caso particular de un acuífero los servicios de aprovisionamiento se pueden identificar como el agua para distintos usos; de regulación, como regulación de microclimas, almacenamiento de agua, regulación de erosión en zonas de nivel freático somero; los servicios de soporte se pueden identificar como mantenimiento de hábitats, con vegetación y fauna asociada; y los servicios culturales se pueden identificar principalmente asociados a afloramientos de aguas subterráneas.

### 5.2 Servicios Ecosistémicos del Acuífero de Copiapó en el Contexto de los Efectos Derivados del Socavón

En particular, en el contexto de la situación derivada por la ocurrencia del socavón en el sector de Alcaparrosa, se identifican los siguientes componentes ambientales como de interés para este análisis, los cuales serán desarrollados desde la perspectiva de su posible afectación:

---

<sup>5</sup> Informe de Análisis y Evaluación de Indemnidad en Propuesta de Conciliación en Demanda por Daño Ambiental “Consejo de Defensa del Estado con Compañía Contractual Minera Candelaria”, Rol D-4-2019. 2021.

- Pérdida del componente hídrico, que correspondería, a una pérdida en la cantidad física del agua, manifestándose en descensos en los niveles freáticos en el sector de Alcaparrosa, el que pertenece al Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común 4 del acuífero de Copiapó (o SHAC 4) y por extensión a los sistemas hídricos localizados aguas abajo de éste (SHAC 5 y 6).
- Deterioro en la calidad fisicoquímica del agua que se extrae de los pozos del sector N°4 del acuífero, que correspondería a un aumento en la concentración de sales, sólidos disueltos totales, magnesio y cloruros producto de la disminución de cantidad de agua en el acuífero.
- Grave menoscabo a la disponibilidad presente y futura de agua fresca subterránea del acuífero de la cuenca del río Copiapó, que correspondería a la privación del abastecimiento del recurso hídrico a la población aledaña, forzándola a recurrir a fuentes alternativas.

### **5.3 Efectos Socavón (Subsidencia) sobre los Servicios Ecosistémicos Acuífero Copiapó**

#### **5.3.1 Efecto sobre la Disponibilidad de Agua Subterránea del Acuífero de Copiapó**

Como conclusión principal de los antecedentes expuestos en la Sección 3 de este informe, no se puede desconocer la situación ocurrida el día 30 de julio de 2022, donde debido a la ocurrencia del socavón se generó una conexión hidrogeológica entre el relleno sedimentario del acuífero de Copiapó y el interior de la Mina Alcaparrosa, lo que permitió la entrada de agua desde el acuífero de Copiapó a la Mina Subterránea.

No obstante lo anteriormente señalado, los argumentos técnicos planteados previamente permiten concluir lo siguiente en relación con diversos aspectos de la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero de Copiapó, y en particular en el sector de Alcaparrosa:

- En términos de la disponibilidad de las aguas subterráneas, se puede indicar que el acuífero en el sector de Alcaparrosa presenta en la actualidad condiciones medias históricas de aproximadamente 70 metros de profundidad del nivel de agua subterránea. La influencia del socavón en los niveles de agua subterránea no ha cambiado dicha condición media, por lo tanto, dado que los pozos de terceros no fueron afectados por el efecto inicial del descenso de niveles debido al socavón, no se espera que presenten problemas en el futuro cercano, debido a la influencia cada vez menor del socavón. Todo lo anterior indica que ellos (los pozos de terceros) seguirán operando como si el socavón nunca hubiese ocurrido, pero tendrán que adaptarse a las condiciones de descenso generales del acuífero de Copiapó debido a que el uso continuo y permanente de agua subterránea supera la recarga del sistema.
- El acuífero en el sector de Alcaparrosa, desde febrero de 2020, ya evidenciaba una condición de descensos sostenidos (descensos de 2 cm/día) y, tal como se ha comentado en este documento, la información de niveles en los pozos de monitoreo muestra que debido a las medidas implementadas, tales como la construcción de los sellos de hormigón, así como el llenado del sector Gaby, se generó una recuperación del sistema, tal que, desde mediados de diciembre, se logran recuperar las tasas de descenso previas.
- Una vez ocurrido el socavón el 30 de julio de 2022, los niveles comenzaron a descender a una mayor tasa y, tal como se indica, esta superó los 20 cm/día en los tiempos iniciales post-socavón. Ahora bien, el día 16 de septiembre del 2022 se dio inicio al encapsulamiento del sector Gaby debido al funcionamiento de los sellos de hormigón, cuyo efecto se aprecia en el acuífero el día 19 de octubre de 2022, revirtiendo la tendencia al descenso sostenido producto del socavón, observado principalmente en los Pozo HA-01, Pozo HA-02 y Pozo 12, los más cercanos al socavón.



- Posterior a esa situación, los pozos del entorno comienzan a retomar la tasa de descenso original de 2 cm/día, dando cuenta de la efectividad de los sellos en la recuperación de la tendencia de descenso observada en la condición pre-socavón.
- La dinámica del flujo regional no fue modificada por los descensos producidos por el socavón.

Por lo tanto, al recuperar la tendencia original de los niveles de agua subterráneas en el acuífero de Copiapó, se puede concluir que la conexión hidrogeológica que se generó producto del socavón fue controlada, y su efectividad se basa en que los muros de hormigón generaron la contención de la entrada de agua a la mina subterránea.

De esta manera, se puede indicar que la situación derivada del socavón sobre la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero de Copiapó significó una merma, al 18 de octubre de 2023, del orden de 3.273.484 m<sup>3</sup> de agua subterránea que fue drenada hacia el interior del área mina. De ese total, un monto de 1.848.769 m<sup>3</sup> se encuentra acumulada en el sector interior de la Mina Alcaparrosa, la cual fue dirigida a ese sector luego de ser movilizada desde el sistema acuífero de Copiapó a través de la conexión hidrogeológica, que fue efectivamente contenida a través de los muros o sellos de hormigón establecidos en sectores claves de la mina Alcaparrosa y mediante posteriores sellados de conexiones menores que fueron identificadas en el proceso de control de las infiltraciones en el área.

De esta manera, con base a los antecedentes disponibles, y presentados en este documento, se puede concluir que los efectos del socavón en términos de cantidad se encuentran contenidos en un área específica del Sector 4, no habiéndose extendido hacia los Sectores 5 y 6, ubicados aguas abajo, o hacia los Sectores 1, 2 y 3 ubicados aguas arriba del socavón.

### 5.3.2 Efecto sobre la Calidad el Agua Subterránea en el Sector Alcaparrosa

Tal como se indicó en el apartado 4.6, se puede indicar que las aguas subterráneas que se drenaron desde el acuífero hacia el sector mina, y que en la actualidad se encuentran encapsuladas en los niveles inferiores de la mina subterránea, modificaron su calidad (aumentaron la concentración de sulfato y la Conductividad Eléctrica), y tal como indicó la Minuta N°23 DCPRH de la Dirección General de Aguas (29 de agosto 2022)<sup>6</sup> en sus conclusiones, es un aspecto que se debe tener presente *“cuando se analicen alternativas para disponer del agua que se está infiltrando hacia la faena, sobre todo si se considera derivar hacia algún otro curso de agua. En este último caso debe considerarse la calidad del cuerpo de agua receptor y los ecosistemas dependientes de aquellos cuerpos de agua de tal forma de evitar un impacto negativo sobre ellos”*.

Sin embargo, estas aguas encapsuladas en el fondo mina no serán utilizadas por CCMO y no están, y tampoco lo estarán en el futuro, en contacto directo con el acuífero, asegurando su calidad histórica; y en caso de ser repuestas serán tratadas tal como lo indica la DGA.

En conclusión, hasta la fecha indicada en este documento la calidad del agua subterránea en el acuífero de Copiapó, no se ha visto alterada producto del socavón ocurrido el 30 de julio del 2022, manteniéndose en rangos habituales desde 1995.

Análisis geoquímicos predictivos, los que asumen casos extremos sobre la evolución futura del sector, indican que no existen posibilidades de afectación de la calidad del agua subterránea en el entorno del socavón, lo

---

<sup>6</sup> Minuta DCPRH/DGA N°23 (29/08/2022) “Interpretación de datos de calidad de agua subterránea de la emergencia ocurrida por una subsidencia en sector Alcaparrosa, Tierra Amarilla, Atacama”

que será verificado de manera directa a través de una red de monitoreo que se instalará en el sector y que se describe en una sección posterior de este informe.

### 5.3.3 Efecto sobre los Pozos de Terceros y para Consumo de Agua Potable

Respecto de los usos de agua potable en el SHAC 4, y tal como se establece en la Sección 3 de este informe, estos se localizan en el sector de Paipote, aguas abajo de la posición del socavón.

En la Sección 3 se presenta un análisis de pozos de terceros identificados en las cercanías del socavón. De la Tabla 3-2 se observa que, el efecto máximo adicional de descenso provocado por el socavón se da en los pozos ubicados a menos de 2 km de distancia, variando dicho efecto entre 3,5 y 5,2 m respecto de la condición proyectada sin socavón. Para los pozos ubicados a más de 2 km, el efecto adicional de disminución de niveles no supera los 1,4 m. En todos los casos se verifica que el caudal de extracción de terceros impuesto en el modelo numérico no se ve disminuido ante la variación de niveles producto del efecto del socavón, por lo que se descarta una afectación a la capacidad de extracción de los pozos de terceros, lo cual resulta lógico considerando que los descensos adicionales no llevan al acuífero a la condición de sequía extrema observada entre 2013 y 2017.

De esta forma, se descartan los efectos asociados a la ocurrencia del socavón sobre pozos de terceros y de agua potable, localizados en las cercanías del sector del socavón.

Adicionalmente, y dado que luego de la construcción de los sellos o muros de hormigón se controla el efecto de la conexión hidrogeológica entre el acuífero de Copiapó y el sector interior mina, los efectos iniciales del socavón comienzan de manera progresiva a recuperarse.

## 6 PLAN DE MONITOREO Y SEGUIMIENTO SECTOR ALCAPARROSA

### 6.1 Contexto General

En este capítulo se presentan los aspectos más relevantes del Plan de Monitoreo y Seguimiento del Sector Alcaparrosa<sup>7</sup>, lo que incluye la definición de los puntos de monitoreo (existentes y por construir), así como las variables y su frecuencia de monitoreo. También se incluye la información sobre informes de seguimiento y la reportabilidad del Plan. El Plan considera tres programas de monitoreo, los que se denominan:

- Programa de Monitoreo Mensual Alcaparrosa (PMMA).
- Programa de Monitoreo Isotópico Trimestral Alcaparrosa (PMITA).
- Programa de Monitoreo con Perfilaje Vertical Trimestral Alcaparrosa (PMPVT).

### 6.2 Puntos de Monitoreo

Para el desarrollo del Plan de Monitoreo y Seguimiento se ha considerado mantener sólo algunos de los pozos existentes que fueron incorporados en los distintos requerimientos que han realizado la DGA y la SMA. Los pozos seleccionados, en función de su importancia y cercanía al Socavón, se listan en la Tabla 6-1.

**Tabla 6-1: Pozos de Monitoreo Existentes**

Pozo	Ubicación Relativa	UTM - Norte (m)	UTM - Este (m)
Pozo 5	Aguas Arriba Socavón	6.960.583	374.552
Pozo 2A	Aguas Arriba Socavón	6.960.851	374.496
Pozo 8	Aguas Arriba Socavón	6.961.084	374.564
Pozo 12	Aguas Arriba Socavón	6.961.292	374.529
Pozo HA-02	Aguas Abajo Socavón	6.961.891	374.392
Pozo 15	Aguas Abajo Socavón	6.967.368	372.646

Fuente: Elaboración propia

Para todos los puntos de monitoreo incluidos en la Tabla 6-1 se compromete su acondicionamiento para permitir una adecuada toma de muestras de calidad del agua y la medición de niveles. Una vez realizada el acondicionamiento de los pozos y los procesos de validación de estos, se presentará un informe ejecutivo a la DGA, con objeto que este servicio se pronuncie sobre si los pozos se encuentran aptos para realizar los monitoreos.

También, se considera la construcción y desarrollo de pozos de monitoreo adicionales, cuyo objetivo es complementar y reforzar sectores de importancia. En la Tabla 6-2 se indican las alternativas de ubicación de los pozos adicionales de monitoreo propuestos, así como sus características más relevantes (ubicación y profundidad propuesta). Adicionalmente, y por requerimiento de la DGA para efectos de comparación, se consideran puntos de monitoreo en cinco diferentes sectores del interior mina, los cuales corresponden a:

- Nivel 270 m s.n.m.
- Nivel 150 m s.n.m.
- Joselyn Nivel 190 m s.n.m.
- Joselyn Nivel 170 m s.n.m.
- Viviana Nivel 170 m s.n.m.

<sup>7</sup> Plan de Monitoreo aprobado por la DGA Región de Atacama mediante el ORD N° 340 del 12 de septiembre de 2023.

**Tabla 6-2: Pozos de Monitoreo Propuestos**

Pozo	Ubicación Relativa	Profundidad (m)	UTM – Norte* (m)	UTM – Este* (m)
Pozo HA-03	Aguas Abajo Socavón	150	6.961.709	374.314
Pozo HA-04	Aguas Abajo Socavón	200	6.961.844	374.391
Pozo HA-05**	Aguas Abajo Socavón	200	6.962.750	374.766

(\*) Coordenadas provisionales (\*\*) Punto central de la zona en que se ubicaría el pozo HA-05  
Fuente: Elaboración propia

Por su parte, en la Tabla 6-3, se presenta un resumen de todos los puntos de monitoreo considerados en el Plan. También, se indican las variables de monitoreo consideradas para cada uno de ellos. Además, en la Figura 6-1 se presentan los pozos de monitoreo existentes y las ubicaciones propuestas para los futuros pozos de monitoreo.

**Tabla 6-3: Resumen Puntos de Monitoreo Plan de Monitoreo y Seguimiento Alcaparrosa**

Punto de Monitoreo	Ubicación Relativa	Niveles Agua Subterránea	Calidad de Aguas Subterránea	Isotopía	Perfilaje Vertical
Pozo 5	Aguas Arriba Socavón	Sí	Sí	Sí	No
Pozo 2A	Aguas Arriba Socavón	Sí	Sí	Sí	No
Pozo 8	Aguas Arriba Socavón	Sí	Sí	Sí	Sí
Pozo 12	Aguas Arriba Socavón	Sí	Sí	Sí	Sí
Pozo HA-02*	Aguas Abajo Socavón	Sí	No	No	No
Pozo 15	Aguas Abajo Socavón	Sí	Sí	Sí	Sí
Pozo HA-03**	Aguas Abajo Socavón	Sí	Sí	Sí	Sí
Pozo HA-04**	Aguas Abajo Socavón	Sí	Sí	Sí	Sí
Pozo HA-05**	Aguas Abajo Socavón	Sí	Sí	Sí	Sí
Nivel 150	Interior Mina Alcaparrosa	No	Sí	Sí	No
Nivel 270	Interior Mina Alcaparrosa	No	Sí	Sí	No
Joselyn Nivel 190	Interior Mina Alcaparrosa	No	Sí	Sí	No
Joselyn Nivel 170	Interior Mina Alcaparrosa	No	Sí	Sí	No
Viviana Nivel 170	Interior Mina Alcaparrosa	No	Sí	Sí	No

\*Pozo mide presión de poros con sensor instalado, no apto para monitoreo de niveles y calidad de aguas. \*\*Pozos propuestos que se incorporará al monitoreo una vez construidos y habilitados.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 6-1: Ubicación Pozos de Monitoreo Existentes y Propuestos**



Fuente: Elaboración propia

## 6.3 Programas de Monitoreo

### 6.3.1 Programa de Monitoreo Mensual Alcaparrosa (PMMA)

El PMMA considera la realización de un monitoreo de niveles y calidad de agua subterránea en todos los puntos de monitoreo considerados para el Plan (Tabla 6-3). En el caso de los puntos ubicados en el interior mina, solo se considerará calidad de agua subterránea.

Respecto de la frecuencia de monitoreo, se ha definido una frecuencia de monitoreo semanal por un período inicial de 6 meses para luego pasar a una frecuencia de monitoreo mensual.

En cuanto a las variables de monitoreo del programa, éstas corresponden a niveles de agua subterránea en pozos y calidad de aguas subterráneas en todos los puntos de monitoreo (excepto en el pozo HA-02 con sensor de cuerda vibrante, sin habilitación para medición de niveles ni toma de muestra).

Para el análisis de las muestras de calidad de agua subterránea se han considerado los parámetros que se presentan en la Tabla 6-4, los cuales corresponden a los parámetros suficientes y representativos para caracterizar las aguas subterráneas del Sector Alcaparrosa, basado en los parámetros analizados en la Tabla 2 de la Minuta DCPRH/DGA N°23 del 29 de agosto de 2022<sup>8</sup>.

Se considera también la instalación de sensores automáticos para medición del pH, Temperatura, Niveles de Agua Subterránea y Conductividad Eléctrica en tres puntos de monitoreo. Estos puntos se ubicarán aguas arriba del socavón (Pozo 8), en el entorno del mismo (Pozo 12) y aguas abajo de este (Pozo HA-05).

Respecto del control y aseguramiento de la calidad (QA/QC) de la información de calidad de aguas que se levante, se debe indicar que el muestreo se realizará siguiendo el protocolo establecido en la Norma INN NCh 411/11: 2022 “Calidad del agua – Muestreo - Parte 11: Guía para el muestreo de aguas subterráneas” (30 de marzo de 2022). Además, se desarrollará un procedimiento de QA/QC de los resultados de los análisis hidroquímicos considerando, al menos, los siguientes criterios (ver detalle en Anexo A):

- Balance Iónico
- Relación Sólidos Disueltos Totales vs Conductividad Eléctrica
- Fracción disuelta vs fracción total
- Revisión de valores fuera de tendencia

Finalmente, se propone extender este Programa de Monitoreo por al menos 24 meses, para luego proceder a su evaluación técnica. Sin embargo, se considera una evaluación preliminar previa, a los 12 meses, coincidente con la presentación a la DGA de la propuesta de “Plan de Seguimiento de Largo Plazo y Planes de Acción Futura”. En caso de mantenerse el Programa de Monitoreo sin modificaciones luego de la evaluación preliminar, cumplidos los 24 meses de duración del Programa se realizará la evaluación formal de éste mediante un análisis que debiera acordar la mantención de este Programa de Monitoreo en un período posterior, una eventual redefinición de puntos de muestreo, el análisis de la frecuencia de muestreo, así como un análisis de los parámetros a levantar.

<sup>8</sup> Minuta DCPRH/DGA N°23 (29/08/2022) “Interpretación de datos de calidad de agua subterránea de la emergencia ocurrida por una subsidencia en sector Alcaparrosa, Tierra Amarilla, Atacama”.



**Tabla 6-4: Parámetros Análisis Calidad de Agua PMMA**

N°	Parámetro	Unidad	Expresión	N°	Parámetro	Unidad	Expresión
1	Aluminio Disuelto	mg/L	Al dis	22	Níquel Total	mg/L	Ni tot
2	Aluminio Total	mg/L	Al tot	23	Nitrato	mg/L	NO3
3	Arsénico Disuelto	mg/L	As dis	24	Oxígeno Disuelto	mg/L	O2 Dis
4	Arsénico Total	mg/L	As tot	25	pH	UpH	pH
5	Bicarbonato	mg/L	HCO3-	26	Plata Disuelto	mg/L	Ag dis
6	Cadmio Disuelto	mg/L	Cd dis	27	Plata Total	mg/L	Ag tot
7	Cadmio Total	mg/L	Cd tot	28	Plomo Disuelto	mg/L	Pb dis
8	Calcio Disuelto	mg/L	Ca dis	29	Plomo Total	mg/L	Pb tot
9	Calcio Total	mg/L	Ca tot	30	Potasio Disuelto	mg/L	K dis
10	Carbonato	mg/L	CO3	31	Potasio Total	mg/L	K tot
11	Cloruros	mg/L	Cl-	32	Selenio Disuelto	mg/L	Se dis
12	Cobre Disuelto	mg/L	Cu dis	33	Selenio Total	mg/L	Se tot
13	Cobre Total	mg/L	Cu tot	34	Silicio Disuelto	mg/L	Si dis
14	Conductividad Eléctrica	uS/cm	C.E.	35	Silicio Total	mg/L	Si tot
15	Cromo Disuelto	mg/L	Cr dis	36	Sodio Disuelto	mg/L	Na dis
16	Cromo Total	mg/L	Cr tot	37	Sodio Total	mg/L	Na tot
17	Magnesio Disuelto	mg/L	Mg dis	38	Sodio Porcentual	mg/L	Na%
18	Magnesio Total	mg/L	Mg tot	39	Sulfatos	mg/L	SO42-
19	Molibdeno Disuelto	mg/L	Mo dis	40	Temperatura	C°	T°
20	Molibdeno Total	mg/L	Mo tot	41	Zinc Disuelto	mg/L	Zn dis
21	Níquel Disuelto	mg/L	Ni dis	42	Zinc Total	mg/L	Zn tot

Fuente: Elaboración propia en base a Tabla 2 de la Minuta DCPRH/DGA N°23 (29/08/2022).

### 6.3.2 Programa de Monitoreo Isotópico Trimestral Alcaparrosa (PMITA)

Se propone la realización de un monitoreo isotópico, con frecuencia trimestral, en todos los puntos de monitoreo considerados en el Plan (Tabla 6-3).

Se propone obtener muestras para análisis isotópico, coincidentes con una fecha de muestreo mensual en cada trimestre, para continuar con la caracterización isotópica de la molécula de agua (Deuterio y Oxígeno 18), así como isótopos del Sulfato disuelto en el agua.

Al igual que el PMMA, se propone extender el PMITA por al menos 24 meses, para luego proceder a su evaluación técnica. Sin embargo, se considera una evaluación preliminar previa, a los 12 meses, coincidente con la presentación a la DGA de la propuesta de “Plan de Seguimiento de Largo Plazo y Planes de Acción Futura”.

En caso de mantenerse el Programa de Monitoreo sin modificaciones luego de la evaluación preliminar, cumplidos los 24 meses de duración del Programa se realizará la evaluación formal de éste mediante un análisis que debiera acordar la mantención de este Programa de Monitoreo en un período posterior, una eventual redefinición de puntos de muestreo, el análisis de la frecuencia de muestreo, así como un análisis de los parámetros a levantar.

### 6.3.3 Programa de Monitoreo con Perfilaje Vertical Trimestral (PMPVT)

Se propone la realización de un perfilaje vertical, con frecuencia trimestral, en todos los pozos considerados en el Plan (Tabla 6-3), con la excepción del pozo HA-02 donde técnicamente no es posible realizar un perfilaje.

Se propone el seguimiento trimestral de calidad del agua in-situ, a través de la medición de parámetros como la Temperatura (T°), pH y la Conductividad Eléctrica (CE) en pozos de monitoreo cercanos al socavón. Esta medición se realiza en la dirección vertical para determinar la variabilidad de estos parámetros en función de la profundidad del agua (perfilaje en vertical).

Al igual que el PMMA y el PMITA, se propone extender el PMPVT por al menos 24 meses, para luego proceder a su evaluación técnica. Sin embargo, se considera una evaluación preliminar previa, a los 12 meses, coincidente con la presentación a la DGA de la propuesta de “Plan de Seguimiento de Largo Plazo y Planes de Acción Futura”. En caso de mantenerse el Programa de Monitoreo sin modificaciones luego de la evaluación preliminar, cumplidos los 24 meses de duración del Programa se realizará la evaluación formal de éste mediante un análisis que debiera acordar la mantención de este Programa de Monitoreo en un período posterior, una eventual redefinición de puntos de muestreo, el análisis de la frecuencia de muestreo, así como un análisis de los parámetros a levantar.

#### **6.4 Reportabilidad del Monitoreo**

Para la reportabilidad de cada uno de los Programas de Monitoreo que considera el Plan se ha definido entregar una serie de Informes Técnicos. Cada Informe Técnico permita dar cuenta de la información generada y su análisis, tanto en el período informado como en el conjunto de datos históricos que se tenga disponibles.

De esta forma, se considera la entrega a la Autoridad de los siguientes Informes Técnicos:

- PMMA: Informe técnico semestral de información de niveles y calidad del agua de nivel semanal/mensual.
- PMITA: Informe técnico semestral que contendrá los datos de isótopos que se levanten durante 6 meses, pero incluyendo en cada informe la información histórica previa.
- PMPVT: Informe técnico trimestral que incluya la información de los perfiles verticales de calidad en los pozos de monitoreo identificados.

En cada Informe Técnico se incluirá adicionalmente información de contexto para verificar, en aquellos casos en los cuales exista información previa, que la calidad del agua subterránea es similar o equivalente a la que había en la época previa a la ocurrencia del socavón. Además, éstos serán ejecutivos, sintéticos y conclusivos, exponiendo de manera clara la información, apuntando a conclusiones certeras y evitando datos redundantes o que no aporten al tópico en cuestión. La información que sustente los informes será incluida en sus anexos. Por otra parte, todos los Informes Técnicos serán presentados a la DGA vía Oficina de Partes Virtual.

Sin perjuicio de lo anterior, la información generada estará disponible en todo momento ante cualquier requerimiento de la DGA.



## 7 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

### 7.1 Comentarios Generales

En este trabajo se ha analizado la dinámica del acuífero de Copiapó, con un énfasis mayor en el Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común 4 (SHAC 4) y en el área de Alcaparrosa, próximo a la posición del socavón producido el 30 de julio de 2022.

Las principales conclusiones que se extraen de este análisis se describen a continuación:

- Como conclusión principal de los antecedentes expuestos en la Sección 3 de este informe se analiza en el contexto de la situación ocurrida el día 30 de julio de 2022, donde debido a la ocurrencia del socavón se generó una conexión hidrogeológica entre el relleno sedimentario del acuífero de Copiapó y el interior de la Mina Alcaparrosa, lo que permitió la entrada de agua desde el acuífero de Copiapó a la Mina Subterránea.
- La información de niveles disponible en la red de pozos de CCMC muestra que, a partir del año 2017, y hasta el año 2020, los niveles de agua subterránea se recuperaron fuertemente, producto de los eventos hidrológicos ocurridos en 2015 y 2017.
- La recuperación observada (2017 a 2020), en cuanto a niveles freáticos, es de aproximadamente 92 metros en la zona de Alcaparrosa, en tanto en la zona de los pozos de Paipote, dicha recuperación es de aproximadamente 34 metros. A partir del año 2020 se comienza a ver un cambio en la tendencia, observándose un descenso en los niveles.
- Por lo tanto, en el área de Alcaparrosa, donde ocurrió el socavón, se muestra una condición altamente dinámica del nivel freático que depende fuertemente de la recarga proveniente de los eventos extremos que ocurren en la cuenca.
- Situaciones prolongadas de sequía influyen en disminuciones importantes del nivel dinámico del acuífero producto de la fuerte extracción de agua subterránea asociada a los derechos de terceros. Por otra parte, los eventos extremos pueden permitir fuertes recuperaciones en el acuífero, tal como se ha observado en la historia de los pozos de Alcaparrosa.
- Luego de ocurrido el socavón, el 30 de julio de 2022, se produce un cambio en la pendiente de descenso de los niveles de agua subterránea en Alcaparrosa, acelerando los descensos observados a esa fecha. Es importante mencionar que los niveles de agua alcanzan una profundidad entre 60 y 70 m, los que se encuentran lejos aún de la condición observada entre 2012 y 2017 donde la profundidad era superior a 130 metros.
- Previo a la ocurrencia del socavón, los caudales aflorados en la mina subterránea de Alcaparrosa mostraban una estrecha correlación con la dinámica de niveles de agua subterránea relacionada con los niveles de agua subterránea en el acuífero, observándose en esas instancias un caudal promedio del orden de los 30 L/s, caudal que fue decreciendo conforme con la disminución observada del nivel freático.
- Posterior al socavón, se midieron caudales de drenaje a través del sector socavón los que se estabilizaron en valores del orden de 300 L/s. Esta estimación del caudal aportado debido a la conexión hidrogeológica entre el acuífero de Copiapó y el sector mina se basa en el uso de sistemas de bombes internos que permiten mover el agua acumulada a niveles inferiores.
- Posterior al socavón, se han observado aumentos en las tasas de descensos en el acuífero, lo que se asocia a la entrada de agua a la mina en el caserón Gaby 4 por aproximadamente 300 L/s desde el 30 de julio de 2022.

- A partir del 30 de julio de 2022, el efecto del socavón sobre la condición hidrogeológica en el área se evidenció de manera directa con un aumento en las tasas de descensos de los niveles de agua subterránea medidos en los pozos de los sectores de Alcaparrosa y Tierra Amarilla. En el caso de los pozos de monitoreo del sector Palermo no se perciben efectos debido a la distancia al socavón, y las tendencias observadas son equivalentes a la condición pre-socavón. En el caso de los pozos del sector de Paipote, los efectos del cono de depresión generado por el drenaje hacia el área de la mina Alcaparrosa se atenúan debido a que por la distancia a la que se encuentran.
- El efecto más directo del socavón sobre los niveles de agua subterránea en el acuífero se puede observar en el registro del pozo de monitoreo HA-02, el que cuenta con un sensor de medición continua ubicado en la roca fracturada que subyace inmediatamente al acuífero aluvial y que entrega registros de presión de la columna de agua subterránea cada 6 horas, lo que permite observar de manera directa el cambio de tendencia que se observa luego del 30 de julio de 2022, con un cambio brusco seguido de una reducción paulatina pero continua del nivel de agua subterránea (aumento de la tasa de descenso original).
- Este efecto se revierte a partir del día 19 de octubre de 2022, fecha desde la cual se produce un cambio de tendencia observándose una estabilización de los niveles e incluso una leve recuperación respecto a lo acontecido a fines de julio de 2022. Lo anterior se puede entender como un indicador de la efectividad del sellado de la conexión acuífero-caserones generado por el socavón, el que debiera llevar al sistema acuífero de manera paulatina a una condición equivalente a la que habría tenido a esta fecha de no haber ocurrido el socavón.
- Este es un proceso gradual que se podrá observar en los diferentes pozos de monitoreo, siendo más rápido en los pozos más cercanos (Pozo HA-01, Pozo HA-02 y Pozo 12), y menos rápidos en los pozos de monitoreo más lejanos con respecto al socavón.
- En relación a la calidad de aguas, se ha analizado preliminarmente los parámetros Sulfato, Conductividad Eléctrica y pH. Todos estos parámetros presentan una variabilidad histórica en el acuífero, con variaciones que se asociarían a la cantidad de agua almacenada en el acuífero.
- La calidad de las aguas medida en el acuífero posterior al socavón (datos tomados en terreno entre el agosto de 2022 y septiembre de 2023), permite verificar que las concentraciones se mantienen en los rangos históricos observados, descartando un menoscabo de la calidad de aguas subterráneas.
- De manera general, y en conclusión, la calidad del agua subterránea en el acuífero de Copiapó, no se ha visto alterada producto del socavón ocurrido el 30 de julio del 2022, manteniéndose en rangos habituales desde 1995.

De esta manera, con base a los antecedentes disponibles, y presentados en este documento, se puede concluir que los efectos del socavón se encuentran contenidos en un área específica del Sector 4, no habiéndose extendido hacia los Sectores 5 y 6, ubicados aguas abajo, o hacia los Sectores 1, 2 y 3 ubicados aguas arriba del socavón.

## 7.2 Conclusiones sobre Temas de Cantidad de las Aguas Subterráneas

Como conclusión principal, ya tal como se ha señalado de manera previa, no se puede desconocer la situación ocurrida el día 30 de julio de 2022, donde debido a la ocurrencia del socavón se generó una entrada de agua desde el acuífero de Copiapó a la Mina Subterránea.

Sin embargo, los argumentos planteados previamente permiten concluir lo siguiente:

- La estructura geológica fue modificada por efectos del socavón, localmente ya que éste generó un efecto sumidero equivalente a un pozo de gran diámetro. Sin embargo, el cambio de estructura geológica que menciona es aproximadamente un 0,005% en el acuífero, es decir, esta situación corresponde a una particularidad una vez que se hicieron efectivos los sellos de hormigón el 16 de septiembre de 2022, logrando la recuperación de las tasas de descenso de la condición pre-socavón.
- En términos de la disponibilidad de las aguas subterráneas, se puede indicar que el acuífero en el sector de Alcaparrosa presenta en la actualidad condiciones medias históricas de aproximadamente 70 metros de profundidad del nivel de agua subterránea. La influencia del socavón en los niveles de agua subterránea no ha cambiado dicha condición media, por lo tanto, dado que los pozos de terceros no fueron afectados por el efecto inicial del descenso de niveles debido al socavón, no se espera que presenten problemas en el futuro cercano, debido a la influencia cada vez menor del socavón. Todo lo anterior indica que ellos (los pozos de tercero) seguirán operando sin mayores problemas hacia el futuro.
- El acuífero en el sector de Alcaparrosa, desde febrero de 2020, ya venía con una condición de descensos sostenidos (descensos del orden de 1 a 2 cm/día), y tal como se ha comentado en este documento, la información de niveles en los pozos de monitoreo muestra que debido a las medidas implementadas, tales como la construcción de los sellos de hormigón, así como el llenado del sector Gaby, generó una recuperación del sistema, tal que desde mediados de diciembre se logran recuperar las tasas de descenso previas.
- La dinámica del flujo regional no fue modificada por los descensos producidos por el socavón.
- Una vez ocurrido el socavón el 30 de julio de 2022, los niveles comenzaron a descender a una mayor tasa y tal como se indica, esta superó los 20 cm/d en los tiempos iniciales post-socavón. Ahora bien, el día 16 de septiembre del 2022 se dio inicio al encapsulamiento del sector Gaby debido al funcionamiento de los sellos de hormigón, cuyo efecto se aprecia en el acuífero el día 19 de octubre de 2022, revirtiendo la tendencia al descenso sostenido producto del socavón, observado principalmente en los Pozo HA-01, Pozo HA-02 y Pozo 12, los más cercanos al socavón.
- Posterior a esa situación, los pozos del entorno comienzan a retomar la tasa de descenso original de 2 cm/d, dando cuenta de la efectividad de los sellos en la recuperación de la tendencia de descenso observada en la condición pre-socavón.
- En los últimos meses, y más allá de situaciones específicas que se observan en las figuras que se acompañan, la tasa de descenso en el Pozo HA-02 se ha mantenido del orden de 1,6 cm/d (enero a septiembre de 2023).

Por lo tanto, al recuperar la tendencia original de los niveles de agua subterráneas en el acuífero de Copiapó, se puede concluir que la conexión hidrogeológica que se generó producto del socavón fue controlada, y su efectividad se basa en que los muros de hormigón generaron la contención de la entrada de agua a la mina subterránea.

### 7.3 Conclusiones sobre Temas de Calidad de las Aguas Subterráneas

En relación a la calidad de aguas, se ha analizado preliminarmente los parámetros Sulfato, Conductividad Eléctrica y pH. Todos estos parámetros presentan una variabilidad histórica en el acuífero, con variaciones que se asociarían a la cantidad de agua almacenada en el acuífero (niveles de agua subterránea más profundos en el pasado) y no con el efecto específico del socavón.

La calidad de las aguas medida en el acuífero posterior al socavón (datos tomados en terreno entre el agosto de 2022 y septiembre de 2023), permite verificar que las concentraciones se mantienen en los rangos históricos observados, descartando un menoscabo de la calidad de aguas subterráneas.

Se observa que producto de la interacción del agua de drenaje a través del socavón con la roca, en las muestras de interior Mina (Nivel 90, 200 y 270) existe un cambio en la calidad de aguas en algunos parámetros, aumentando desde el simple al doble o triple de su concentración. Estas aguas no interactúan con el acuífero aluvial de Copiapó y permanecen acumuladas en el interior mina.

Toda la información anterior se ha resumido en particular para los parámetros Sulfato, pH, y Conductividad Eléctrica, y a modo de referencia se ha puesto los límites establecidos en las normas NCh 1333 y NCh 409. En este caso se aprecia que algunos parámetros, como por ejemplo el Sulfato, superan algunos de estos límites desde la condición pre-socavón. Lo anterior ocurre en particular para el Pozo 12 y su entorno (Grupo de Pozos WB-02) y corresponde a la situación natural o base en el sistema acuífero.

Debido a que el fenómeno del socavón generó ingresos de aguas del acuífero hacia la mina subterránea, y que no retornan nuevamente al sistema acuífero, se puede indicar que estas aguas, que en la actualidad se encuentran encapsuladas en los niveles inferiores de la mina subterránea, modificaron su calidad y tal como indicó la Minuta N°23 DCPRH de la Dirección General de Aguas (29 de agosto 2022) en sus conclusiones, es un aspecto que se debe tener presente *“cuando se analicen alternativas para disponer del agua que se está infiltrando hacia la faena, sobre todo si se considera derivar hacia algún otro curso de agua. En este último caso debe considerarse la calidad del cuerpo de agua receptor y los ecosistemas dependientes de aquellos cuerpos de agua de tal forma de evitar un impacto negativo sobre ellos”*.

Sin embargo, estas aguas que se encuentran encapsuladas en el fondo de mina no están, y tampoco lo estarán en el futuro, en contacto directo con el acuífero, asegurando que la calidad histórica del agua subterránea en el acuífero se mantendrá sin alteración. En el caso hipotético futuro que se proponga utilizar estas aguas para su reposición en el acuífero estas deberán ser tratadas para alcanzar una calidad compatible con el punto de recarga, tal como lo indica la DGA.

En conclusión, hasta la fecha indicada en este documento, la calidad del agua subterránea en el acuífero de Copiapó, no se ha visto alterada producto del socavón ocurrido el 30 de julio del 2022, manteniéndose en rangos habituales desde 1995.

Análisis geoquímicos predictivos, los que asumen casos extremos sobre la evolución potencial de la calidad del agua subterránea en el sector, indican que a futuro tampoco existen posibilidades de afectación de la calidad del agua subterránea en el entorno del socavón, lo que será verificado de manera directa a través de una red de monitoreo que se instalará en el sector y que se describe en una sección posterior de este informe.



## 7.4 Conclusiones sobre los Servicios Ecosistémicos del Acuífero

En particular, en el contexto de la situación derivada por la ocurrencia del socavón en el sector de Alcaparrosa, se identificaron los siguientes componentes ambientales como de interés para este análisis, los cuales se analizaron en este informe:

- Pérdida del componente hídrico, que correspondería, a una pérdida en la cantidad física del agua, manifestándose en descensos en los niveles freáticos en el sector de Alcaparrosa, el que pertenece al Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común 4 del acuífero de Copiapó (o SHAC 4) y por extensión a los sistemas hídricos localizados aguas abajo de éste (SHAC 5 y 6).
- Deterioro en la calidad fisicoquímica del agua que se extrae de los pozos del sector N°4 del acuífero, que correspondería a un aumento en la concentración de sales, sólidos disueltos totales, magnesio y cloruros producto de la disminución de cantidad de agua en el acuífero.
- Grave menoscabo a la disponibilidad presente y futura de agua fresca subterránea del acuífero de la cuenca del río Copiapó, que correspondería a la privación del abastecimiento del recurso hídrico a la población aledaña, forzándola a recurrir a fuentes alternativas.

Los tres aspectos anteriores han sido analizados en detalle en el proceso de entendimiento de la situación derivada de la ocurrencia del socavón, y se han descartado efectos sobre estas componentes, lo que se describe en detalle en las Secciones 3 y 4 de este documento. De manera complementaria, y para disponer de una verificación futura de esta no afección, se propone un Programa de Monitoreo detallado que se describe en la Sección 6 de este informe.

De esta manera, con base a los antecedentes disponibles, y presentados en este documento, se puede concluir que los efectos del socavón se encuentran contenidos en un área específica del Sector 4, no habiéndose extendido hacia los Sectores 5 y 6, ubicados aguas abajo, o hacia los Sectores 1, 2 y 3 ubicados aguas arriba del socavón.

## 8 REFERENCIAS

### 8.1 Referencias Públicas Generales

- Álamos y Peralta. 1987. Análisis y Evaluación de los Recursos Hidrogeológicos del Valle del Río Copiapó.
- Álamos y Peralta. 1995. Análisis y Evaluación de los Recursos Hidrogeológicos en el Valle del Río Copiapó, II Región.
- Aguas Chañar. 2009. Situación de los pozos de Aguas Chañar en Copiapó y alternativas de abastecimiento de agua para Copiapó, Caldera y Chañaral,
- Aguas Chañar. 2011. Estudio hidrogeológico para precisar el límite entre el tercer y cuarto sector del acuífero de la cuenca del río Copiapó
- CANDELARIA – HIDROMAS. 2019. “Actualización del Modelo Hidrogeológico del Acuífero de Copiapó, Entre los Sectores 3 y 6”.
- Comisión Nacional de Riego. 2012. Mejoramiento del Sistema de Aguas Subterráneas para su Utilización en Riego en la Cuenca del Río Copiapó.
- Dirección General de Aguas. 1993. Resolución DGA N°193. Declaración de zona de prohibición toda la cuenca para nuevas explotaciones de aguas subterráneas
- Dirección General de Aguas. 1997. Minuta Técnica DGA N°61. Cuantificación de la Disponibilidad de Agua Subterránea Por Sectores en el Acuífero del Río del Valle de Copiapó.
- Dirección General de Aguas. 2001. Resolución DGA N°162. Alza la zona de prohibición y se declara área de restricción para nuevas extracciones de aguas subterráneas en los sectores acuíferos 5 y 6.
- Dirección General de Agua. 2003. “Evaluación de los recursos hídricos subterráneos del valle del río Copiapó”. Informe Técnico. S.I.T. N° 87.
- Dirección General de Agua - Cade-Idepe. 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del río Copiapó.
- Dirección General de Aguas. 2007. Informe Técnico N° 122. Área de Restricción y Zona de Prohibición Acuífero del Valle del Río Copiapó.
- Dirección General de Aguas – AC Consultores. 2007. “Estimaciones de Demandas de Agua en Chile y Proyecciones Futuras” (SIT 122)
- Dirección General de Aguas – DICTUC. 2010. Análisis Integrado de Gestión en la cuenca del río Copiapó.
- Dirección General de Aguas – H2 Cuenca. 2012. Análisis crítico de la red de niveles de aguas subterráneas del acuífero de Copiapó.
- Dirección General de Aguas. 2012. Derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas otorgados en la cuenca del río Copiapó (SDT 327).
- Dirección General de Aguas. 2012. Minuta Técnica DARD N°3. Delimitación Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común, Áreas de Restricción y Zonas de Prohibición. Acuífero del Río Copiapó
- Dirección General de Aguas – HIDROMAS CEF. 2013. Actualización de la Modelación Integrada y Subterránea del Acuífero de la Cuenca del Río Copiapó.
- Dirección General de Aguas. 2018. Ord. 241. Se pronuncia sobre requerimiento CDE.
- Golder. 2006. Diagnóstico de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Copiapó y Proposición de un Modelo de Explotación Sustentable.
- SERNAGEOMIN. 2011. Hidrogeología e hidrogeoquímica de la cuenca de la Quebrada Paipote, región de Atacama.
- SERNAGEOMIN. 2012. Evaluación hidrogeológica de la cuenca del río Copiapó, con énfasis en cuantificación, dinámica y calidad química de los recursos hídricos superficiales y subterráneos.

## 8.2 Informes Servicios Públicos sobre Sector Socavón Alcaparrosa

- Minuta DCPRH/DGA N°23 (29/08/2022) “Interpretación de datos de calidad de agua subterránea de la emergencia ocurrida por una subsidencia en sector Alcaparrosa, Tierra Amarilla, Atacama”
- SERNAGEOMIN. 2022. Antecedentes Hidrogeológicos Preliminares sobre la Subsidencia en la Mina Alcaparrosa, Tierra Amarilla, Región de Atacama.
- SERNAGEOMIN 2023. Informe Técnico “Caracterización Hidrogeológica del Área Afectada por la Subsidencia del 30 de Julio de 2022 en la Mina Alcaparrosa, Comuna de Tierra Amarilla, Región de Atacama, Chile”.

## 8.3 Proceso Candelaria y Consejo Defensa del Estado

- ARCADIS. Identificación de los Servicios Ecosistémicos de las Aguas Subterráneas de los SHAC N° 4, 5 y 6 de la Cuenca del Río Copiapó – Informe Final. 2021.
- Assessment, M. E. MEA. 2005. Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. Informe de Síntesis. Millennium Ecosystem Assessment. Washington, DC. 43p.
- Kelble, C. R., Loomis, D. K., Lovelace, S., Nuttle, W. K., Ortner, P. B., Fletcher, P., ... & Boyer, J. N. 2013. The EBM-DPSER conceptual model: integrating ecosystem services into the DPSIR framework. PloS one, 8(8).
- HIDROMAS. Informe Técnico. Estudio De Demanda Hídrica Sistema Acuífero Del Río Copiapó. 2021.
- HIDROMAS. Informe Técnico. Actualización y Ampliación del Modelo Hidrogeológico de la Cuenca del Río Copiapó. 2021.
- Primer Tribunal Ambiental. 2021. Informe de Análisis y Evaluación de Indemnidad en Propuesta de Conciliación en Demanda por Daño Ambiental “Consejo de Defensa del Estado con Compañía Contractual Minera Candelaria”, Rol D-4-2019.

## 8.4 Informes Socavón Alcaparrosa

- HIDROMAS. 2023. Informe Técnico. Actualización Modelo de Simulación Hidrogeológica Acuífero Copiapó.
- HIDROMAS. 2023. Informe Técnico. Plan de Monitoreo y Seguimiento Sector Alcaparrosa. SHAC 4 (Copiapó). Resolución DGA N°1034/2022.
- ITASCA. 2022. Memorándum técnico. ITASCA-Memo-4046.001.01 Revisión de los aspectos geomecánicos e hidrogeológicos de la formación de socavones en la mina Alcaparrosa
- VAIGS. 2022. VAIGS-MT-01-022-08342-Rev 1 Socavón Mina Alcaparrosa. Resultados visita a terreno y análisis preliminar de la condición hidrogeológica asociada a la aparición de Socavón en superficie Mina Alcaparrosa. Agosto 2022.
- VAIGS. 2023. Memorándum técnico. VAIGS-M-10-022-08342 Evaluación Efecto inundación Sector Gaby a enero 2023 Rev 0. Enero 2023.
- VAIGS. 2023. Evaluación Hidrogeológica Sobre la Demanda de Daño Ambiental por el Consejo del Defensa del Estado por el Socavón, Mina Alcaparrosa. VAIGS-IT01-023-06357\_CDE Socavón Rev\_1.
- VAIGS. 2023. Memorándum técnico. VAIGS-MT-01-023-03350-Modelo Geoquímico-Rev B. Resultados del desarrollo del modelo geoquímico, mina Alcaparrosa.