

# MODELO HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL SALAR DE ATACAMA

Informe

Escenarios de Simulación



Junio 2021

Versión Final

En bibliografía, este informe será citado como sigue:

*Amphos 21. 2021. Modelo Hidrogeológico de la Cuenca del Salar de Atacama. Informe: Escenarios de simulación.*

Amphos 21 Consulting Chile Ltda

Av. Nueva Tajamar, 481. WTC-Torre Sur- Of. 1005. Santiago (Chile)

+56 2 27991630

[www.amphos21.com](http://www.amphos21.com)

Preparado por	Revisado por	Validado por
Claudio Ávila María Pool	Luciano Achurra Pau Barceló	Juan Castaño

## Resumen Ejecutivo

Los salares Altoandinos del norte de Chile han adquirido una gran relevancia debido al interés económico por sus elevadas concentraciones de litio, potasio y boro disueltos en la salmuera, y la creciente demanda en la fabricación de baterías recargables y otros productos.

El Salar de Atacama, ubicado en la Región de Antofagasta, es reconocido como uno de los sitios con mayores reservas de litio a nivel mundial. Actualmente, existen operadores que extraen tanto la salmuera, como el agua dulce, desde distintas zonas del Sistema Acuífero de la Cuenca del Salar de Atacama (SACSA). Sin embargo, esta explotación de los recursos de salmuera y agua dulce se debe compatibilizar con el resguardo de importantes sistemas lagunares que se desarrollan en los bordes del Salar (Zona Marginal), los cuales tienen una relevancia ambiental debido a su biodiversidad, su relación con el patrimonio cultural y como puntos de gran interés turístico en la región.

Cada uno de los operadores de la cuenca tiene sus propias herramientas hidrogeológicas numéricas que han sido el sustento para la evaluación de sus proyectos y la proyección del comportamiento de los niveles de agua subterránea en distintos sectores del sistema acuífero. Sin embargo, a la fecha no existe una herramienta única, que integre a todos los operadores y permita cuantificar la respuesta del sistema hidrogeológico, frente a la extracción conjunta de los diferentes operadores y/o a variaciones de la recarga natural.

Como parte de los trabajos que Corfo ha realizado los últimos años en el Salar, el 2018 se inició la elaboración de un modelo numérico integrado de la cuenca del Salar de Atacama, a partir de la actualización del modelo conceptual que estaba disponible a la fecha y que había sido anteriormente elaborado por el Comité de Minería de no Metálica de Corfo. El ejercicio numérico consistió en un modelo de flujo 3D a escala de cuenca y 3 modelos numéricos 2D de flujo con densidad variable en los sectores de Aguas de Quelana, Peine y La Punta-La Brava.

Posteriormente, dado el cambio en la situación extractiva del sector sur de la cuenca, debido a que “Minera Escondida Limitada” a inicios del año 2020, se desistió del procedimiento de evaluación de impacto ambiental del “Proyecto Monturaqui”, y por la recepción por parte de Corfo de una serie de nuevos antecedentes técnicos aportados por un operador minero, además de antecedentes actualizados de los Planes de Seguimiento Ambiental, resultó necesario incorporar dicha información al mencionado estudio de modelo hidrogeológico de Corfo en sus componentes conceptual y numérica. Lo anterior, con el objeto de contar con

un modelo y distintos escenarios predictivos que representaran de manera más ajustada, tanto el funcionamiento del sistema hídrico como los futuros caudales de extracción de agua dulce en la cuenca del Salar de Atacama.

Es así como durante el año 2020, Amphos 21 incorporó al estudio del modelo hidrogeológico, tanto la nueva situación extractiva en la cuenca, como los nuevos antecedentes técnicos, y se terminó de desarrollar el modelo de flujo 3D construido en MODFLOW-USG que abarca un área de 10.175 km<sup>2</sup>, y 3 modelos 2D de flujo con densidad variable que fueron construidos en SEAWAT 2000 y que se sitúan en el sector de Aguas de Quelana con una longitud de 16 km, en el sector de Peine con una longitud de 15 km y en el sector de La Punta-La Brava con una longitud de 12 km.

Los escenarios predictivos de simulación que se presentan en el presente informe tienen por objetivo cuantificar los eventuales efectos de extracciones futuras y una eventual modificación de la recarga en el sistema acuífero y en sectores ambientalmente sensibles. Estos escenarios se basan en: las extracciones aprobadas ambientalmente a través de Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA), en la disminución de las extracciones anunciadas en el Plan de Desarrollo Sustentable de SQM de octubre del año 2020, en hipotéticas aprobaciones ambientales tanto de nuevos proyectos como de extensión de las extracciones ya aprobadas, así como en una eventual disminución de la recarga en la cuenca producto del cambio climático. Cabe señalar que para el caso del escenario de cambio climático existen una serie de modelos que representan diferentes condiciones de mayor y menor precipitación en la cuenca, y que para efectos de este estudio solo se ha elegido aquella representación que considera una disminución, sin perjuicio de que pueden darse escenarios de mayor precipitación y recarga.

De esta forma, con el modelo 3D se simularon 8 escenarios: el escenario 1 es el caso base, que incluye las extracciones de salmuera y agua industrial (agua dulce) aprobadas según las RCA vigentes al año 2019; el escenario 2 es el caso base junto a la hipotética aprobación de la extracción de CMZ (agua dulce) hasta 2031; el escenario 3 es equivalente al escenario 2 más la hipotética extensión de la extracción por 10 años, hasta el 2040, a la misma tasa de extracción aprobada ambientalmente a SQM a través de la RCA 226/2006 (1.700 l/s para salmuera); el escenario 4 es equivalente al escenario 2 más una reducción gradual al 50% de las extracciones de SQM (822 l/s) a partir del 2021 y hasta el 2030 (Plan de Desarrollo Sustentable de SQM octubre 2020); el escenario 5 es equivalente al escenario

2 más la hipotética extensión de la extracción de SQM<sup>1</sup> por 10 años hasta el 2040 con reducción a tasa fija del 50% (822 l/s) desde el 2021; el escenario 6 es equivalente al escenario 2 más la extensión de las extracciones de SQM<sup>1</sup> por 10 años hasta el 2040 con reducción gradual al 50% (822 l/s) en 10 años a contar de 2021, y tasa fija al 50% (822 l/s) entre 2031 y 2040; el escenario 7 es equivalente al escenario 2 más una hipotética reducción de la recarga por cambio climático; y el escenario 8 es equivalente al escenario 2 más la hipotética aprobación de la extracción de salmuera y agua dulce del proyecto NX-1 de Peine.

La simulación de los diferentes escenarios de extracción y recarga entregan como resultados potenciales efectos en los parámetros de salida de los modelos. En este sentido el análisis de los escenarios simulados en el modelo tridimensional de flujo, se ha basado en: (i) el análisis de la serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control del plan de seguimiento ambiental hidrogeológico (PSAH) y en otros puntos de observación en la zona de Monturaqui, (ii) el análisis del balance hídrico global y por sectores en el periodo 2020-2070, (iii) la cuantificación del descenso en toda la cuenca en distintos tiempos de la simulación, y (iv) el análisis del efecto en los niveles piezométricos en los puntos definidos como condición de contorno de nivel prescrito en los perfiles SEAWAT para discernir entre los escenarios que requieren modelación de flujo con densidad variable.

Del análisis de las respuestas del nivel piezométrico en los puntos de control se puede concluir que el escenario 3, que considera la hipotética extensión de las extracciones de SQM<sup>1</sup> hasta el 2040 a las mismas tasas aprobadas ambientalmente en la RCA 226/2006 (es decir, tasa de extracción de salmuera de 1.700 l/s), es el que genera mayores descensos en la zona del Salar y en la zona Marginal, mientras que para la zona de Monturaqui, zona Norte y en la zona Marginal, el escenario 7, que considera una hipotética reducción de la recarga por cambio climático, es el que genera los mayores descensos. Por otro lado, a partir de los escenarios que simulan una reducción gradual en las extracciones de SQM (escenario 4, 5 y 6) se obtienen descensos menores que en aquellos escenarios que no consideran dicha reducción.

En términos de balance hídrico, para todos los escenarios una vez que termina la extracción de los operadores mineros, la variación del almacenamiento se vuelve positiva, es decir, las entradas superan a las salidas del sistema. Sin embargo, el cese de extracción conlleva un aumento generalizado en los niveles piezométricos en todo el Salar, que induce un

---

<sup>1</sup> El contrato vigente entre Corfo y SQM termina el año 2030. Por tanto, en este informe se entenderá que la extracción para el período 2031-2040 podrá ser ejecutada por SQM u otro operador de litio.

aumento en la evaporación. Por esto, la variación del almacenamiento aumenta al terminar las extracciones, pero luego vuelve a disminuir debido al aumento en la evaporación. Pese a esta disminución, en todos los escenarios, a excepción del escenario 7 que considera el efecto del cambio climático, al término de la simulación la variación del almacenamiento es positiva para el último periodo simulado (2060-2070), mostrando una tendencia a la recuperación de los niveles del sistema acuífero. Por lo tanto, en términos de balance, el escenario que supone un mayor efecto en el sector del acuífero compuesto por agua dulce es el escenario 7 (que simula la disminución de la recarga por cambio climático), cuya variación del almacenamiento se mantiene negativa en la mayor parte del periodo de simulación, a excepción del período 2040-2049, donde es positiva.

Por otra parte, el escenario 3 (que considera la hipotética extracción de SQM a una tasa de 1.700 l/s hasta el año 2040, sin reducción) es el que produce el mayor efecto en el acuífero compuesto por salmuera (SHAC N), ya que produce una variación del almacenamiento negativa hasta la década de 2030-2039. A partir de la década del 2040, y hasta el final del periodo de simulación, en el escenario 3 se mantiene una variación de almacenamiento positiva. Sin embargo, observando la variación del almacenamiento para todo el periodo 2020-2070 existe una variación negativa e igual a -28 l/s.

En base a los resultados de los 8 escenarios predictivos simulados con el modelo de flujo 3D, se ha elegido representar en los modelos 2D de densidad variable, aquellos que simulan los mayores descensos en los extremos de los perfiles del modelo 2D, ubicados tanto en el sector del Núcleo como en la Zona Marginal y que corresponden al: escenario 1 como caso base (incluye las extracciones de salmuera y agua industrial/agua dulce aprobadas según las RCA vigentes al año 2019), escenario 3 (es equivalente al escenario 2 más la hipotética extensión de la extracción de SQM por 10 años hasta el 2040, con la misma tasa de extracción aprobada ambientalmente para salmuera de 1.700 l/s), escenario 4 (es equivalente al escenario 2 más una reducción gradual al 50% de las extracciones de SQM a partir del 2021 y hasta el 2030) y escenario 7 (es equivalente al escenario 2 más una hipotética reducción de la recarga por cambio climático).

Para cuantificar el efecto de cada uno de los escenarios, se ha analizado el descenso en los puntos de observación incluidos en los perfiles, así como el posible desplazamiento de la interfaz salina, el cual se ha analizado en este estudio mediante la posición de las líneas de isoconcentración del 25% ( $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ ), 50% ( $C=165 \text{ kg/m}^3$ ) y 75% ( $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ).

Para los tres perfiles, los máximos descensos en los puntos de observación del Núcleo se obtienen a partir del escenario 3, mientras que los mayores descensos en la Zona Marginal

se producen a partir del escenario 7 de cambio climático. Los descensos obtenidos a partir del escenario 4 son similares a los del caso base (escenario 1), aunque menores producto de la disminución gradual de la extracción de SQM.

Con respecto al desplazamiento de la interfaz, se obtienen resultados similares a partir de los cuatro escenarios simulados. Los mayores desplazamientos horizontales de la interfaz en superficie (primeros 10 m de profundidad) se producen en el perfil La Punta-La Brava con 305 m (escenario 7), y para el perfil Peine con alrededor de 160 m (escenarios 3 y 7); mientras que para el perfil de Quelana el desplazamiento horizontal somero máximo es de casi 40 metros (escenarios 3 y 7). Cabe señalar que el desplazamiento horizontal de la interfaz salina implica también un desplazamiento vertical, que es uno o dos órdenes de magnitud menor que la componente horizontal.

Por lo tanto, de los resultados de los escenarios presentados en este informe, tanto del caso base como de los escenarios hipotéticos, se puede concluir en forma general que:

- Todos los escenarios futuros simulados muestran descensos del nivel freático en el Núcleo y en la Zona Marginal, y en todos los perfiles 2D se evidencia el potencial de generar modificación de la distribución de las concentraciones y, por tanto, desplazamiento en la interfaz salina. Las magnitudes de estos descensos y movimientos dependen del régimen de extracción de salmuera y agua dulce en el sistema acuífero, así como de la recarga impuesta.
- Los escenarios simulados en 2D muestran un desplazamiento de la interfaz salina cerca de la superficie, que alcanza casi los 40 metros para el perfil de Quelana (escenarios 3 y 7), unos 160 m para el perfil de Peine (escenarios 3 y 7) y los 305 metros para el perfil La Punta-La Brava (escenario 7).
- Si bien todos los escenarios que simulan extracciones muestran una tendencia a la recuperación de los niveles piezométricos y a una variación de almacenamiento positiva en el balance hídrico hacia el final de la simulación (2070), debido al cese de las extracciones, el desplazamiento de la interfaz se revierte a una velocidad menor que la recuperación de niveles para el mismo periodo. Esto se debe a que el movimiento de la interfaz posee una inercia de desplazamiento que sigue escalas temporales superiores a las de recuperación de los niveles piezométricos.
- Las extracciones futuras de salmuera en el Núcleo del Salar podrían generar una modificación de la distribución de las concentraciones (sólidos totales disueltos) y ciertos desplazamientos en la interfaz.

Es relevante considerar que los modelos numéricos en los que se basan las predicciones presentadas en este informe corresponden a una simplificación del modelo conceptual que describe los principales procesos hidrológicos e hidrogeológicos que ocurren en la cuenca. La escala del modelo numérico 3D es regional y debe utilizarse para predecir procesos a esa escala y no a nivel centimétrico. Por su parte, los modelos numéricos de densidad variable 2D simplifican procesos tridimensionales, no consideran procesos superficiales ni procesos de la zona no saturada y son dependientes de las condiciones de borde impuestas. Es por esto que los resultados de los modelos deben ser considerados como tendencias y aproximaciones al funcionamiento general del sistema, es decir, la capacidad predictiva de los resultados de los escenarios debe considerarse en conjunto con las limitaciones propias de cualquier modelo numérico.

Tal como señala la Guía de Modelación de Agua Subterránea del SEIA (SEA, 2012), tanto el modelo hidrogeológico conceptual como los modelos numéricos construidos, deben ir actualizándose permanentemente de manera de incorporar nueva información que enriquezca el conocimiento del sistema. Por su parte, la capacidad predictiva de los modelos numéricos podrá ir corroborándose con nuevos datos de monitoreo que se recolecten en el futuro.

Por último, se propone una serie de trabajos adicionales a los existentes desarrollados por las compañías operadoras en la cuenca y por la DGA, respecto de la caracterización hidrogeológica en sectores específicos de la cuenca, entre ellos la construcción en la Zona Marginal de piezómetros multinivel y monitoreo de nivel y calidad de agua. Para las zonas de Borde Oeste, Norte y sectores de cabecera de la cuenca, se sugiere la recolección de nueva información hidrogeológica, hidrológica y meteorológica que permita complementar el conocimiento del sistema acuífero en la cuenca del Salar de Atacama.



# Índice

<b>Resumen Ejecutivo .....</b>	<b>3</b>
<b>1 Introducción .....</b>	<b>21</b>
1.1 Objetivos del estudio .....	23
1.2 Objetivo específico del Informe de Escenarios de Simulación .....	24
<b>2 Escenarios predictivos: Modelo 3D de flujo .....</b>	<b>25</b>
2.1 Parámetros hidráulicos .....	28
2.2 Condiciones de contorno .....	28
2.3 Discretización temporal y condición inicial .....	36
2.4 Consideraciones sobre los resultados del modelo 3D y 2D .....	37
2.4.1 Corrección de niveles por densidad .....	37
<b>3 Resultados de los escenarios predictivos en el Modelo 3D de Flujo. ....</b>	<b>43</b>
3.1 Escenarios con RCA vigente .....	46
3.1.1 Escenario 1 .....	46
3.2 Escenarios con RCA vigentes y situaciones adicionales hipotéticas de extracción y recarga .....	56
3.2.1 Escenario 2 .....	56
3.2.2 Escenario 3 .....	65
3.2.3 Escenario 4 .....	75
3.2.4 Escenario 5 .....	85
3.2.5 Escenario 6 .....	95
3.2.6 Escenario 7 .....	105
3.2.7 Escenario 8 .....	115
3.3 Resumen de resultados modelo de flujo 3D y elección de escenarios de flujo con densidad variable .....	128
<b>4 Escenarios predictivos: Perfiles de flujo 2D con densidad variable .....</b>	<b>138</b>

<b>5 Resultados de los escenarios predictivos en el Modelo 2D de Flujo con densidad variable.....</b>	<b>140</b>
5.1 Perfil Quelana.....	140
5.1.1 Escenarios con RCA vigente.....	140
5.1.1.1 Escenario 1.....	140
5.1.2 Escenarios con RCA vigentes y situaciones adicionales hipotéticas de extracción y recarga.....	147
5.1.2.1 Escenario 3.....	147
5.1.2.2 Escenario 4.....	153
5.1.2.3 Escenario 7.....	159
5.2 Perfil Peine.....	165
5.2.1 Escenarios con RCA vigente.....	165
5.2.1.1 Escenario 1.....	165
5.2.2 Escenarios con RCA vigentes y situaciones adicionales hipotéticas de extracción y recarga.....	171
5.2.2.1 Escenario 3.....	171
5.2.2.2 Escenario 4.....	176
5.2.2.3 Escenario 7.....	180
5.3 Perfil La Punta-La Brava.....	185
5.3.1 Escenarios con RCA vigente.....	185
5.3.1.1 Escenario 1.....	185
5.3.2 Escenarios con RCA vigentes y situaciones adicionales hipotéticas de extracción y recarga.....	192
5.3.2.1 Escenario 3.....	192
5.3.2.2 Escenario 4.....	198
5.3.2.3 Escenario 7.....	204
5.4 Resumen de escenarios en perfiles de densidad variable.....	210

<b>6</b>	<b>Discusión de los resultados</b> .....	<b>214</b>
6.1	Modelo 3D de flujo.....	218
6.2	Modelos 2D de flujo con densidad variable.....	223
6.3	Limitaciones de las simulaciones .....	227
<b>7</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>229</b>
<b>8</b>	<b>Recomendaciones</b> .....	<b>235</b>
<b>9</b>	<b>Referencias</b> .....	<b>237</b>

## Índice de Anexos Digitales

### Anexo I. Escenarios

Apéndice A - Extracción escenarios 3D

Apéndice B - Escenarios 3D

Apéndice C - Escenarios 2D

## Índice de Tablas

Tabla 2-1: Escenarios predictivos simulados con el modelo numérico de flujo 3D.....	27
Tabla 2-2: Caudales medios anuales (L/s) de cada operador en los 8 escenarios simulados.....	35
Tabla 3-1: Descensos máximos en los puntos de control por áreas de interés para el escenario 1.....	48
Tabla 3-2: Resultado del balance hídrico promedio por periodo (L/s) para el escenario 1.....	53
Tabla 3-3: Descensos máximos en los puntos de control por áreas de interés para el escenario 2.....	57
Tabla 3-4: Resultado del balance hídrico promedio por periodo (L/s) para el escenario 2.....	61
Tabla 3-5: Descensos máximos en los puntos de control por áreas de interés para el escenario 3.....	67
Tabla 3-6: Resultado del balance hídrico promedio por periodo (L/s) para el escenario 3.....	71
Tabla 3-7: Descensos máximos en los puntos de control por áreas de interés para el escenario 4.....	77
Tabla 3-8: Resultado del balance hídrico promedio por periodo (L/s) para el escenario 4.....	82
Tabla 3-9: Descensos máximos en los puntos de control por áreas de interés para el escenario 5.....	87
Tabla 3-10: Resultado del balance hídrico promedio por periodo (L/s) para el escenario 5.....	91
Tabla 3-11: Descensos máximos en los puntos de control por áreas de interés para el escenario 6.....	97
Tabla 3-12: Resultado del balance hídrico promedio por periodo (L/s) para el escenario 6.....	102
Tabla 3-13: Descensos máximos en los puntos de control por áreas de interés para el escenario 7.....	107
Tabla 3-14: Resultado del balance hídrico promedio por periodo (L/s) para el escenario 7.....	112
Tabla 3-15: Descensos máximos en los puntos de control por áreas de interés para el escenario 8.....	118
Tabla 3-16: Resultado del balance hídrico promedio por periodo (L/s) para el escenario 8.....	123
Tabla 3-17: Balance Hídrico escenario 2 y escenario 8 por tipo de agua, en que se observa un aumento de la variación de almacenamiento en la zona del Núcleo dada por el escenario 8.....	124
Tabla 3-18: Balance hídrico global promedio por periodo (L/s) calculado a partir del modelo tridimensional de flujo para los distintos escenarios de simulación.....	134
Tabla 3-19: Resumen del balance (L/s) por década y total para cada SHAC obtenido a partir de cada escenario de simulación.....	135
Tabla 3-20: Descenso con respecto a la situación de diciembre de 2019 calculado a partir del modelo tridimensional de flujo en los puntos de observación para los distintos escenarios de simulación.....	137
Tabla 4-1: Escenarios predictivos simulados con los modelos de densidad variable 2D.....	138
Tabla 5-1: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de Quelana obtenido a partir del escenario 1.....	141
Tabla 5-2: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de Quelana obtenido a partir del escenario 3.....	148
Tabla 5-3: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de Quelana obtenido a partir del escenario 4.....	154
Tabla 5-4: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de Quelana obtenido a partir del escenario 7.....	160
Tabla 5-5: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de Peine obtenido a partir del escenario 1.....	166
Tabla 5-6: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de Peine obtenido a partir del escenario 3.....	172
Tabla 5-7: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de Peine obtenido a partir del escenario 4.....	177

Tabla 5-8: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de Peine obtenido a partir del escenario 7. ....	181
Tabla 5-9: Descensos máximos en ptos. de control del perfil de La Punta-La Brava según escenario 1. ....	186
Tabla 5-10: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de La Punta-La Brava obtenido a partir del escenario 3. ....	193
Tabla 5-11: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de La Punta-La Brava obtenido a partir del escenario 4. ....	199
Tabla 5-12: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de La Punta-La Brava obtenido a partir del escenario 7. ....	205
Tabla 5-13: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de Quelana obtenido a partir de los escenarios 1, 3, 4 y 7. ....	211
Tabla 5-14: Descensos máximos en puntos de control para el perfil de Peine obtenido a partir de los escenarios 1, 3, 4 y 7. ....	211
Tabla 5-15: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de La Punta-La Brava obtenido a partir de los escenarios 1, 3, 4 y 7. ....	212
Tabla 5-16: Desplazamiento horizontal y vertical de la interfaz (profundo y superficial) para los tres perfiles SEAWAT obtenidos a partir de los escenarios de gestión 1, 3, 4 y 7. ....	213
Tabla 6-1: Resumen de escenarios y resultados de las simulaciones evaluadas con el modelo 3D y 2D. ....	216

## Índice de Figuras

Figura 2-1: Series de recarga por precipitación definidas en los escenarios de simulación. ....	29
Figura 2-2: Series de recarga lateral por escorrentía definidas en los escenarios de simulación.....	29
Figura 2-3: Caudales de extracción neta para el escenario 1 y caudales incluidos en el modelo numérico para cada operador incluyendo las variaciones estacionales. Las líneas discontinuas muestran los caudales promedio anuales definidos para cada operador. ....	31
Figura 2-4: Caudales de extracción neta para los escenarios 2 y 7, y caudales incluidos en el modelo numérico para cada operador incluyendo las variaciones estacionales. Las líneas discontinuas muestran los caudales promedio anuales definidos para cada operador. ....	31
Figura 2-5: Caudales de extracción neta para el escenario 3 y caudales incluidos en el modelo numérico para cada operador incluyendo las variaciones estacionales. Las líneas discontinuas muestran los caudales promedio anuales definidos para cada operador. ....	32
Figura 2-6: Caudales de extracción neta para el escenario 4 y caudales incluidos en el modelo numérico para cada operador incluyendo las variaciones estacionales. Las líneas discontinuas muestran los caudales promedio anuales definidos para cada operador. ....	32
Figura 2-7: Caudales de extracción neta para el escenario 5 y caudales incluidos en el modelo numérico para cada operador incluyendo las variaciones estacionales. Las líneas discontinuas muestran los caudales promedio anuales definidos para cada operador. ....	33
Figura 2-8: Caudales de extracción neta para el escenario 6 y caudales incluidos en el modelo numérico para cada operador incluyendo las variaciones estacionales. Las líneas discontinuas muestran los caudales promedio anuales definidos para cada operador. ....	33
Figura 2-9: Caudales de extracción neta para el escenario 8 y caudales incluidos en el modelo numérico para cada operador incluyendo las variaciones estacionales. Las líneas discontinuas muestran los caudales promedio anuales definidos para cada operador. ....	34
Figura 2-10: Esquema de la corrección de nivel para sistemas con interfaz abrupta. ....	38
Figura 2-11. Esquema de la corrección de nivel para sistemas con zona de mezcla (modificado de Marazuela et al., 2018). ....	39
Figura 2-12. Distribución de la profundidad de las isosuperficies de EC de 200 y 100 mS cm <sup>-1</sup> , y cortes verticales mostrando el espesor de la zona de mezcla (modificado de Marazuela et al., 2018). ....	40
Figura 2-13. Relación entre conductividad eléctrica y densidad medida en campo. Se muestra la ecuación de correlación, así como el error cuadrático. ....	41
Figura 3-1: Sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común (SHAC) y los SHAC que se analizan en el balance del modelo numérico.....	45
Figura 3-2: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control (PSHA) para el escenario 1. ....	49
Figura 3-3: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control para el escenario 1 en la zona de Monturaquí. ....	50
Figura 3-4: Resumen del balance hídrico obtenido a partir del escenario 1 mostrando las principales entradas y salidas al sistema. ....	51
Figura 3-5: Descenso a partir de inicio de simulación para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 1. ....	54
Figura 3-6: Piezometría para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 1. ....	55

Figura 3-7: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control (PSHA) para el escenario 2. .....	58
Figura 3-8: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control para el escenario 2 en la zona de Monturaqui. ....	59
Figura 3-9: Resumen del balance hídrico obtenido a partir del escenario 2 mostrando las principales entradas y salidas al sistema. ....	60
Figura 3-10: Descenso a partir de inicio de simulación para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 2. ....	63
Figura 3-11: Piezometría para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 2. ....	64
Figura 3-12: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control (PSHA) para el escenario 3. ....	68
Figura 3-13: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control para el escenario 3 en la zona de Monturaqui. ....	69
Figura 3-14: Resumen del balance hídrico obtenido a partir del escenario 3 mostrando las principales entradas y salidas al sistema. ....	70
Figura 3-15: Descenso a partir de inicio de simulación para diciembre de 2040, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 3. ....	73
Figura 3-16: Piezometría para diciembre de 2040, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 3. ....	74
Figura 3-17: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control (PSHA) para el escenario 4. ....	78
Figura 3-18: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control para el escenario 4 en la zona de Monturaqui. ....	79
Figura 3-19: Resumen del balance hídrico obtenido a partir del escenario 4 mostrando las principales entradas y salidas al sistema. ....	80
Figura 3-20: Descenso a partir de inicio de simulación para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 4. ....	83
Figura 3-21: Piezometría para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 4. ....	84
Figura 3-22: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control (PSHA) para el escenario 5. ....	88
Figura 3-23: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control para el escenario 5 en la zona de Monturaqui. ....	89
Figura 3-24: Resumen del balance hídrico obtenido a partir del escenario 5 mostrando las principales entradas y salidas al sistema. ....	90
Figura 3-25: Descenso a partir de inicio de simulación para diciembre de 2040, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 5. ....	93
Figura 3-26: Piezometría para diciembre de 2040, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 5. ....	94
Figura 3-27: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control (PSHA) para el escenario 6. ....	98
Figura 3-28: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control para el escenario 6 en la zona de Monturaqui. ....	99



Figura 3-29: Resumen del balance hídrico obtenido a partir del escenario 6 mostrando las principales entradas y salidas al sistema. ....	100
Figura 3-30: Descenso a partir de inicio de simulación para diciembre de 2040, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 6. ....	103
Figura 3-31: Piezometría para julio de 2042, diciembre de 2052 y diciembre de 2070 para el escenario 6. ....	104
Figura 3-32: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control (PSHA) para el escenario 7. ....	108
Figura 3-33: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control para el escenario 7 en la zona de Monturaqui. ....	109
Figura 3-34: Resumen del balance hídrico obtenido a partir del escenario 7 mostrando las principales entradas y salidas al sistema. ....	110
Figura 3-35: Descenso a partir de inicio de simulación para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 7. ....	113
Figura 3-36: Piezometría para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 7. ....	114
Figura 3-37: Distribución de pozos de NX1 Peine reales (izquierda) y ficticios (derecha) y pozos de SQM (MOP y SOP) para extracción definida en el escenario 8. ....	116
Figura 3-38: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control (PSHA) para el escenario 8. ....	119
Figura 3-39: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control para el escenario 8 en la zona de Monturaqui. ....	120
Figura 3-40: Resumen del balance hídrico obtenido a partir del escenario 8 mostrando las principales entradas y salidas al sistema. ....	121
Figura 3-41: Descenso a partir de inicio de simulación para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 8. ....	126
Figura 3-42: Piezometría para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 8. ....	127
Figura 3-43: Niveles obtenidos a partir del modelo tridimensional de flujo para los distintos escenarios de gestión para los puntos definidos como condición de borde del perfil de Quelana. ....	130
Figura 3-44: Niveles obtenidos a partir del modelo tridimensional de flujo para los distintos escenarios de gestión para los puntos definidos como condición de borde del perfil de Peine. ....	131
Figura 3-45: Niveles obtenidos a partir del modelo tridimensional de flujo para los distintos escenarios de gestión para los puntos definidos como condición de borde del perfil de La Punta-La Brava. ....	132
Figura 5-1: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil Quelana a partir del escenario 1. ....	142
Figura 5-2: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de Quelana para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 1. ....	144
Figura 5-3: Mapas de isoconcentración (25% C=82,5 kg/m <sup>3</sup> , 50% C=165 kg/m <sup>3</sup> y 75% C=247,5 kg/m <sup>3</sup> ) para el perfil de Quelana para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 1. ....	145
Figura 5-4: Zoom a los desplazamientos horizontales (superficial y profundo) y verticales de las isoconcentraciones del 25% y 75% para el escenario 1 del perfil de Quelana. ....	146
Figura 5-5: Distribución vertical de la concentración para x=14.025 m para el perfil de Quelana para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 1. ....	147
Figura 5-6: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil Quelana a partir del escenario 3. ....	149

Figura 5-7: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de Quelana para los años 2019, 2040, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 3. ....	151
Figura 5-8: Mapas de isoconcentración (25% C=82,5 kg/m <sup>3</sup> , 50% C=165 kg/m <sup>3</sup> y 75% C=247,5 kg/m <sup>3</sup> ) para el perfil de Quelana para los años 2019, 2040, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 3. ....	152
Figura 5-9: Distribución vertical de la concentración para x=14.025 m para el perfil de Quelana para los años 2019, 2040, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 3. ....	153
Figura 5-10: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil Quelana a partir del escenario 4. ....	155
Figura 5-11: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de Quelana para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 4. ....	157
Figura 5-12: Mapas de isoconcentración (25% C=82,5 kg/m <sup>3</sup> , 50% C=165 kg/m <sup>3</sup> y 75% C=247,5 kg/m <sup>3</sup> ) para el perfil de Quelana para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 4. ....	158
Figura 5-13: Distribución vertical de la concentración para x=14.025 m para el perfil de Quelana para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 4. ....	159
Figura 5-14: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil Quelana a partir del escenario 7. ....	161
Figura 5-15: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de Quelana para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 7. ....	163
Figura 5-16: Mapas de isoconcentración (25% C=82,5 kg/m <sup>3</sup> , 50% C=165 kg/m <sup>3</sup> y 75% C=247,5 kg/m <sup>3</sup> ) para el perfil de Quelana para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 7. ....	164
Figura 5-17: Distribución vertical de la concentración para x=14.025 m para el perfil de Quelana para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 7. ....	165
Figura 5-18: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil Peine a partir del escenario 1. ....	168
Figura 5-19: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de Peine para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 1. ....	169
Figura 5-20: Mapas de isoconcentración (25% C=82,5 kg/m <sup>3</sup> , 50% C=165 kg/m <sup>3</sup> y 75% C=247,5 kg/m <sup>3</sup> ) para el perfil de Peine para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 1. ....	170
Figura 5-21: Zoom al desplazamiento horizontal superficial y vertical de las isoconcentraciones del 25% y 75% para el escenario 1 del perfil de Peine. ....	171
Figura 5-22: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil Peine a partir del escenario 3. ....	173
Figura 5-23: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de Peine para los años 2019, 2040, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 3. ....	174
Figura 5-24: Mapas de isoconcentración (25% C=82,5 kg/m <sup>3</sup> , 50% C=165 kg/m <sup>3</sup> y 75% C=247,5 kg/m <sup>3</sup> ) para el perfil de Peine para los años 2019, 2040, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 3. ....	175
Figura 5-25: Distribución vertical de la concentración para x=13.263 m para el perfil de Peine para los años 2019, 2040, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 3. ....	176
Figura 5-26: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil Peine a partir del escenario 4. ....	178
Figura 5-27: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de Peine para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 4. ....	179
Figura 5-28: Mapas de isoconcentración (25% C=82,5 kg/m <sup>3</sup> , 50% C=165 kg/m <sup>3</sup> y 75% C=247,5 kg/m <sup>3</sup> ) para el perfil de Peine para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 4. ....	180

Figura 5-29: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil Peine a partir del escenario 7.....	182
Figura 5-30: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de Peine para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 7. ....	183
Figura 5-31: Mapas de isoconcentración (25% C=82,5 kg/m <sup>3</sup> , 50% C=165 kg/m <sup>3</sup> y 75% C=247,5 kg/m <sup>3</sup> ) para el perfil de Peine para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 7.....	184
Figura 5-32: Distribución vertical de la concentración para x=13.263 m para el perfil de Peine para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 7.....	185
Figura 5-33: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil La Punta-La Brava a partir del escenario 1.....	187
Figura 5-34: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 1.....	189
Figura 5-35: Mapas de isoconcentración (25% C=82,5 kg/m <sup>3</sup> , 50% C=165 kg/m <sup>3</sup> y 75% C=247,5 kg/m <sup>3</sup> ) para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 1. ....	190
Figura 5-36: Zoom al desplazamiento horizontal superficial de la isoconcentración del 50% para el escenario 1 del perfil de La Punta-La Brava. ....	191
Figura 5-37: Distribución vertical de la concentración para x=9.022 m para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 1.....	192
Figura 5-38: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil La Punta-La Brava a partir del escenario 3.....	194
Figura 5-39: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2040, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 3.....	196
Figura 5-40: Mapas de isoconcentración (25% C=82,5 kg/m <sup>3</sup> , 50% C=165 kg/m <sup>3</sup> y 75% C=247,5 kg/m <sup>3</sup> ) para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 3. ....	197
Figura 5-41: Distribución vertical de la concentración para x=9.022 m para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2040, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 3.....	198
Figura 5-42: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil La Punta-La Brava a partir del escenario 4.....	200
Figura 5-43: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 4.....	202
Figura 5-44: Mapas de isoconcentración (25% C=82,5 kg/m <sup>3</sup> , 50% C=165 kg/m <sup>3</sup> y 75% C=247,5 kg/m <sup>3</sup> ) para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 4. ....	203
Figura 5-45: Distribución vertical de la concentración para x=9.022 m para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 4.....	204
Figura 5-46: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil La Punta-La Brava a partir del escenario 7.....	206
Figura 5-47: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 7.....	208
Figura 5-48: Mapas de isoconcentración (25% C=82,5 kg/m <sup>3</sup> , 50% C=165 kg/m <sup>3</sup> y 75% C=247,5 kg/m <sup>3</sup> ) para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 7. ....	209

Figura 5-49: Distribución vertical de la concentración para $x=9.022$ m para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 7.....	210
Figura 6-1: Mapa de localización de los perfiles 2D de Quelana, Peine y La Punta - La Brava con sus respectivos puntos de observación y la clasificación de los puntos de seguimiento ambiental, entre PSA, PC y PAT de los diferentes operadores de la cuenca del Salar de Atacama. ....	217
Figura 6-2: Variación de la concentración en el tiempo de las capas 2, 4, 6 y 8 para $x=7.000$ m en el perfil 2D en la simulación del escenario 7 del perfil de La Punta-La Brava. ....	226

## 1 Introducción

El Salar de Atacama, ubicado en la Región de Antofagasta, se caracteriza por presentar un significativo potencial de litio, potasio y boro, los cuales son metales de creciente interés económico. Estos metales se encuentran disueltos en la salmuera que está contenida en los depósitos salinos del salar. Debido a la disposición y a las características de estos depósitos salinos, la obtención de estos metales se efectúa mediante pozos de extracción de salmuera.

En la cuenca Salar de Atacama existen una serie de ecosistemas que se desarrollan en los bordes del Salar (Zona Marginal), los cuales corresponden a objetos de protección ambiental debido a su biodiversidad, relación al patrimonio cultural y como puntos de interés turístico. Estas zonas corresponden a los sistemas lagunares de La Punta–La Brava, sistema Peine, sistema aguas de Quelana, sistema Soncor y las reservas nacionales de los flamencos (correspondiente a un área de SNASPE).

Actualmente, existen distintos operadores que explotan la salmuera y extraen el agua dulce desde la cuenca del Salar de Atacama; sin embargo, cada uno de ellos cuenta con sus propias herramientas numéricas para la simulación de escenarios que permitan la gestión de los recursos de agua dulce y salmuera. Lo anterior, sumado a la relevancia de compatibilizar la explotación de los recursos con el resguardo de los objetos de protección ambiental ubicados en los bordes o zona Marginal del salar ha puesto en evidencia la necesidad de implementar una herramienta numérica de gestión única que integre las componentes relevantes del sistema hídrico de toda la cuenca y las extracciones de los distintos actores.

Es así como Corfo ha desarrollado una serie de estudios a partir del año 2017 (iniciados a través del Comité de Minería No Metálica de Corfo), los cuales han tenido como principal objetivo mejorar y contribuir a la gestión integral de los recursos de agua dulce y salmuera en el Salar de Atacama, considerando la preservación de objetos de protección y los intereses de los actores implicados.

En este contexto, el año 2018, Amphos 21 Consulting Chile (en adelante Amphos 21) inició la elaboración de un modelo numérico integrado de la cuenca del Salar de Atacama, a partir de la actualización del modelo conceptual que estaba disponible a la fecha y que había sido inicialmente elaborado por el Comité de Minería de no Metálica de Corfo. El modelo numérico integrado consistió en el desarrollo de un modelo numérico de flujo y de 3 modelos numéricos de flujo con densidad variable. En estos modelos se evaluaron diversos escenarios predictivos que

simularon la explotación conjunta de salmuera y agua dulce, por parte de los distintos operadores que desarrollan actividades en la cuenca, así como también variaciones en la recarga.

Posteriormente, a raíz del análisis técnico de nuevos antecedentes hidrogeológicos, así como del nuevo escenario de explotación del salar que se produjo por la decisión de Minera Escondida Ltda. de desistir del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) del Proyecto Monturaqui, resultó necesario incorporar dicha información al mencionado estudio del modelo hidrogeológico en sus componentes conceptual y numérica. Lo anterior, con el objeto de contar con un modelo y distintos escenarios predictivos que representaran de manera más ajustada, tanto el funcionamiento del sistema hídrico como los futuros caudales de extracción de agua dulce en la cuenca del Salar de Atacama.

Es así como durante el año 2020, Amphos 21 incorporó al estudio de modelo hidrogeológico, tanto la nueva situación extractiva en la cuenca, como los nuevos antecedentes técnicos, y se terminó de desarrollar el modelo de flujo 3D construido en MODFLOW-USG que abarca un área de 10.175 km<sup>2</sup>, y 3 modelos 2D de flujo con densidad variable que fueron construidos en SEAWAT 2000 y que se sitúan en el sector de Aguas de Quelana con una longitud de 16 km, en el sector de Peine con una longitud de 15 km y en el sector de La Punta-La Brava con una longitud de 12 km. El detalle de dichos modelos se presenta en el Informe de Modelo Hidrogeológico (Amphos 21, 2021).

En el presente Informe de Escenarios de Simulación se incluyen los resultados de 8 escenarios predictivos simulados con el modelo 3D de flujo y de 4 escenarios simulados con los modelos 2D de flujo con densidad variable. Los resultados de estas simulaciones entregan una visión general de los principales procesos que influyen en el sistema acuífero ante distintas combinaciones de extracción futura y efectos climáticos, en términos de las tendencias en la evolución de los niveles piezométricos de agua dulce y salmuera, y posibles movimientos de la interfaz salina.

A la fecha existen una serie de elementos que forman parte del modelo conceptual y de los modelos numéricos, que no son posibles de medir directamente como la recarga, o bien información geológica e hidrogeológica insuficiente en sectores de la cuenca que no permiten una correcta representación en todo el dominio. Por lo tanto, los modelos presentados en el Informe de Modelo Hidrogeológico y sus predicciones entregadas en el presente informe, deben ser objeto de futuras actualizaciones con nueva información de monitoreo y antecedentes complementarios que permitan profundizar el conocimiento de este complejo sistema hidrogeológico, y fortalecer de esta forma, las predicciones realizadas. Así mismo, dichos

modelos podrán servir de base para otros estudios, incluso para elaborar modelos locales de mayor detalle que los actuales.

La capacidad predictiva y la utilización de las herramientas numéricas presentadas, como instrumento adicional y complementario a la gestión ambiental, debe ser cuantificada en función de la escala del problema a resolver y considerando las limitaciones propias de los modelos numéricos como representaciones simplificadas del real funcionamiento hidrogeológico.

## 1.1 Objetivos del estudio

El objetivo principal de este estudio consiste en actualizar el modelo hidrogeológico conceptual preexistente de la cuenca del Salar de Atacama con nueva información disponible (información geológica y constructiva de pozos, geofísica, parámetros hidráulicos, hidroquímica), así como también, desarrollar modelos numéricos de flujo con capacidad para modelar el flujo multifase que se produce en la cuenca. De esta forma la modelación numérica será capaz de reproducir las condiciones actuales de operación y predecir, a través de la simulación de 8 escenarios, los efectos combinados de los actuales operadores y de los proyectos previstos, así como eventuales cambios en la recarga del sistema. Los ámbitos de análisis son:

- Efectos sobre las zonas de protección ambiental.
- Variación de los niveles de agua subterránea en pozos que forman parte de los Planes de Seguimiento Ambiental (PSA), Planes de Alerta Temprana (PAT) y Planes de Contingencia (PC) de los diferentes operadores de la cuenca. De este modo, el modelo y sus futuras actualizaciones podrán ser utilizado por la autoridad competente como herramienta para la gestión hídrica en el Salar de Atacama.
- Variación de la posición de la interfaz agua dulce/salmuera y rango de operación de flujos para los campos de pozos de producción, tanto de salmuera como de agua dulce.

El alcance de estos objetivos es revisado a lo largo del informe y en las conclusiones, según los resultados obtenidos y capacidad predictiva de los modelos numéricos. De esta forma, se pone de manifiesto que, si bien se abordan los alcances específicos listados anteriormente y se concluye respecto a estos, los resultados de las simulaciones no deben ser entendidos como valores precisos y absolutos, sino como aproximaciones o tendencias generales. La escala de los modelos y sus limitaciones propias los constituyen en herramientas capaces de predecir tendencias, órdenes de magnitud en los resultados y procesos generales, y no para la determinación de umbrales puntuales o la superación de estos. En caso de necesitar respuestas

de mayor precisión en ciertas áreas, se debe contar con modelos numéricos construidos con información de detalle, acorde a la escala del problema.

## **1.2 Objetivo específico del Informe de Escenarios de Simulación**

El presente informe tiene como objetivo presentar y analizar los resultados de los escenarios de simulación del estudio, realizados con el modelo numérico de flujo 3D del sistema acuífero de la cuenca del Salar de Atacama y de los 3 modelos numéricos de flujo con densidad variable 2D ubicados en la zona Marginal, en el entorno del sistema Aguas de Quelana, Peine y La Punta-La Brava.

Para ello, los resultados se presentan en términos de descensos del nivel de agua subterránea, balance hídrico por subcuenca y dominio de agua dulce o salmuera, además de variaciones en la concentración (sólidos disueltos totales) en la zona Marginal del Salar.



## 2 Escenarios predictivos: Modelo 3D de flujo

Para simular los efectos de las extracciones futuras en el sistema acuífero y sectores ambientalmente sensibles se han definido 8 escenarios predictivos de simulación. Estos escenarios se basan en:

### **Escenario con RCA vigentes**

- Las extracciones permitidas por proyectos ambientalmente aprobados por resoluciones de calificación ambiental (RCA).

### **Escenarios con RCA vigentes y situaciones adicionales hipotéticas de extracción y recarga**

- La posible aprobación de extensiones de proyectos de extracción de agua dulce/industrial que están actualmente en evaluación de impacto ambiental.
- Hipotéticos proyectos de extracción de salmuera y/o agua dulce/industrial que implicarían un aumento en las tasas y/o periodos de extracción.
- Disminuciones de extracción de salmuera y agua dulce/industrial anunciadas en el Plan de Desarrollo Sustentable de SQM en octubre de 2020.
- Hipotética disminución de la recarga en la cuenca producto del cambio climático.

Estos 8 escenarios predictivos se simularon en el modelo numérico de flujo 3D. Posteriormente, en base a los resultados obtenidos en términos de descensos en diversos sectores y efectos en el balance hídrico, se escogieron algunos escenarios para su simulación en los perfiles 2D de flujo con densidad variable, y cuantificar así, efectos más locales en los niveles piezométricos y en la interfaz agua dulce - salmuera.

A continuación, en la Tabla 2-1 se describen los principales aspectos que componen cada uno de los 8 escenarios definidos para las predicciones a futuro del modelo numérico 3D, indicando las extracciones de salmuera y agua dulce/industrial simuladas por operador (entre paréntesis se indica el año de término de dichas extracciones, o bien, el periodo considerado), la recarga utilizada y el horizonte de modelación.

Escenario con RCA vigentes		Extracciones	Recarga	Horizonte de Modelación
Escenario 1	Caso Base.	Salmuera: aprobadas por RCA al 2019 para los operadores de la cuenca SQM (2030), ALB (2042) Agua dulce: aprobadas por RCA al 2019 para los operadores de la cuenca SQM (2030), ALB (2042), CMZ (2023)	Recarga promedio estimada hasta el 2019	2070 - 25 años después del término de la última aprobación ambiental
Escenarios con RCA vigentes y situaciones adicionales hipotéticas de extracción y recarga		Extracciones	Recarga	Horizonte de Modelación
Escenario 2	Caso Base + Aprobación extracción agua dulce CMZ	Salmuera: aprobadas por RCA al 2019 para los operadores de la cuenca SQM (2030), ALB (2042) Agua dulce: aprobadas por RCA al 2019 + aprobación CMZ (2031)	Recarga promedio estimada hasta el 2019	2070 - 25 años después del término de la última aprobación ambiental
Escenario 3	Caso Base + Aprobación extracción agua dulce CMZ + Adicional a la misma tasa de SQM (100 % -salmuera y agua dulce- x 10 años adicionales)	Salmuera: aprobadas por RCA al 2019 + extensión al 100% (1.700 l/s) de la tasa aprobada a SQM (2031-2040) Agua dulce: aprobados por RCA al 2019 + aprobación CMZ (2031) + extensión 100% de la tasa aprobada a SQM (2031-2040)	Recarga promedio estimada hasta el 2019	2070 - 25 años después del término de la última aprobación ambiental
Escenario 4	Caso Base + Aprobación extracción agua dulce CMZ + Modificación SQM del Plan de Desarrollo Sustentable 2020 (reducción gradual (*) al 50% al 2030)	Salmuera: aprobadas por RCA al 2019 + reducción gradual al 50% (822 l/s) de SQM (2021-2030) Agua dulce: aprobadas por RCA al 2019 + aprobación CMZ (2031) + reducción gradual al 50% SQM (2021-2030)	Recarga promedio estimada hasta el 2019	2070 - 25 años después del término de la última aprobación ambiental

Escenarios con RCA vigentes y situaciones adicionales hipotéticas de extracción y recarga		Extracciones (**)	Recarga	Horizonte de Modelación
Escenario 5	Caso Base + Aprobación extracción agua dulce CMZ + Extracción a tasa fija al 50% de la tasa SQM por 20 años (agua dulce y salmuera).	Salmuera: aprobadas por RCA al 2019 + extensión a tasa fija 822 l/s (SQM 2021-2030; SQM u otro operador 2031-2040) Agua dulce: aprobados por RCA al 2019 + aprobación CMZ (2031) + extensión a tasa fija 120 l/s (SQM 2021-2030; SQM u otro operador 2031-2040)	Recarga promedio estimada hasta el 2019	2070 - 25 años después del término de la última aprobación ambiental
Escenario 6	Caso Base + Aprobación extracción agua dulce CMZ + Modificación tasa extracciones SQM (con reducción gradual al 50% (*) en 10 años hasta 2030) y extracción a tasa fija x 10 años adicionales (2031-2040)	Salmuera: aprobados por RCA al 2019 + reducción gradual al 50% SQM (2021-2030) + tasa fija 822 l/s SQM u otro operador (2031-2040) Agua dulce: aprobados por RCA al 2019 + aprobación CMZ (2031) + reducción gradual al 50% SQM (2021-2030) + tasa fija 120 l/s SQM u otro operador (2031-2040)	Recarga promedio estimada hasta el 2019	2070 - 25 años después del término de la última aprobación ambiental
Escenario 7	Caso Base + Aprobación extracción agua dulce CMZ + Cambio Climático.	Salmuera: aprobados por RCA al 2019 para los operadores de la cuenca SQM (2030), ALB (2042) Agua dulce: aprobados por RCA al 2019 + aprobación CMZ (2031)	Disminución de 15% y 18% de la recarga por cambio climático	2070 - 25 años después del término de la última aprobación ambiental
Escenario 8	Caso Base + Aprobación extracción agua dulce CMZ + Adicional salmuera y agua dulce NX1 Peine	Salmuera: aprobados por RCA al 2019 + aprobación extracción NX1 Peine (2021 a 2040) Agua dulce: aprobados por RCA al 2019 + aprobación CMZ (2031) + agua industrial NX1 Peine (2021 a 2040)	Recarga promedio estimada hasta el 2019	2070 - 25 años después del término de la última aprobación ambiental

(\*) Se simula una reducción escalonada entre los años 2021-2030 hasta aproximadamente el 50% de la máxima extracción autorizada, es decir 822 l/s

(\*\*) Agua dulce es considerada equivalente a agua industrial.

**Tabla 2-1: Escenarios predictivos simulados con el modelo numérico de flujo 3D.**

Fuente: Elaboración propia

## 2.1 Parámetros hidráulicos

Para todos los escenarios de simulación, se han tomado los valores de los parámetros hidráulicos obtenidos de la calibración de los modelos transitorios presentados en el informe de Modelo Hidrogeológico, capítulo 5.1 (Amphos 21, 2021).

## 2.2 Condiciones de contorno

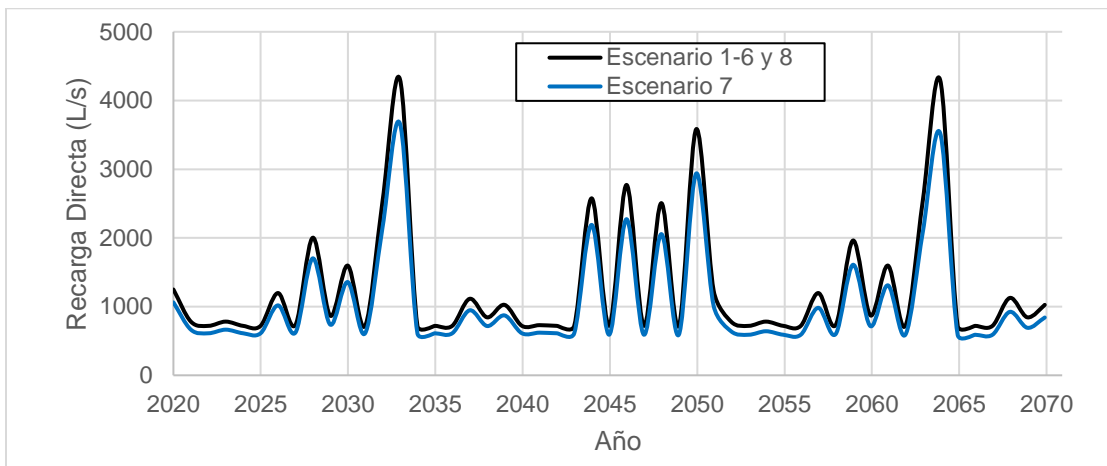
Con respecto a las series de recarga, tanto por precipitación como escorrentía, se han repetido las series definidas en el modelo tridimensional de flujo, tanto lateral como por precipitación, desde enero de 1989 hasta diciembre de 2019. Lo mismo se ha realizado para la evaporación y la evapotranspiración.

En el escenario 7 se ha considerado una disminución en la recarga a fin de representar los posibles efectos del cambio climático. Para determinar la magnitud esperable en la modificación de la recarga se utilizaron las simulaciones climáticas presentadas en la plataforma del *Center for Climate and Resilience Research* (CR)<sup>2</sup>. Dichas simulaciones climáticas mostraban una disminución de la precipitación para la zona del Salar de Atacama y además corresponde a una situación más desfavorable para la cuenca.

Se descargaron las isosuperficies de descenso porcentual en la precipitación respecto del periodo presente (1985 a 2005) desde el portal del (CR)<sup>2</sup> (<http://simulaciones.cr2.cl/>). Se usó el modelo RegCM4, que tiene la mejor resolución espacial. Este modelo presenta simulaciones para 2 periodos y 2 escenarios de emisiones de carbono. El primer periodo corresponde al futuro cercano (2020 a 2044) y segundo al futuro intermedio (2045 a 2069). Cada periodo cuenta con una simulación para el escenario de emisión de dióxido de carbono conservador (RCP85) y el escenario optimista (RCP26). De esta forma se dispusieron de 4 isosuperficies (2 periodos y 2 escenarios de emisiones) de descenso porcentual en la precipitación.

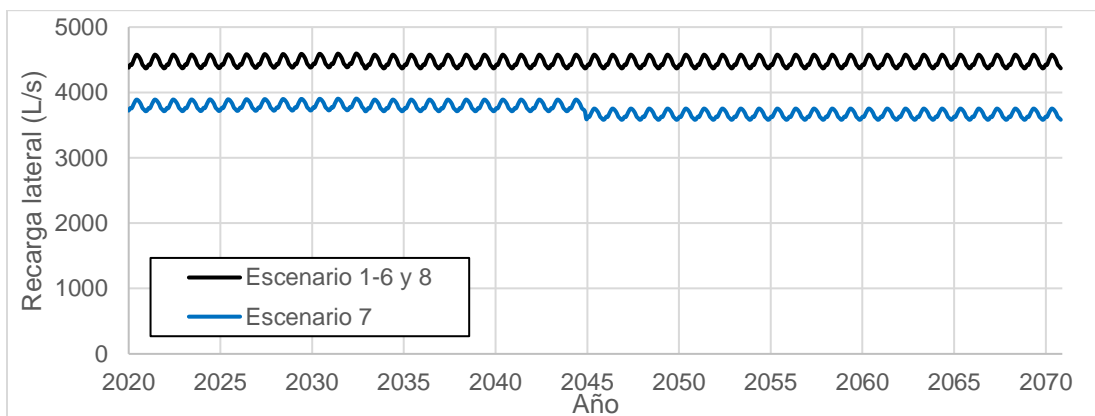
Se estimó el descenso medio de la precipitación en la cuenca del Salar de Atacama en cada isosuperficie. Luego, se promedió para cada periodo el descenso de los 2 escenarios de emisión de dióxido de carbono, encontrándose que el descenso porcentual medio en las precipitaciones para el periodo cercano es de 15 %, mientras que para el periodo intermedio es de 18 %. Finalmente, considerando que: 1) la estimación de la recarga tiene una componente lineal con la precipitación y 2) las proyecciones climáticas presentan una incertidumbre importante, se supuso que la recarga disminuye en los mismos porcentajes determinados para la reducción de la

precipitación. Por tanto, para el escenario 7 se han considerado las mismas series que en el resto de los escenarios de gestión aplicando un factor de reducción del 15% entre los años 2020 y 2044, y factor de reducción del 18% desde 2045 a 2070. La Figura 2-1 y la Figura 2-2 muestran las series de recarga por precipitación y por escorrentía definidas en los distintos escenarios predictivos. Cabe señalar que la utilización de otros modelos de cambio climático, con predicciones distintas sobre las precipitaciones a las entregadas por el CR<sup>2</sup>, entregarán resultados distintos de las simulaciones.



**Figura 2-1: Series de recarga por precipitación definidas en los escenarios de simulación.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 2-2: Series de recarga lateral por escorrentía definidas en los escenarios de simulación.**

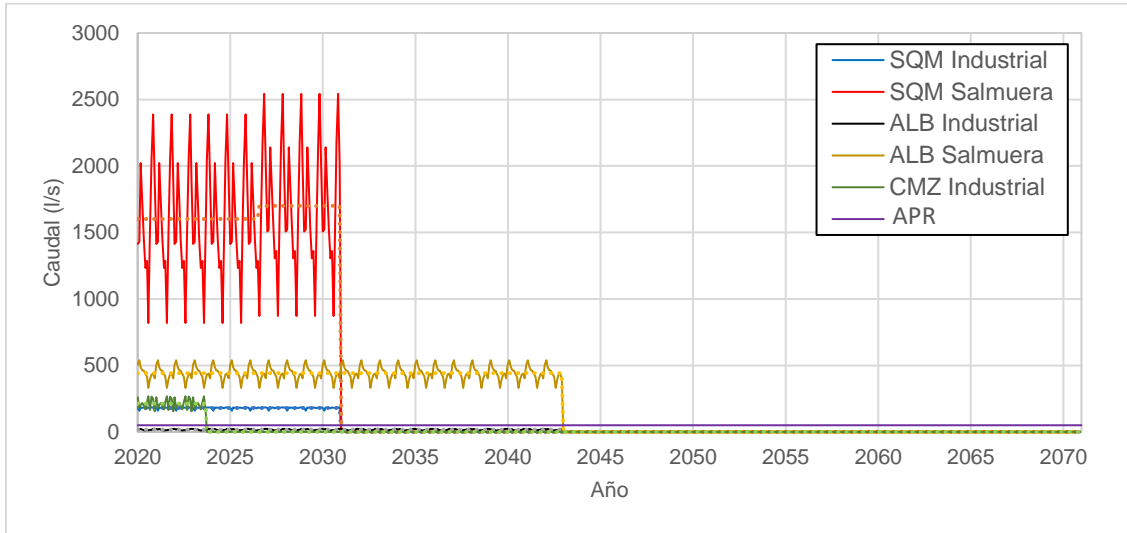
Fuente: Elaboración propia

Para cada uno de los escenarios predictivos se definieron los caudales netos de extracción de cada operador. Dichos caudales y la distribución de los mismos en los distintos pozos de cada operador se incluyen en la Tabla 2-2 (medias anuales) y se presentan en formato digital en el Anexo I -Apéndice A.

Según la serie histórica de caudales, los distintos operadores extraen un mayor volumen de agua en los meses de verano, y reducen su extracción en los meses de invierno. Para mostrar mayor realismo en los escenarios predictivos, se han considerado estas fluctuaciones estacionales para cada operador a partir de la serie de extracciones del año 2019 (es decir, la variación estacional de extracciones será igual a la del año 2019 para cada operador). De este modo, aunque las extracciones presenten variaciones estacionales, el promedio anual simulado es igual al caudal anual definido para cada escenario. En el caso de la extracción de salmuera de SQM, se ha considerado la extracción neta por sectores de acuerdo a la RCA 226/2006, donde un 60% corresponde al sector MOP y un 40% al SOP. De manera excepcional en el caso de las fluctuaciones del sector SOP, se consideró el año 2016 (último año calendario con extracción durante todos los meses).

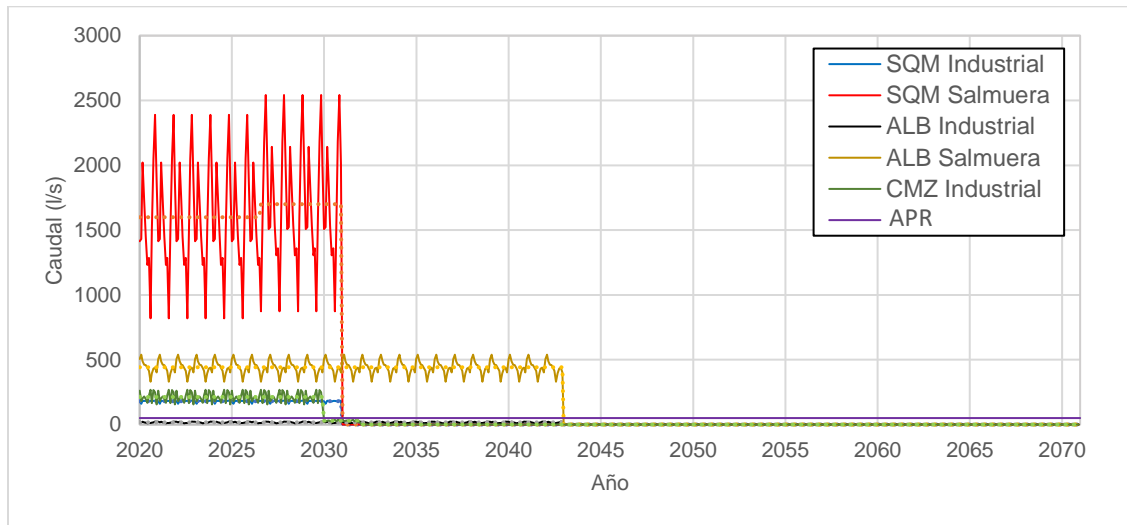
Respecto al caudal de explotación para el abastecimiento de agua potable rural (APR) se ha extendido la extracción establecida en el modelo transitorio para todo el periodo de simulación. Es decir, debido a la escala regional del modelo, se ha simplificado la extracción para el abastecimiento del APR representándola como un único pozo con un caudal constante de 50 l/s.

Los caudales de extracción neta para cada escenario se muestran desde la Figura 2-3 a la Figura 2-9 y además en la Tabla 2-2 se incluyen sus promedios anuales. Con línea continua en las figuras se presentan los caudales netos de extracción impuestos en los modelos (que incluyen la variación estacional simulada), mientras que con línea punteada se presentan los caudales medios anuales.



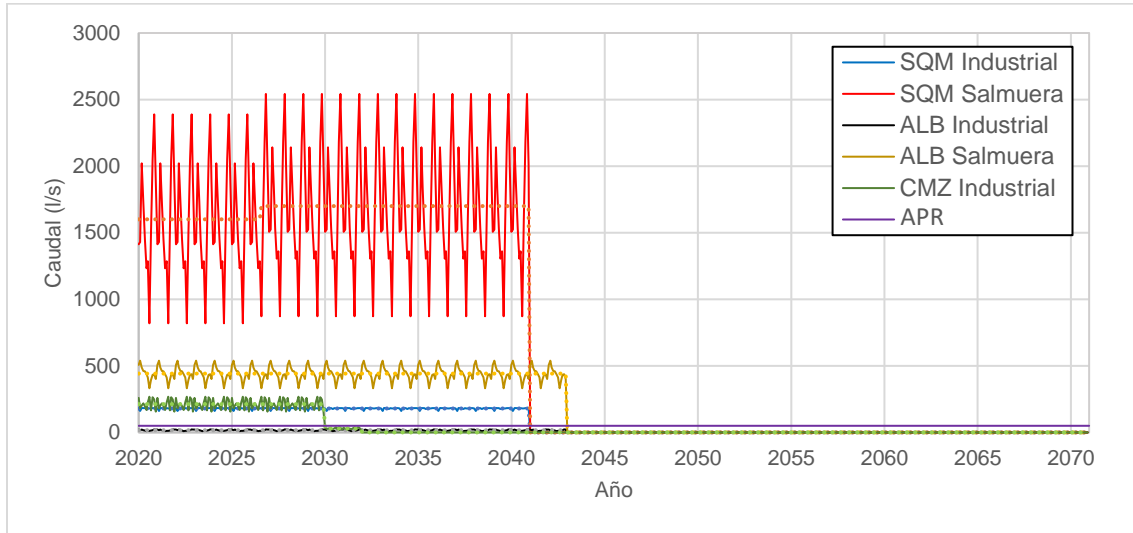
**Figura 2-3: Caudales de extracción neta para el escenario 1 y caudales incluidos en el modelo numérico para cada operador incluyendo las variaciones estacionales. Las líneas discontinuas muestran los caudales promedio anuales definidos para cada operador.**

Fuente: Elaboración propia



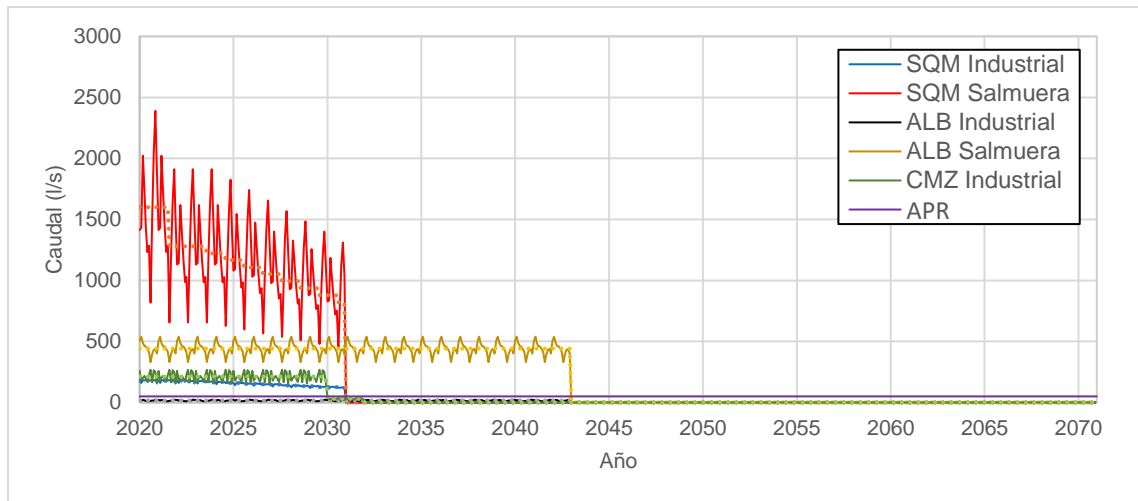
**Figura 2-4: Caudales de extracción neta para los escenarios 2 y 7, y caudales incluidos en el modelo numérico para cada operador incluyendo las variaciones estacionales. Las líneas discontinuas muestran los caudales promedio anuales definidos para cada operador.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 2-5: Caudales de extracción neta para el escenario 3 y caudales incluidos en el modelo numérico para cada operador incluyendo las variaciones estacionales. Las líneas discontinuas muestran los caudales promedio anuales definidos para cada operador.**

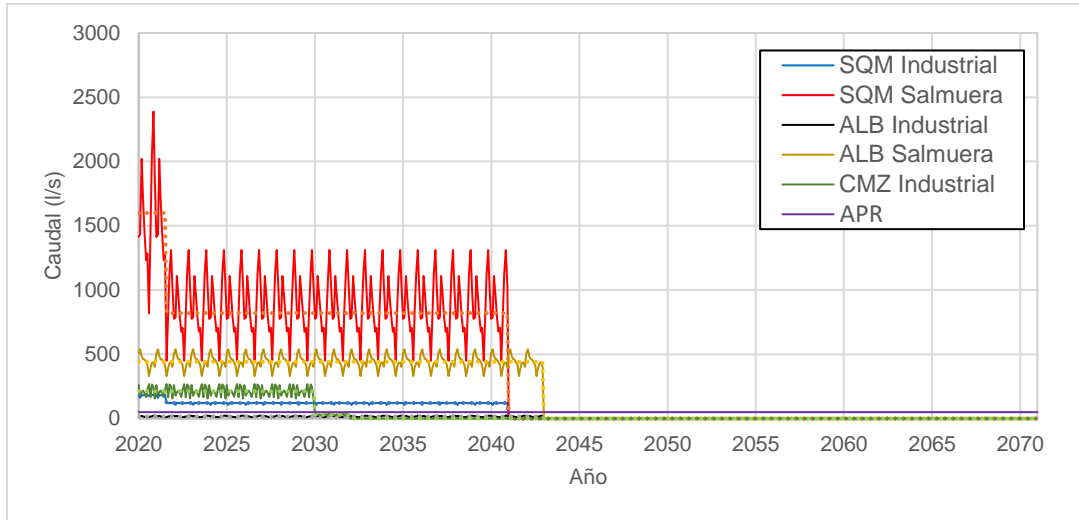
Fuente: Elaboración propia



**Figura 2-6: Caudales de extracción neta para el escenario 4 y caudales incluidos en el modelo numérico para cada operador incluyendo las variaciones estacionales. Las líneas discontinuas muestran los caudales promedio anuales definidos para cada operador.**

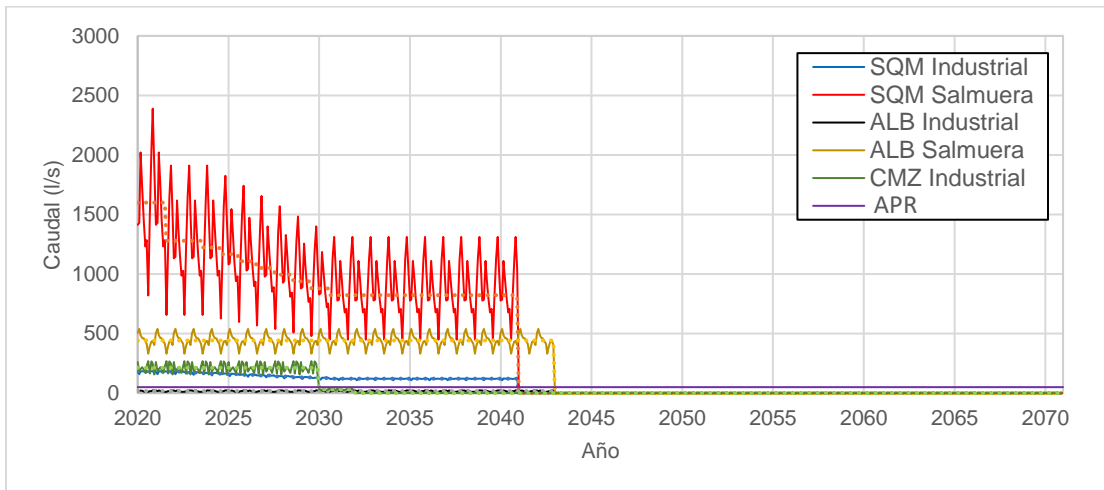
Fuente: Elaboración propia





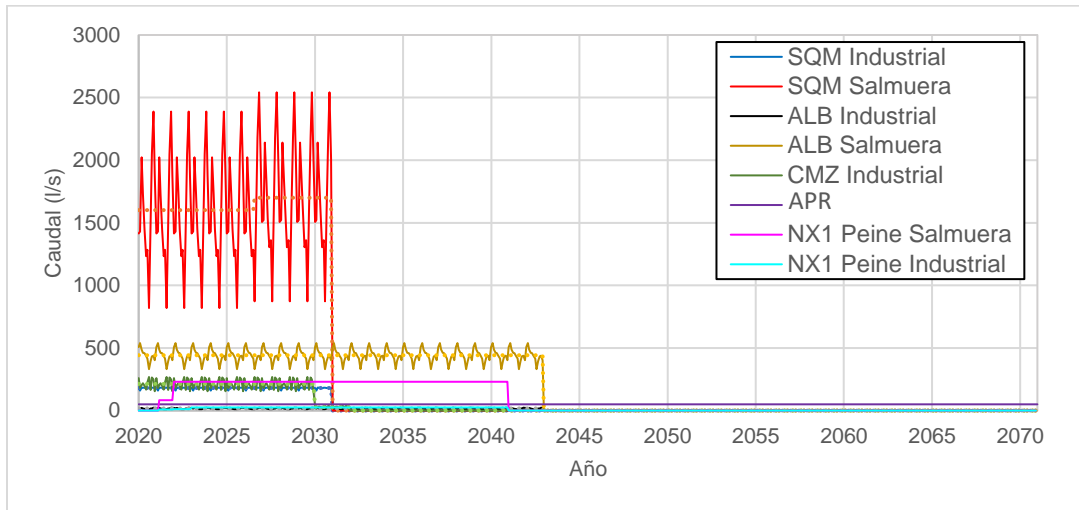
**Figura 2-7: Caudales de extracción neta para el escenario 5 y caudales incluidos en el modelo numérico para cada operador incluyendo las variaciones estacionales. Las líneas discontinuas muestran los caudales promedio anuales definidos para cada operador.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 2-8: Caudales de extracción neta para el escenario 6 y caudales incluidos en el modelo numérico para cada operador incluyendo las variaciones estacionales. Las líneas discontinuas muestran los caudales promedio anuales definidos para cada operador.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 2-9: Caudales de extracción neta para el escenario 8 y caudales incluidos en el modelo numérico para cada operador incluyendo las variaciones estacionales. Las líneas discontinuas muestran los caudales promedio anuales definidos para cada operador.**

Fuente: Elaboración propia.

Operador	Albemarle Salmuera (L/s)	Albemarle Industrial (L/s)	SQM (hasta 2030) y Operador de Litio (2031 a 2040) Salmuera (L/s)						SQM hasta 2030) y Operador de Litio (2031 a 2040) Industrial (L/s)						CMZ Industrial (L/s)		NX1 Peine Salmuera (L/s)		NX1 Peine Industrial (L/s)	
			1-8	1-8	1-2	3	4	5	6	7-8	1-2	3	4	5	6	7-8	1	2-8	1-7	8
2020	442	16,9	1600	1600	1600	1600	1600	1600	180	180	180	180	180	180	212,8	212,8	0	0	0	0
2021	442	16,9	1600	1600	1467	1276	1467	1600	180	180	180	155	180	180	212,8	212,8	0	69,2	0	6,7
2022	442	16,9	1600	1600	1280	822	1280	1600	180	180	177	120	177	180	212,8	212,8	0	230	0	12
2023	442	16,9	1600	1600	1256	822	1256	1600	180	180	171	120	171	180	159,6	212,8	0	230	0	25
2024	442	16,9	1600	1600	1199	822	1199	1600	180	180	164	120	164	180	0	212,8	0	230	0	25
2025	442	16,9	1600	1600	1142	822	1142	1600	180	180	157	120	157	180	0	212,8	0	230	0	25
2026	442	16,9	1642	1642	1084	822	1084	1642	180	180	151	120	151	180	0	212,8	0	230	0	25
2027	442	16,9	1700	1700	1027	822	1027	1700	180	180	144	120	144	180	0	212,8	0	230	0	25
2028	442	16,9	1700	1700	970	822	970	1700	180	180	137	120	137	180	0	212,8	0	230	0	25
2029	442	16,9	1700	1700	913	822	913	1700	180	180	131	120	131	180	0	212,8	0	230	0	25
2030	442	16,9	1700	1700	855	822	855	1700	180	180	124	120	124	180	0	30	0	230	0	25
2031	442	16,9	0	1700	0	822	822	0	0	180	0	120	120	0	0	30	0	230	0	25
2032	442	16,9	0	1700	0	822	822	0	0	180	0	120	120	0	0	0	0	230	0	25
2033	442	16,9	0	1700	0	822	822	0	0	180	0	120	120	0	0	0	0	230	0	25
2034	442	16,9	0	1700	0	822	822	0	0	180	0	120	120	0	0	0	0	230	0	25
2035	442	16,9	0	1700	0	822	822	0	0	180	0	120	120	0	0	0	0	230	0	25
2036	442	16,9	0	1700	0	822	822	0	0	180	0	120	120	0	0	0	0	230	0	25
2037	442	16,9	0	1700	0	822	822	0	0	180	0	120	120	0	0	0	0	230	0	25
2038	442	16,9	0	1700	0	822	822	0	0	180	0	120	120	0	0	0	0	230	0	25
2039	442	16,9	0	1700	0	822	822	0	0	180	0	120	120	0	0	0	0	230	0	25
2040	442	16,9	0	1700	0	822	822	0	0	180	0	120	120	0	0	0	0	230	0	25
2041	442	16,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2042	442	16,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 2-2: Caudales medios anuales (L/s) de cada operador en los 8 escenarios simulados.

Fuente: Elaboración propia

### 2.3 Discretización temporal y condición inicial

Tanto para el modelo tridimensional de flujo como para los perfiles SEAWAT se han simulado escenarios que abarcan un periodo desde enero del año 2020 a diciembre de 2070, con una discretización temporal mensual. En el caso de los modelos de flujo 2D con densidad variable, se utilizan pasos de tiempo máximos para el transporte de 1 día para evitar inestabilidades y fenómenos de dispersión numérica (Zheng y Simpson, 2004). La condición inicial de los modelos corresponde a la distribución de niveles (y concentraciones en el caso de los perfiles 2D) obtenidas al final de la simulación de los modelos transitorios calibrados y validados a diciembre de 2019 (tanto del modelo de flujo 3D, como de los perfiles 2D).

## 2.4 Consideraciones sobre los resultados del modelo 3D y 2D

El modelo 3D de flujo y las simulaciones de los escenarios realizadas con este, entregan niveles equivalentes de salmuera en todo el dominio, por lo tanto, la comparación con los resultados de las simulaciones realizadas con los modelos 2D, en los sectores de agua dulce o bien donde existe una mezcla entre salmuera y agua dulce, no es directa.

Para una mayor claridad respecto a los resultados del modelo 3D, a continuación, se presenta la metodología utilizada para la corrección de niveles de agua dulce a salmuera equivalentes, debido a las diferencias de densidad entre ambos. El detalle de esta metodología y de la construcción de cada uno de los modelos (3D y 2D), se pueden consultar en el Informe de Modelo Hidrogeológico de Amphos 21 (2021).

### 2.4.1 Corrección de niveles por densidad

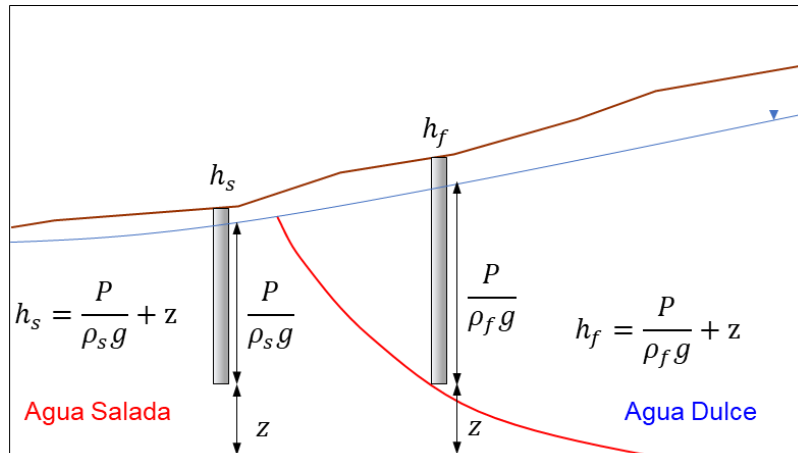
En el Salar de Atacama las aguas subterráneas presentan distintas densidades, abarcando desde densidades de salmuera ( $\rho = 1.23 \text{ g/cm}^3$ ) hasta densidades de agua dulce ( $\rho = 1.00 \text{ g/cm}^3$ ). Para poder comparar los niveles piezométricos, e integrar todos los puntos de observación existentes en un modelo numérico es necesario referir todos los potenciales a un único valor de densidad.

Para corregir los niveles en el Salar de Atacama, debido a la existencia de gran cantidad de puntos de observación en la zona del Núcleo donde la densidad del agua subterránea es mayor, se ha tomado como densidad de referencia la densidad de la salmuera.

En sistemas en los que la zona de mezcla no es muy significativa (escasos metros), el enfoque más utilizado para corregir los niveles es el propuesto por Ghyben (1888) y Herzberg (1901) que asume que el agua salada no se mueve y considera el flujo vertical despreciable (Figura 2-10). De este modo, al igualar las presiones, la expresión para el nivel equivalente de agua salada ( $h_s$ ) queda,

$$h_s = h_f \frac{\rho_f}{\rho_s} + \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s} z$$

Donde  $h_f$  es el nivel medido en la parte dulce,  $\rho_f$  y  $\rho_s$  son las densidades de agua dulce y agua salada, respectivamente, y  $z$  es el nivel de referencia. Sin embargo, la ecuación anterior sólo es válida cuando la interfaz entre el agua dulce y el agua salada es abrupta, es decir, muy estrecha, y no puede ser aplicada en sistemas en los que se observa una zona de mezcla importante entre los dos fluidos, como es el caso del Salar de Atacama.

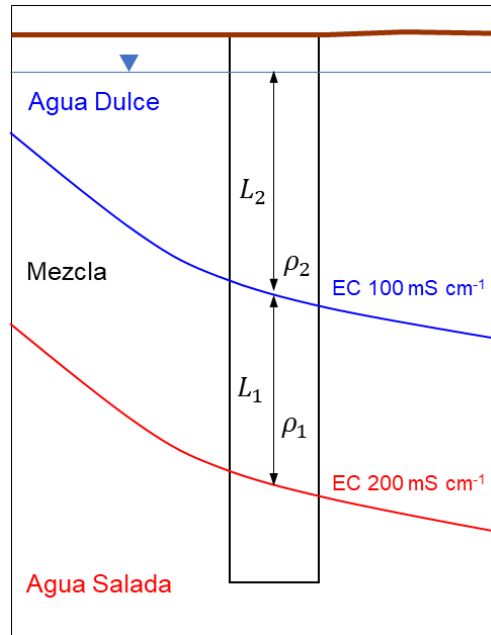


**Figura 2-10: Esquema de la corrección de nivel para sistemas con interfaz abrupta.**

Cuando el ancho de la zona de mezcla es importante, dicha zona de mezcla debe considerarse en la corrección por densidad de los niveles. En este caso, la expresión se obtiene igualando las presiones en la base de la zona de mezcla, considerando el espesor y densidad promedio de la misma. La expresión queda (Luszczynski, 1961 y Marazuela et al., 2018):

$$h_s = h_f + L_1 \frac{\rho_1 - \rho_s}{\rho_s} + L_2 \frac{\rho_2 - \rho_s}{\rho_s}$$

Donde  $L$  y  $\rho$  representa el espesor y la densidad de la zona de mezcla (1) y el agua dulce (2), respectivamente, ver Figura 2-11.

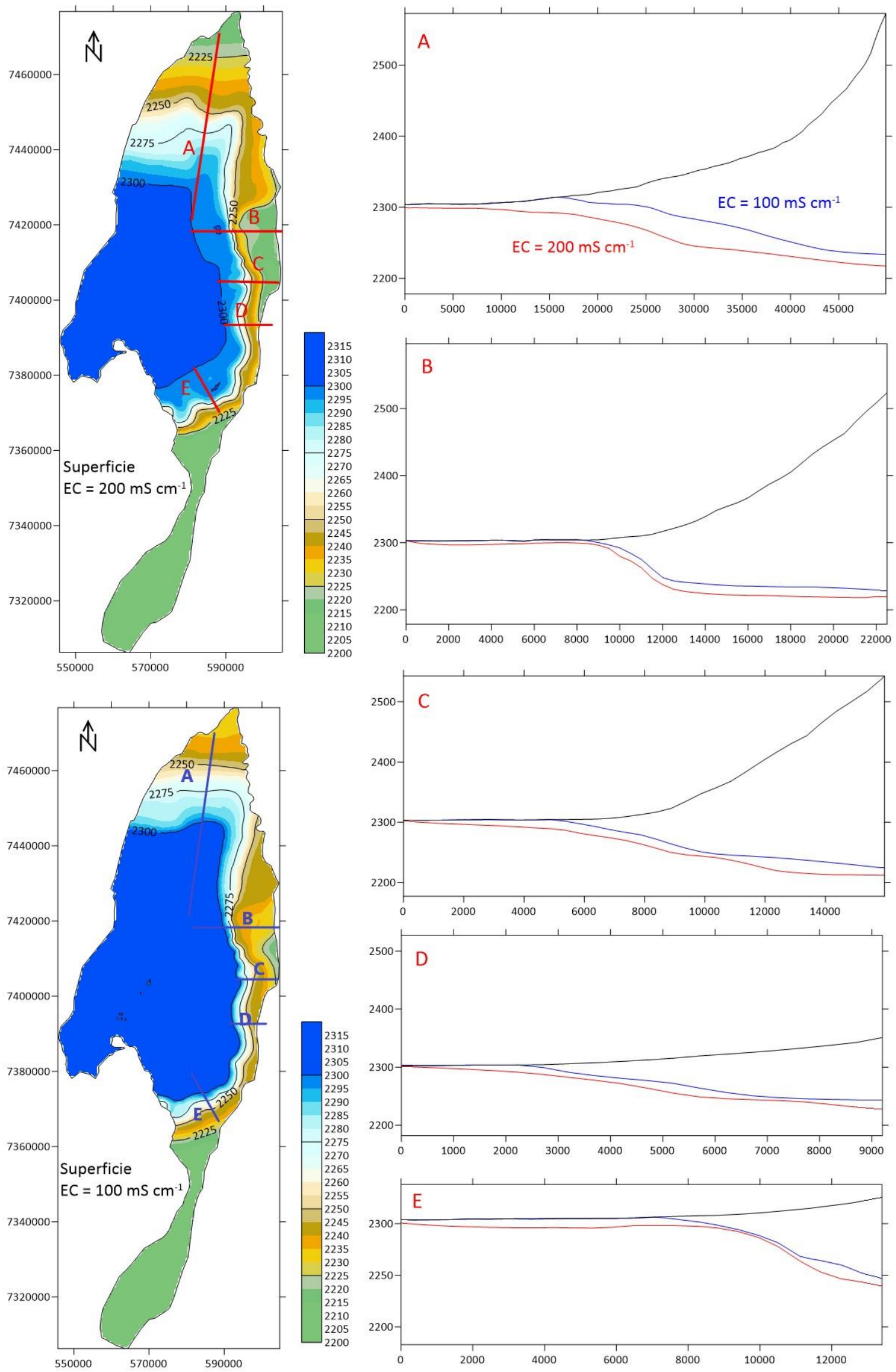


**Figura 2-11. Esquema de la corrección de nivel para sistemas con zona de mezcla (modificado de Marazuela et al., 2018).**

En este caso, el ancho de la zona de mezcla se definió a partir de la conductividad eléctrica (EC) de 200 y 100  $mS\ cm^{-1}$  medida en los puntos de observación. De este modo, para poder aplicar la corrección de densidad a los puntos de observación, se aplicó el siguiente procedimiento:

- Definir en todo el dominio la cota de las superficies de la conductividad eléctrica de 200 y 100  $mS\ cm^{-1}$ .
- Interpolar para cada punto de observación la cota de dichas superficies.
- Definir en cada punto, conociendo la profundidad del mismo,  $L_1$  y  $L_2$ .

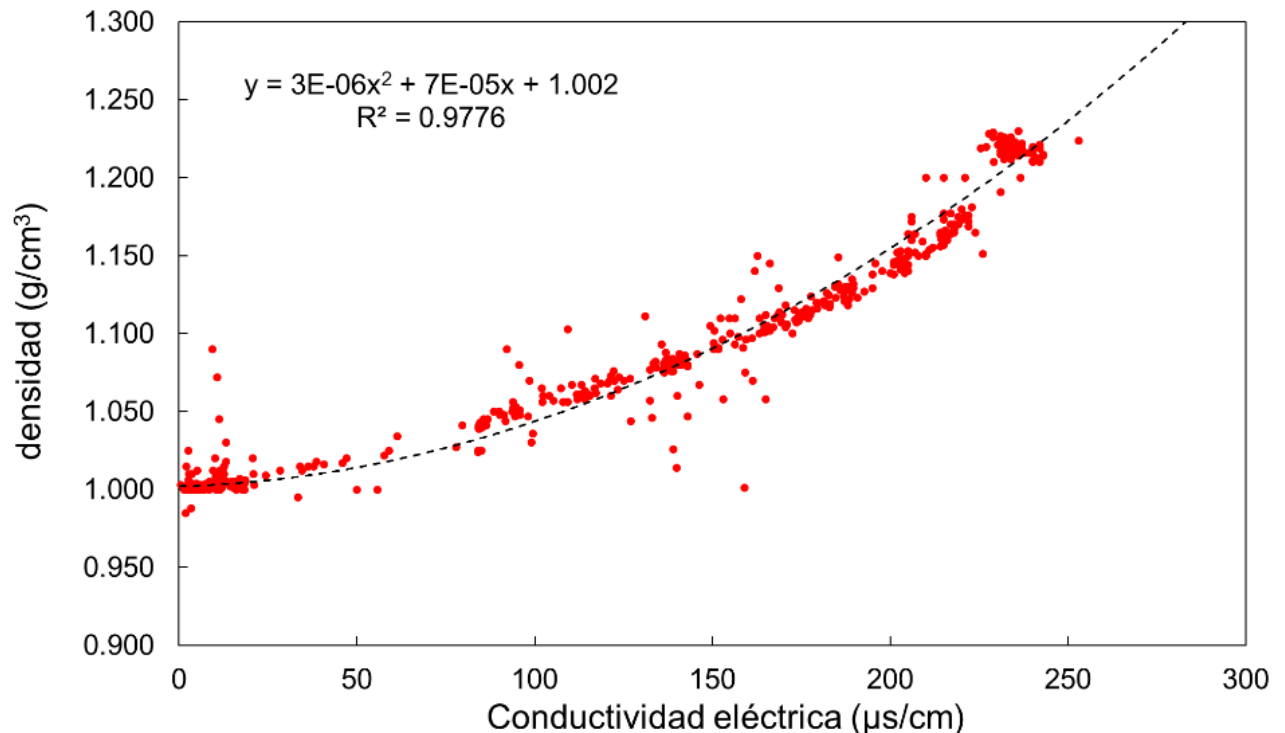
Las superficies de EC de 200 y 100  $mS\ cm^{-1}$  se definieron a partir de Marazuela et al., 2018, obteniendo como resultado la distribución tridimensional de la zona de mezcla, ver Figura 2-12.



**Figura 2-12. Distribución de la profundidad de las isosuperficies de EC de 200 y 100 mS cm<sup>-1</sup>, y cortes verticales mostrando el espesor de la zona de mezcla (modificado de Marazuela et al., 2018).**



Para el cálculo de la densidad promedio para cada tramo, se tuvo en cuenta la relación entre la conductividad eléctrica y la densidad del agua. Esta relación se calculó a partir de los datos de conductividad eléctrica y de densidad de agua medida en el terreno (Informe de Modelo Hidrogeológico, Anexo I Terreno) en un total de 845 puntos de observación, ver Figura 2-13.



**Figura 2-13. Relación entre conductividad eléctrica y densidad medida en campo. Se muestra la ecuación de correlación, así como el error cuadrático.**

Por otro lado, a la hora de cuantificar descensos en el modelo numérico, se debe tener en cuenta dicha corrección. De este modo, los descensos calculados por el modelo numérico no representan descensos 'reales' sino descensos de niveles equivalentes de salmuera. Para evaluar

Al corregir los niveles a niveles equivalentes de salmuera, los descensos observados en las simulaciones del modelo numérico no son directamente extrapolables a descensos reales, debido a la corrección por densidad. Así, si se compara el descenso observado en niveles equivalente de salmuera con descenso en niveles reales, este último sería ligeramente

superior de modo que  $d = \alpha d_c$ , donde  $d$  representa el descenso de niveles reales,  $d_c$  representa el descenso en niveles equivalentes de salmuera (descenso con corrección) y  $\alpha$  representa un factor en función de la ubicación del punto de observación que varía desde 1 si el pozo se encuentra en la zona de salmuera, a 1,23 si se encuentra en la zona de agua dulce.

### 3 Resultados de los escenarios predictivos en el Modelo 3D de Flujo.

El análisis del efecto que producen las extracciones futuras (aprobadas ambientalmente e hipotéticas) en los distintos escenarios simulados en el modelo tridimensional de flujo, ha sido realizado de acuerdo a: (i) análisis de la serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control del plan de seguimiento ambiental hidrogeológico (PSAH) y en cuatro puntos de observación (dos de ellos ficticios) en la zona de Monturaqui, (ii) cuantificación del balance hídrico global y el balance según los Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC, definidos por DGA), que se presentan en la Figura 3-1 para cada década del periodo 2020-2070, (iii) cuantificación del descenso respecto al nivel del último paso de tiempo del modelo transitorio (diciembre de 2019) en toda la cuenca y en distintos tiempos de la simulación, y (iv) cuantificación del efecto en los niveles en los puntos definidos como condición de contorno de nivel prescrito en los perfiles SEAWAT, para el posterior análisis de los escenarios definidos para la modelación 2D con densidad variable.

El dominio del modelo numérico no abarca la extensión de todos los SHACs y sólo los SHACs A, B, C y N están integrados en su totalidad. Debido a esto, el balance integrado por SHAC se presenta en estos sectores, y el resto de dominio se ha definido como SHAC F (correspondiente parcialmente a los SHACs A1, A2, B1, C1, C2 y N1). Cabe destacar que el ejercicio de disgregar el balance en los distintos SHACs puede entenderse como una aproximación a un balance por fluido. Es decir, el balance en el SHAC N puede entenderse como un balance en el dominio de salmuera (principalmente el núcleo del Salar), el balance en los SHACs A, B y C, donde se localiza la interfaz, como un balance en la zona de mezcla, y el balance en el SHAC F como un balance en la parte del acuífero dominada por agua dulce. Al separar el balance de esta forma, surgen términos de balance que representan la interacción entre los distintos SHACs, que se representan en términos de recarga y descarga de otros SHACs.

Los puntos de control elegidos se han definido en función de las áreas de mayor interés medioambiental. Así, los puntos de control según el área son:

- Área La Punta-La Brava: Puntos de control PN-10, L12-1 y PC-1200.
- Área Peine: Puntos de control 2037, 1028 y Cuña 6.
- Área Quelana: Puntos de control SOPM-05, SOPM-08 y Camar 2.

- Área Soncor: Puntos de control L2-3, L2-14, L2-20, Cuña 2 y Allana.
- Área Norte: Puntos de control C4-B y RM-08
- Área Monturaqui: Puntos de control M-23, NEP-2, ZZ1-MNT y ZZ2-MNT.

A continuación, se detallan los resultados para cada escenario predictivo en el modelo tridimensional de flujo.

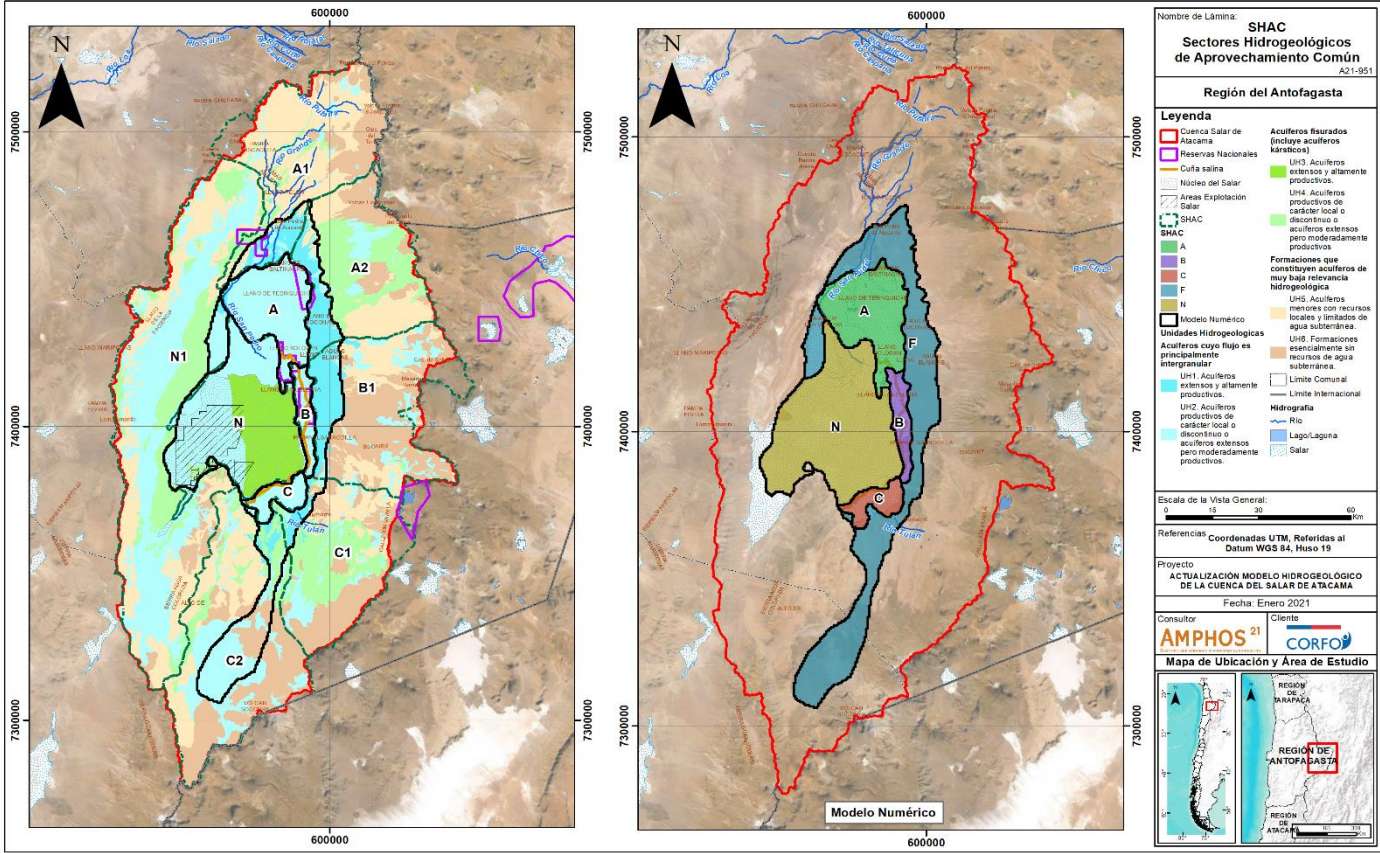


Figura 3-1: Sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común (SHAC) y los SHAC que se analizan en el balance del modelo numérico.

Fuente: Elaboración propia

### 3.1 Escenarios con RCA vigente

#### 3.1.1 Escenario 1

El escenario 1, denominado Caso Base, incluye las extracciones de salmuera y agua dulce/industrial aprobadas según las RCA vigentes al año 2019 (detalle extracciones por año en la Tabla 2-2) y que en términos generales corresponden a:

- 1) Las extracciones de salmuera y agua industrial de SQM hasta el año 2030.
- 2) Las extracciones de salmuera y agua industrial de Albemarle hasta el 2042.
- 3) La extracción de agua industrial de CMZ hasta el 2023.
- 4) Las extracciones de agua dulce en el sector norte por los APR.

Adicionalmente, para este y todos los demás escenarios, se considera el cese de la extracción de MEL.

Para cuantificar el efecto de las extracciones en este escenario predictivo, se han determinado los descensos máximos desde el inicio de la simulación en los puntos de control definidos, se ha calculado el balance hídrico y el descenso areal para distintas épocas de la simulación. A continuación, se muestran estos resultados.

La Tabla 3-1 muestra los descensos máximos calculados en los puntos de control en las diversas áreas de interés para el escenario 1, y los niveles observados para cada punto de control se muestra en la Figura 3-2 y la Figura 3-3.

Como se observa el descenso máximo en el área La Punta-La Brava se da en el punto de observación PN-10, con un descenso máximo de 0,6 m. Dicho descenso disminuye hacia el sur en el punto de observación L12-1 hasta un valor de 0,3 m y es casi nulo en el punto de observación PC-1200, cuyo nivel permanece prácticamente constante durante todo el período de simulación, mostrando únicamente las variaciones estacionales de verano - invierno de la evaporación.

En el área Peine, el mayor descenso se recoge en el punto de observación más cercano al núcleo (2037) con un valor de prácticamente de 0,4 m y disminuye a 0,2 m en el punto de observación 1028. El nivel en el punto de observación Cuña 6 permanece prácticamente constante durante todo el periodo de simulación.

En el área de Quelana el mayor descenso se observa en el punto más cercano al núcleo (SOPM-05) con un valor de 0,5 m, disminuyendo a 0,2 m en el punto de observación SOPM-08. En el punto de observación de Camar-2 se produce una recuperación producto del cese del bombeo del pozo Camar-2 en febrero 2018.

En el área de Soncor los mayores descensos se producen en puntos de observación hacia el núcleo (L2-14) y más distales (Allana) con valores en torno a 0,3 m, debido a la extracción de salmuera y agua industrial de SQM. Mientras que en el área Norte, los niveles se mantienen prácticamente constantes (RM-8 y C4-B), salvo por las oscilaciones naturales.

En Monturaqui no se observa descenso en la parte más alta de la cuenca, y los niveles se comienzan a recuperar desde el inicio del escenario, debido al cese de las extracciones de MEL, sin embargo, al final de la simulación no se alcanzan los niveles previos a la extracción. En la zona de Callejón se observa un descenso máximo de 0,8 m (NEP-2) y de 0,4 m (ZZ1-MNT) al sur de Tilopozo, debido a las extracciones de CMZ.

Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)
La Punta-La Brava	
PN-10	0,60
L12-1	0,31
PC-1200	0,06
Peine	
2037	0,37
1028	0,19
Cuña6	0,01
Quelana	
SOPM-05	0,51
SOPM-08	0,21
Camar2	0,03
Soncor	
L2-14	0,27
L2-20	0,20
Cuña 2	0,07
L2-3	0,23
Allana	0,29
Zona Norte	
C4-B	0,14
RM-8	0,01
Monturaqui	
M-23	0,02
NEP-2	0,77
ZZ1-MNT	0,39
ZZ2-MNT	0,04

Tabla 3-1: Descensos máximos en los puntos de control por áreas de interés para el escenario 1.

Fuente: Elaboración propia



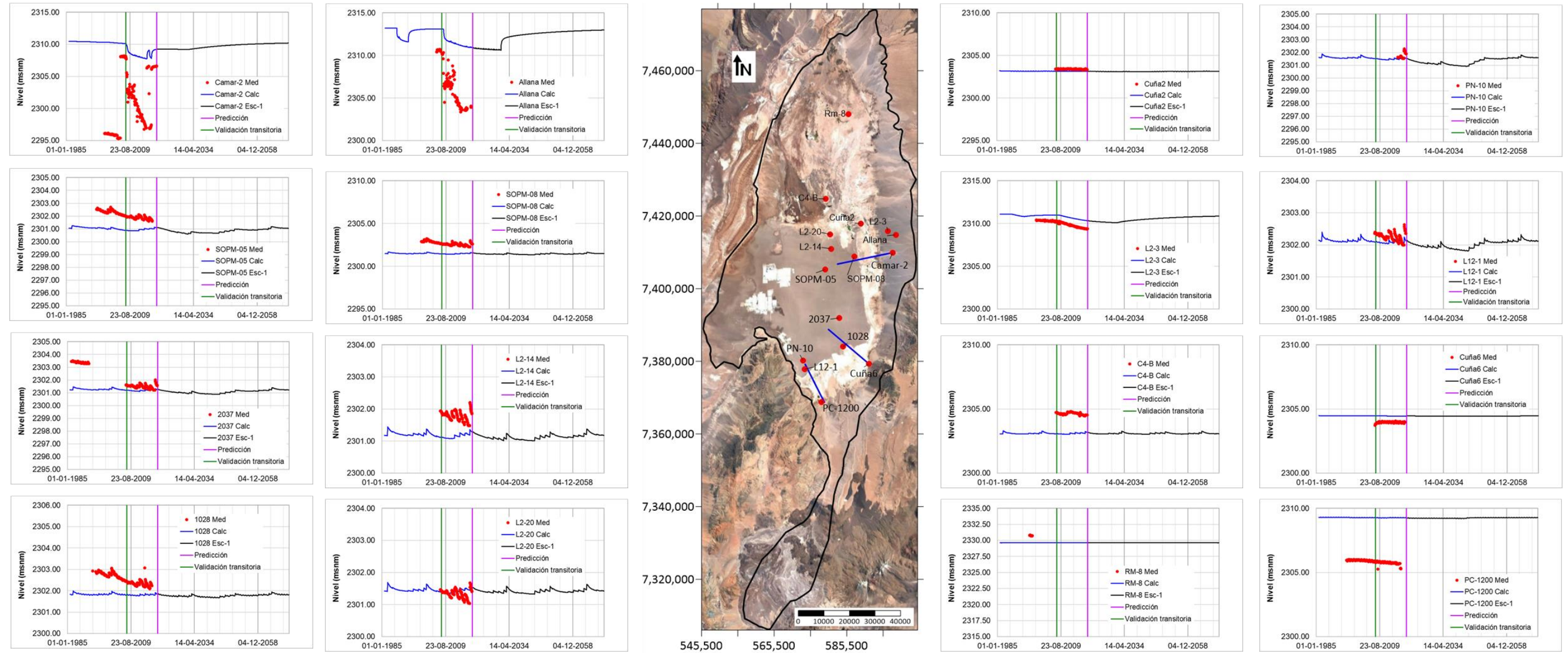
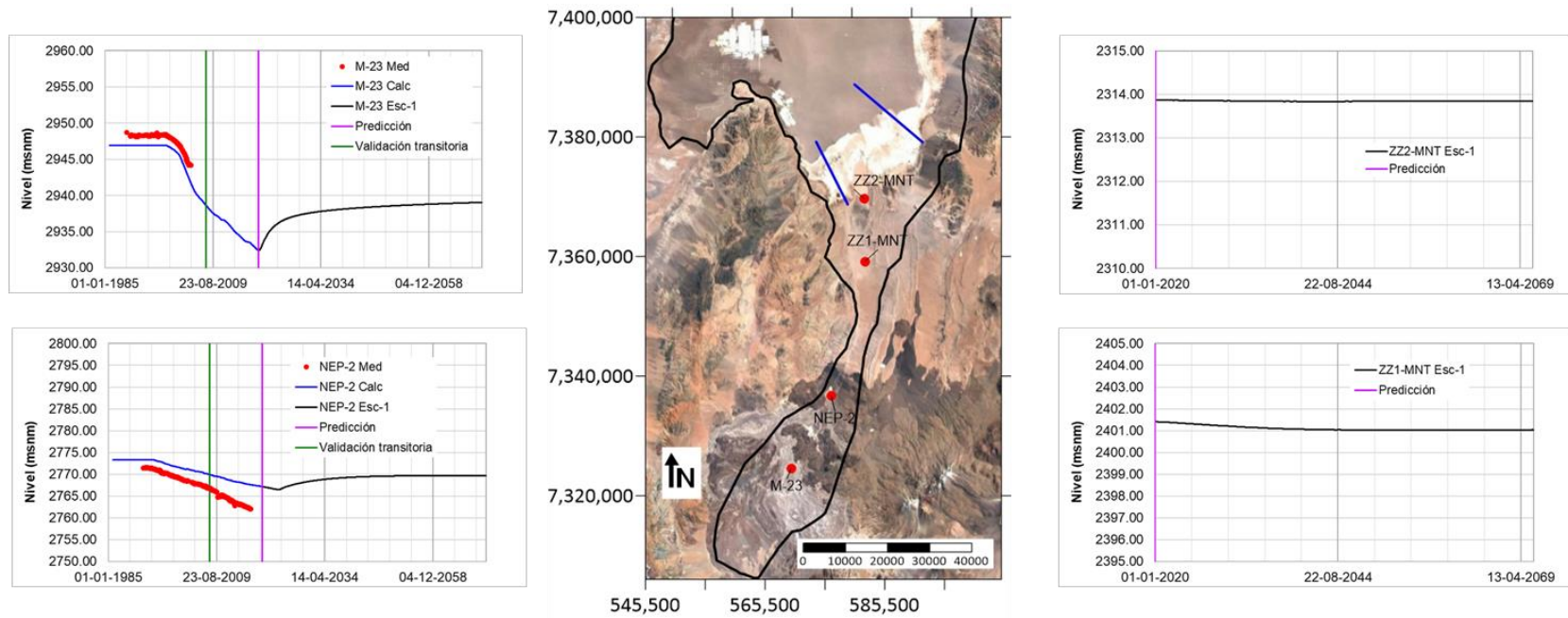


Figura 3-2: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control (PSHA) para el escenario 1.

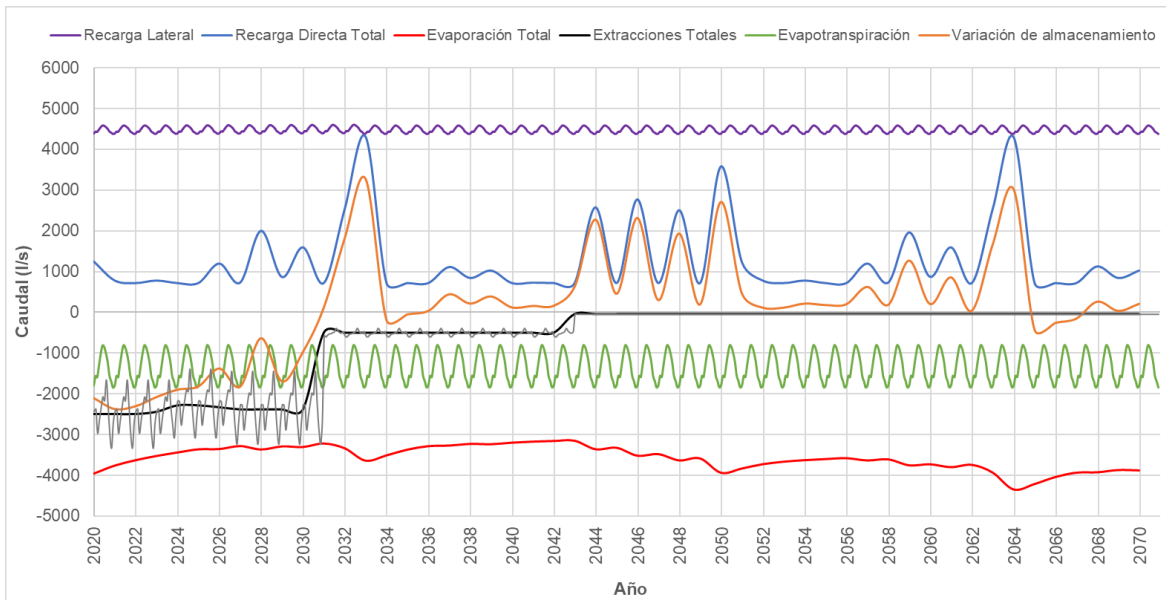
Fuente: Elaboración propia



**Figura 3-3: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control para el escenario 1 en la zona de Monturaqui.**

Fuente: Elaboración propia

El balance hídrico global calculado a partir del escenario 1, que incorpora las principales entradas y salidas del sistema, se muestra en la Figura 3-4 y el promedio por décadas para cada SHAC se muestra en la Tabla 3-2.



**Figura 3-4: Resumen del balance hídrico obtenido a partir del escenario 1 mostrando las principales entradas y salidas al sistema.**

*Fuente: Elaboración propia*

Como se observa, a partir del año 2030 las extracciones descienden considerablemente, lo que conlleva una recuperación y aumento de los niveles piezométricos en la cuenca, que se traduce en un aumento de la evaporación.

A partir de los valores promedios del balance hídrico se observa que en la primera década simulada (2020-2029) la variación de almacenamiento aumenta con respecto a lo obtenido para los últimos años (2015-2019) en el modelo transitorio, pero continúa siendo negativa con un valor de -1.809 L/s en el global, siendo de -1.628 L/s en el SHAC N (salmuera) y de -147 L/s en el SHAC F (agua dulce).

A partir de la década 2030-2039, debido al cese de la extracción de SQM, la variación del almacenamiento pasa a ser positiva y aumenta hasta alcanzar un valor de 854 L/s en la década 2040-2049, siendo 773 L/s en el N (salmuera) y 64 L/s en el F (agua dulce). Sin embargo, a partir de 2050, debido al aumento de la evaporación principalmente en el

núcleo, la variación del almacenamiento se mantiene positiva pero disminuye a 496 L/s en el periodo 2060-2070, siendo 452 L/s en el N (salmuera) y 37 L/s en el F (agua dulce).

La variación de almacenamiento total del periodo 2020-2070 es de 138 L/s, siendo de 121 L/s en el N (salmuera) y de 17 L/s en el F (agua dulce).

Para cuantificar el efecto de la extracción futura en la cuenca, se ha calculado el descenso con respecto a la situación inicial de diciembre de 2019 para tres períodos de la simulación: diciembre de 2030 (momento en que cesan las extracciones de SQM), diciembre de 2042 (momento en el que cesan las extracciones de Albemarle), y diciembre de 2070 (final de la simulación). La Figura 3-5 muestra la distribución del descenso producido para estas tres fechas. Los valores positivos indican descenso, mientras que los valores negativos indican un aumento de los niveles, es decir, una recuperación del acuífero.

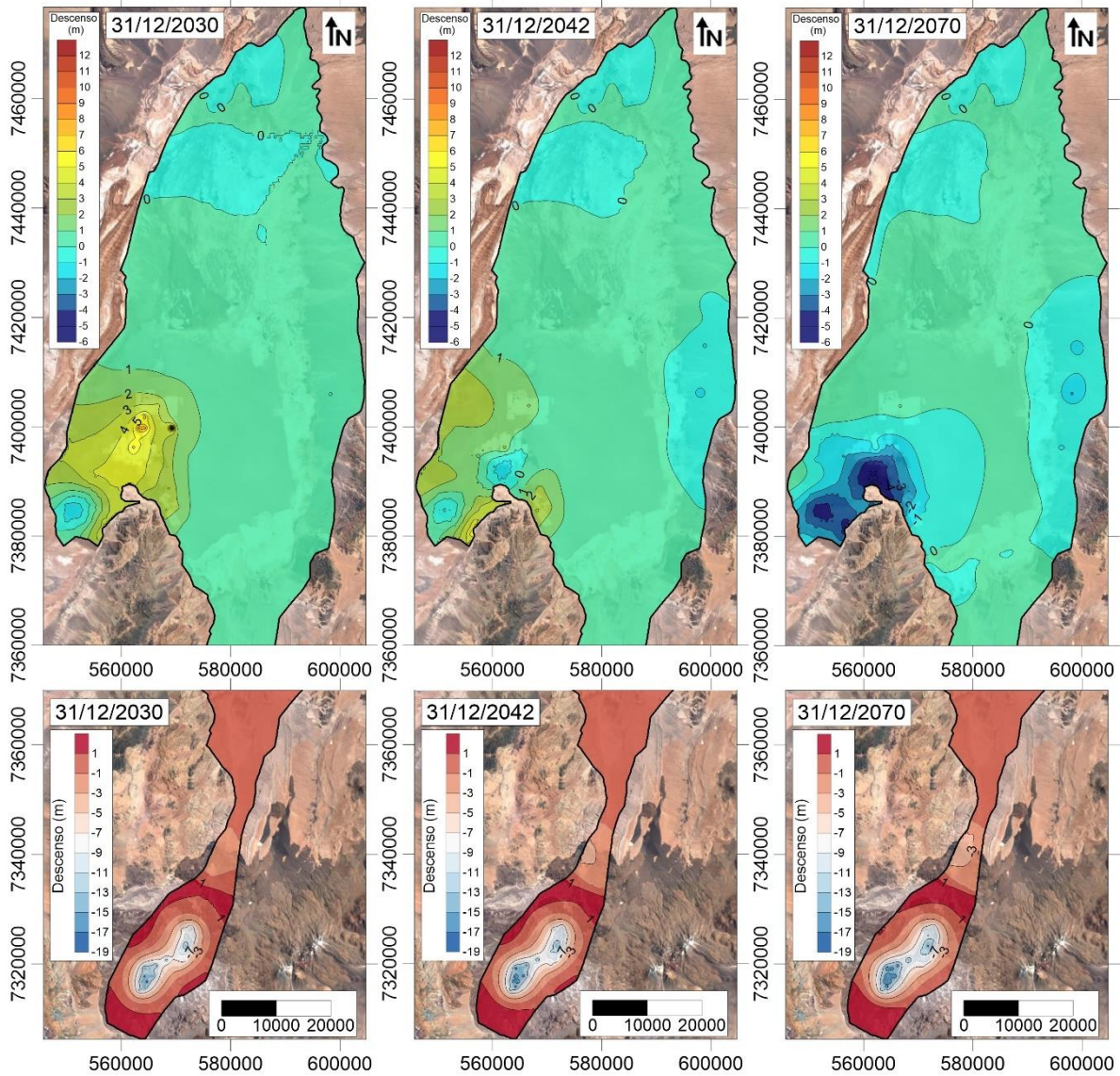
Como se observa en la Figura 3-5, el mayor descenso en el año 2030 se da en la parte oeste del Salar, debido a la extracción de SQM, con descensos de aproximadamente 6-7 m, mientras que en la zona de Monturaqui, debido al cese de extracción de MEL y CMZ, los ascensos para el 2030 son de hasta 17 m. Para el año 2042 se aprecia una recuperación de los niveles en el núcleo producto del cese del bombeo de SQM, pero continúan aumentando los descensos en la zona de extracción de Albemarle hasta los 5 m. Por otra parte, en el año 2070, se aprecia la recuperación de los niveles en la zona del Núcleo y Borde Este, producto del cese de las extracciones de salmuera y agua industrial. Los mayores ascensos se localizan en la zona de Monturaqui con valores de hasta 18 m desde diciembre de 2019.

Término del balance	2020-2029					2030-2039					2040-2049					2050-2059					2060-2070					2020-2070				
	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F
<b>Entradas</b>																														
Recarga Directa	51	17	14	253	642	63	18	14	693	643	59	18	14	558	643	58	18	14	511	643	61	18	14	645	643	58	18	14	534	643
Recarga Lateral	34	0	2	127	4309	34	0	2	127	4309	34	0	2	122	4309	34	0	2	122	4309	34	0	2	122	4309	34	0	2	124	4309
Recarga de otros SHACs	1773	574	1578	1482	0	1768	598	1575	1491	0	1770	635	1572	1509	0	1772	651	1572	1475	0	1774	661	1573	1450	0	1772	624	1574	1481	0
<b>Salidas</b>																														
Evaporación	746	311	1026	1414	1	745	307	1009	1281	1	737	329	1010	1284	1	743	356	1045	1552	1	750	374	1056	1765	1	744	336	1030	1465	1
EVT	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788
Extracciones	0	0	17	2077	310	0	0	17	611	68	0	0	5	132	50	0	0	0	0	50	0	0	0	0	50	0	0	8	553	105
Descarga a otros SHACs	696	219	491	0	4001	693	225	502	0	4013	695	238	503	0	4050	693	233	476	0	4068	687	226	466	0	4077	693	228	487	0	4043
<b>Resumen</b>																														
<b>Entradas totales</b>	1858	591	1593	1863	4952	1865	616	1590	2311	4953	1863	652	1587	2189	4952	1864	668	1587	2108	4952	1869	678	1588	2217	4952	1864	642	1589	2139	4952
<b>Salidas totales</b>	1872	605	1598	3491	5099	1868	605	1591	1892	4870	1862	640	1583	1416	4889	1865	663	1586	1552	4907	1868	674	1587	1765	4916	1867	638	1589	2018	4936
<b>Variación de Almacenamiento</b>	-14	-14	-5	-1628	-147	-3	11	-2	419	82	1	12	4	773	64	-1	6	2	556	45	2	5	1	452	37	-3	4	0	121	17

Tabla 3-2: Resultado del balance hídrico promedio por periodo (L/s) para el escenario 1.

Fuente: Elaboración propia

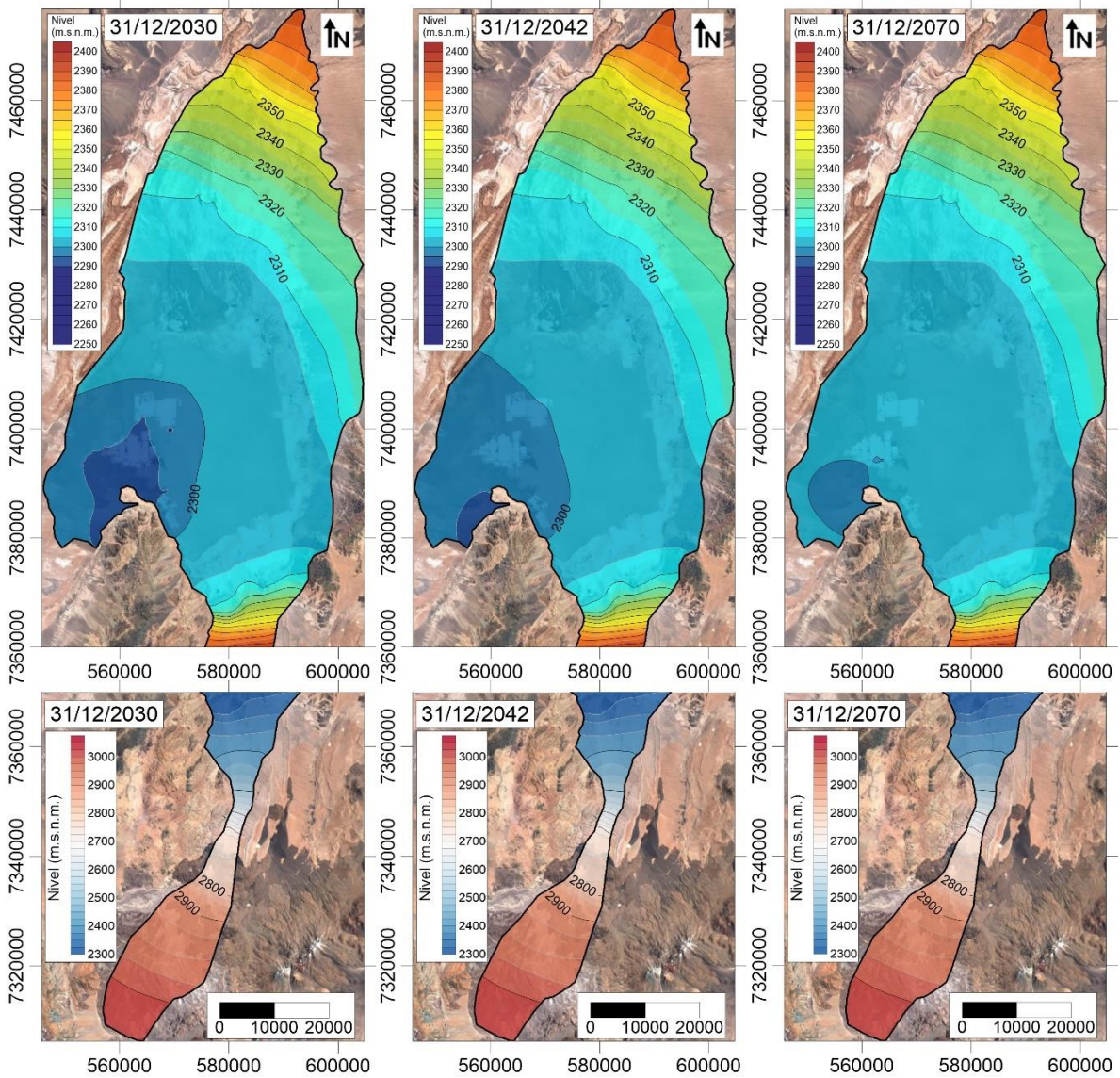
Nota: SHACs A, B y C corresponden a zona de mezcla, SHAC N corresponde a salmuera y SHAC F corresponde a agua dulce.



**Figura 3-5: Descenso a partir de inicio de simulación para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 1.**

Fuente: Elaboración propia

La Figura 3-6 muestra la piezometría calculada para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070.



**Figura 3-6: Piezometría para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 1.**

Fuente: Elaboración propia

## 3.2 Escenarios con RCA vigentes y situaciones adicionales hipotéticas de extracción y recarga

### 3.2.1 Escenario 2

El escenario 2 corresponde al Caso Base (extracciones de salmuera y agua dulce/industrial aprobadas según las RCA vigentes al año 2019) más la siguiente situación hipotética (detalle de las extracciones por año en la Tabla 2-2):

- 1) Extensión de la extracción de agua industrial de CMZ hasta 2031.

La Tabla 3-3 muestra los descensos máximos calculados en los puntos de control en las diversas áreas de interés para el escenario 2, y los niveles observados para cada punto de control se muestra en la Figura 3-7 y la Figura 3-8.

Exceptuando la zona de Monturaqui, los descensos observados son exactamente iguales que los obtenidos en el escenario 1. Es decir, la continuación de extracción de CMZ no afecta a otras áreas.

En Monturaqui, en la parte más alta de la cuenca no se observan cambios con respecto al escenario 1, por lo que las extracciones de CMZ no afectan la zona alta. A partir del año 2030 los niveles comienzan a recuperarse en Callejón, pero al final de la simulación no se han alcanzado los niveles previos a la extracción. En la zona de Callejón se observan descensos de 1,8 m (NEP-2), mientras que al sur de Tilopozo (ZZ1-MNT) el descenso máximo es de 0,5 m, y tan sólo de 5 cm en el punto de observación ZZ2-MNT.



Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)
La Punta-La Brava	
PN-10	0,60
L12-1	0,31
PC-1200	0,07
Peine	
2037	0,37
1028	0,19
Cuña6	0,01
Quelana	
SOPM-05	0,51
SOPM-08	0,21
Camar2	0,03
Soncor	
L2-14	0,27
L2-20	0,20
Cuña 2	0,07
L2-3	0,23
Allana	0,29
Zona Norte	
C4-B	0,14
RM-8	0,01
Monturaqui	
M-23	0,02
NEP-2	1,80
ZZ1-MNT	0,54
ZZ2-MNT	0,04

Tabla 3-3: Descensos máximos en los puntos de control por áreas de interés para el escenario 2.

Fuente: Elaboración propia

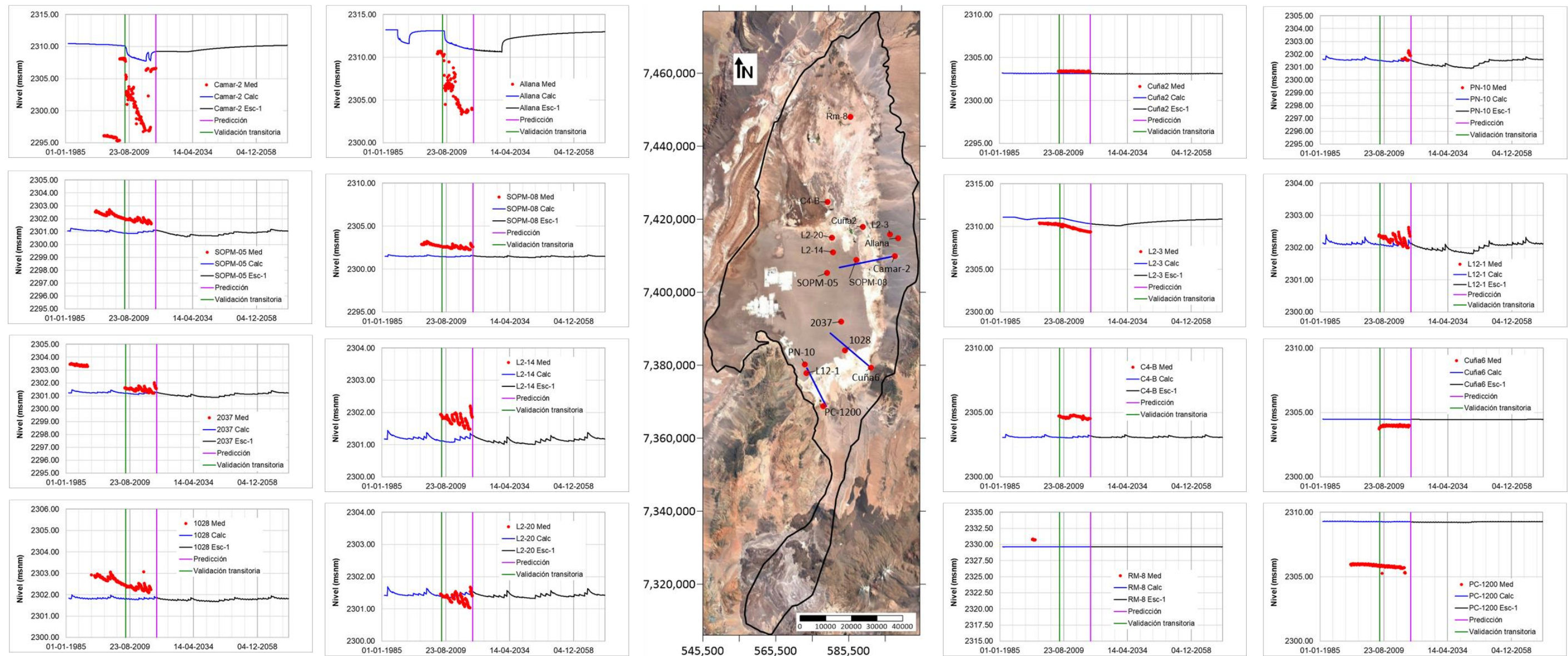
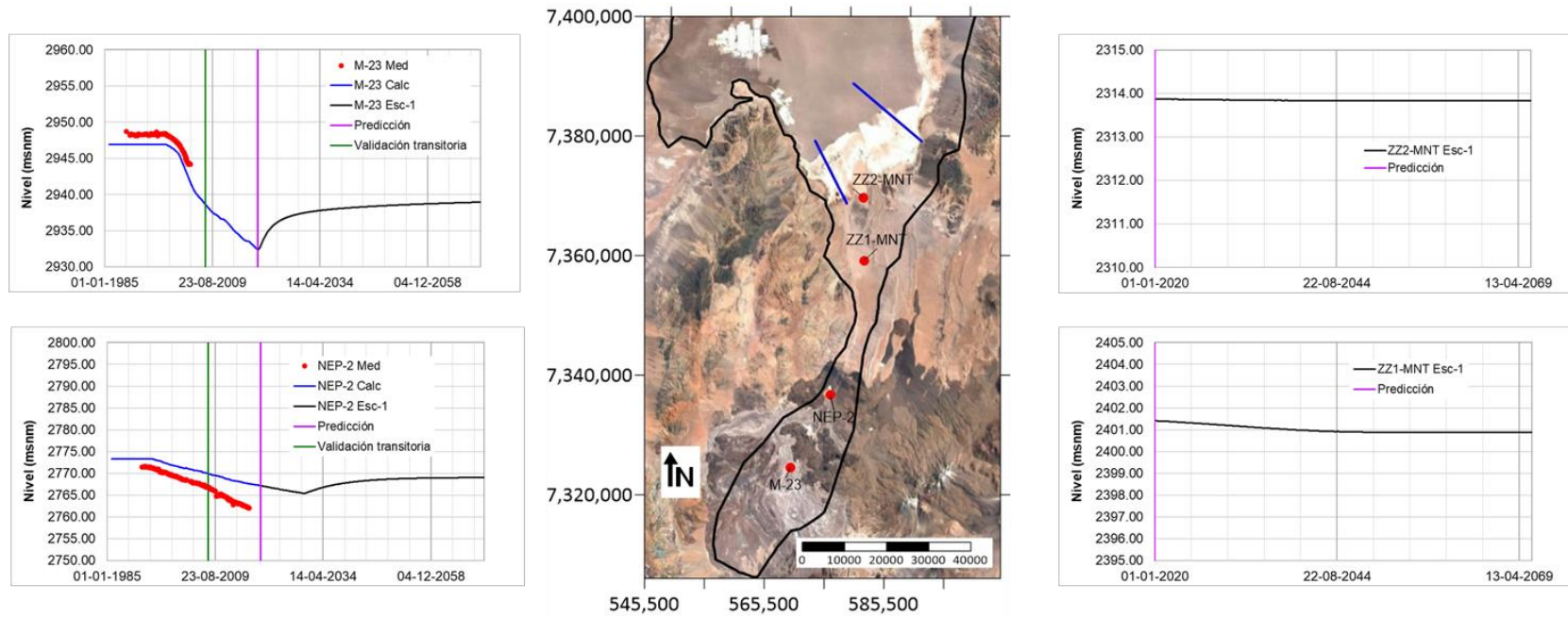


Figura 3-7: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control (PSHA) para el escenario 2.

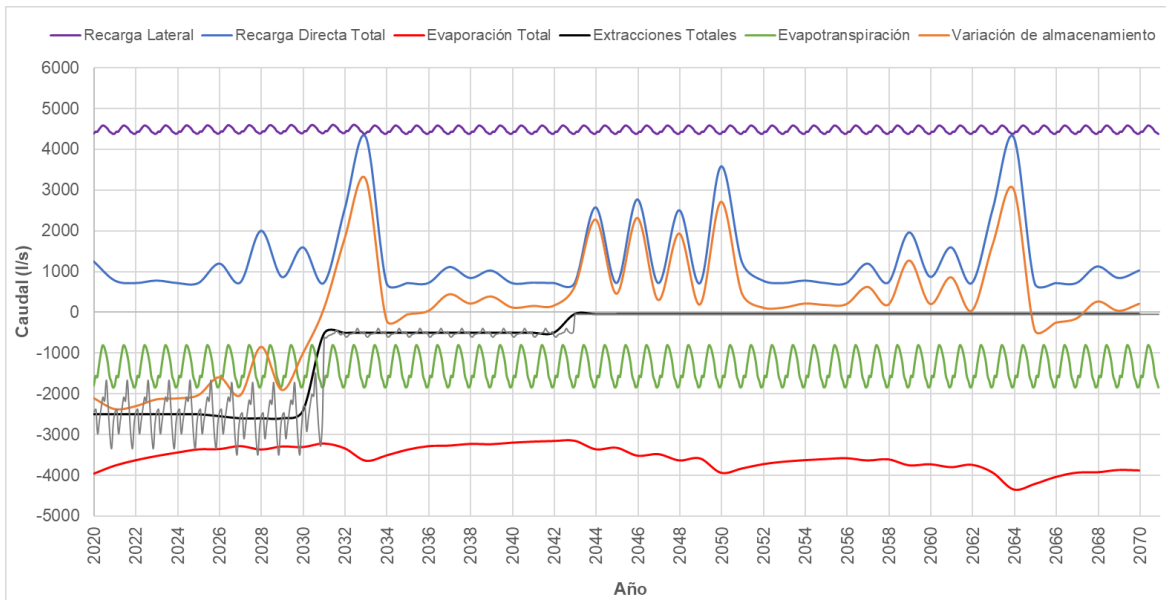
Fuente: Elaboración propia



**Figura 3-8: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control para el escenario 2 en la zona de Monturaqui.**

Fuente: Elaboración propia

El balance hídrico global calculado a partir del escenario 2 se muestra en la Figura 3-9 y el promedio por décadas para cada SHAC se muestra en la Tabla 3-4.



**Figura 3-9: Resumen del balance hídrico obtenido a partir del escenario 2 mostrando las principales entradas y salidas al sistema.**

*Fuente: Elaboración propia*

El balance hídrico que se obtiene para el escenario 2 es muy similar al obtenido para el escenario 1, a excepción de la década de 2020-2029 que para el escenario 2 se obtiene un desbalance global de -1.942 L/s, producto del aumento de extracción en el SHAC F (agua dulce) de CMZ, pasando de -147 L/s (escenario 1) a -281 L/s. A partir del año 2030 las extracciones descienden considerablemente, lo que conlleva una recuperación y aumento de los niveles piezométricos en la cuenca, que se traduce en un aumento de la evaporación.

La variación de almacenamiento total del periodo 2020-2070 es de 112 L/s, menor a la del escenario 1, siendo de 121 L/s en el N (salmuera) y de -10 L/s en el F (agua dulce).

Término del balance	2020-2029					2030-2039					2040-2049					2050-2059					2060-2070					2020-2070				
	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F
<b>Entradas</b>																														
Recarga Directa	51	17	14	253	642	63	18	14	693	643	59	18	14	558	643	58	18	14	511	643	61	18	14	645	643	58	18	14	534	643
Recarga Lateral	34	0	2	127	4309	34	0	2	127	4309	34	0	2	122	4309	34	0	2	122	4309	34	0	2	122	4309	34	0	2	124	4309
Recarga de otros SHACs	1773	574	1578	1482	0	1768	598	1574	1491	0	1770	635	1571	1509	0	1772	651	1571	1475	0	1774	661	1571	1450	0	1772	624	1573	1481	0
<b>Salidas</b>																														
Evaporación	746	311	1026	1414	1	745	307	1009	1281	1	737	329	1009	1284	1	743	356	1044	1552	1	750	374	1055	1765	1	744	336	1029	1465	1
EVT	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788
Extracciones	0	0	17	2077	443	0	0	17	611	74	0	0	5	132	50	0	0	0	0	50	0	0	0	0	50	0	0	8	553	132
Descarga a otros SHACs	696	219	491	0	4001	693	225	502	0	4013	695	238	503	0	4049	693	233	476	0	4067	687	226	466	0	4075	693	228	487	0	4042
<b>Resumen</b>																														
<b>Entradas totales</b>	1858	591	1593	1863	4952	1865	616	1589	2311	4953	1863	652	1586	2189	4952	1864	668	1586	2108	4952	1869	678	1586	2217	4952	1864	642	1588	2139	4952
<b>Salidas totales</b>	1872	605	1598	3491	5233	1868	605	1591	1892	4876	1862	640	1582	1416	4888	1865	663	1584	1552	4905	1868	674	1585	1765	4914	1867	638	1588	2018	4962
<b>Variación de Almacenamiento</b>	-14	-14	-5	-1628	-281	-3	11	-2	419	77	1	12	4	773	65	-1	6	2	556	47	2	5	1	452	38	-3	4	0	121	-10

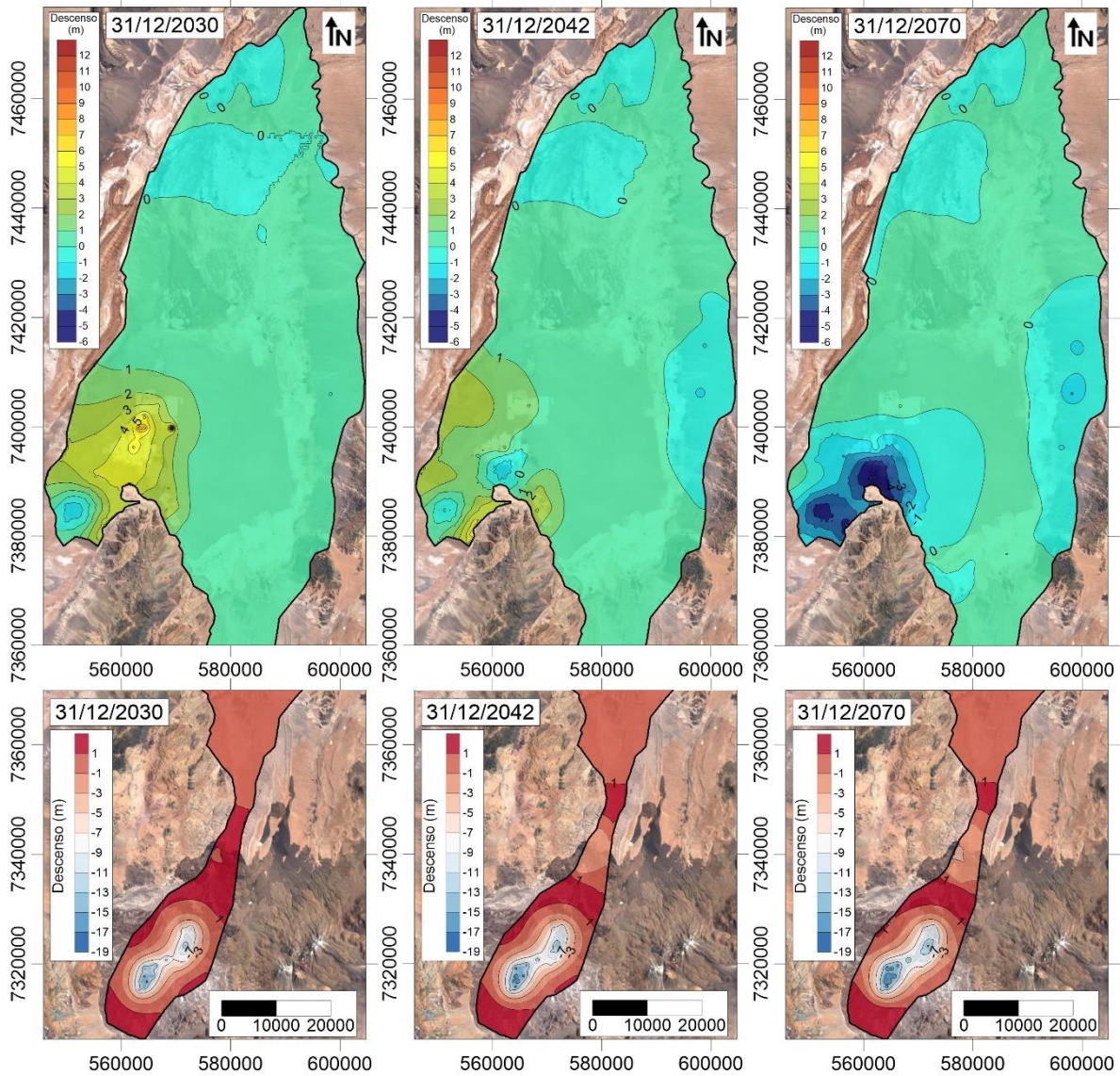
Tabla 3-4: Resultado del balance hídrico promedio por periodo (L/s) para el escenario 2.

Fuente: Elaboración propia

Nota: SHACs A, B y C corresponden a zona de mezcla, SHAC N corresponde a salmuera y SHAC F corresponde a agua dulce.

Para cuantificar el efecto de la extracción futura en la cuenca, se ha calculado el descenso con respecto a la situación inicial de diciembre de 2019 para tres períodos de la simulación: diciembre de 2030 (momento a partir del cual cesan las extracciones de SQM), diciembre de 2042 (momento en el que cesan las extracciones de Albemarle), y diciembre de 2070 (final de la simulación). La Figura 3-10 muestra la distribución del descenso producido para estas tres fechas. Los valores positivos indican descenso, mientras que los valores negativos indican un aumento de los niveles, es decir, una recuperación del acuífero.

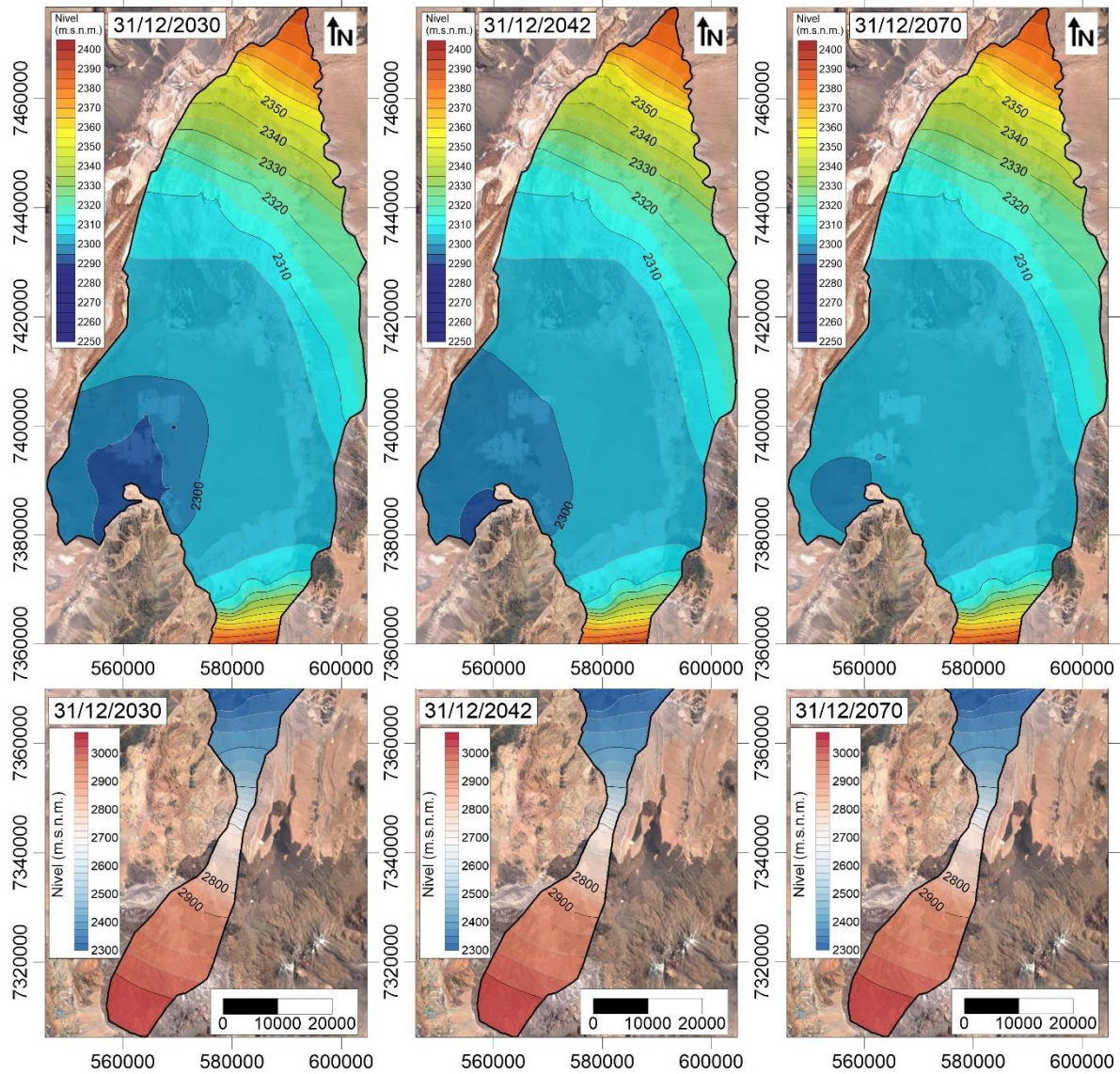
Como se observa en la Figura 3-10, el mayor descenso en el año 2030 se da en la parte oeste del Salar, debido a la extracción de SQM, con descensos de aproximadamente 6-7 m, mientras que en la zona de Monturaqui, debido al cese de extracción de MEL, los ascensos para el 2030 son de hasta 16 m. Para el año 2042 se aprecia una recuperación de los niveles en el núcleo producto del cese del bombeo de SQM, pero continúan aumentando los descensos en la zona de extracción de Albemarle hasta los 5 m. Por otra parte, en el año 2070, se aprecia la recuperación de los niveles en la zona del Núcleo y Borde Este, producto del cese de las extracciones de salmuera y agua industrial.



**Figura 3-10: Descenso a partir de inicio de simulación para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 2.**

Fuente: Elaboración propia

La Figura 3-11 muestra la piezometría calculada para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 2.



**Figura 3-11: Piezometría para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 2.**

Fuente: Elaboración propia



### 3.2.2 Escenario 3

El escenario 3 corresponde al Caso Base (extracciones de salmuera y agua dulce/industrial aprobadas según las RCA vigentes al año 2019) más las siguientes situaciones hipotéticas (detalle de las extracciones por año en la Tabla 2-2):

- 1) Extensión de la extracción de agua industrial de CMZ hasta 2031.
- 2) Extensión por 10 años de la extracción de agua industrial y salmuera a las tasas aprobadas por RCA 226/2006 a SQM, hasta el 2040 (1.700 l/s para salmuera y 240 l/s para agua dulce/industrial).

La Tabla 3-5 muestra los descensos máximos calculados en los puntos de control en las diversas áreas de interés para el escenario 3, y los niveles observados para cada punto de control se muestra en la Figura 3-12 y la Figura 3-13.

El descenso máximo en el área La Punta-La Brava se da en el punto de observación PN-10, con un valor de 0,7 m, que disminuye hacia el sur en el punto de observación L12-1 hasta un valor de 0,4 m y es prácticamente nulo en el punto de observación PC-1200, cuyo nivel permanece constante durante todo el período de simulación. En el área Peine, el mayor descenso se recoge en el punto de observación más cercano al núcleo (2037) con un valor de 0,6 m y disminuye a 0,2 m en el punto de observación 1028. El nivel en el punto de observación Cuña 6 permanece prácticamente constante durante todo el periodo de simulación, mostrando únicamente las variaciones estacionales de verano - invierno de la evaporación.

En el área de Quelana el mayor descenso se observa en el punto más cercano al núcleo (SOPM-05) con un valor de 0,9 m, disminuye a 0,3 m en el punto de observación SOPM-08 y a 0,15 m en el punto de observación Camar-2, influenciado por la extracción de agua industrial de SQM. En el área de Soncor los mayores descensos se producen en los puntos de observación más cercanos al núcleo (L2-14) y en el Borde Este (Allana) con valores en torno a 0,4 m y 0,5 m, respectivamente.

En el área Norte, los niveles se mantienen prácticamente constantes (RM-8 y C4-B), salvo por las oscilaciones naturales.

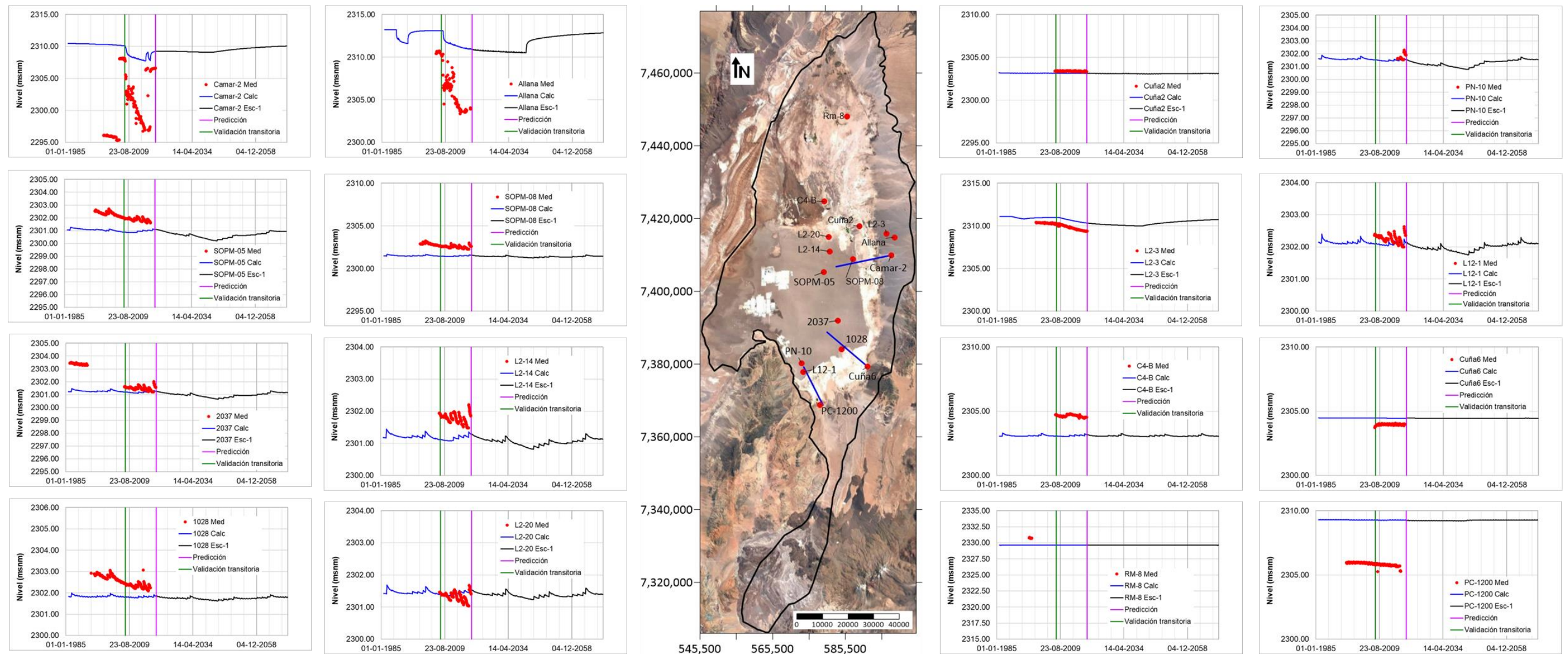
Finalmente, en Monturaqui en la parte alta de la cuenca no se observan descensos, y los niveles comienzan a recuperarse desde el inicio del escenario, debido al cese de las extracciones de MEL, sin embargo, al final de la simulación no se alcanzan los niveles

previos a la extracción. A partir del año 2030 los niveles comienzan a recuperarse en Callejón, pero al final de la simulación no se han alcanzado los niveles previos a la extracción. En la zona de Callejón se dan los mayores descensos, con valores de 1,8 m (NEP-2), al sur de Tilopozo (ZZ1-MNT) el descenso máximo es de 0,5 m, y tan sólo de 5 cm en el punto de observación ZZ2-MNT.

Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)
La Punta-La Brava	
PN-10	0,73
L12-1	0,37
PC-1200	0,07
Peine	
2037	0,61
1028	0,24
Cuña6	0,02
Quelana	
SOPM-05	0,88
SOPM-08	0,31
Camar2	0,14
Soncor	
L2-14	0,46
L2-20	0,29
Cuña 2	0,09
L2-3	0,34
Allana	0,41
Zona Norte	
C4-B	0,15
RM-8	0,01
Monturaqui	
M-23	0,02
NEP-2	1,80
ZZ1-MNT	0,54
ZZ2-MNT	0,04

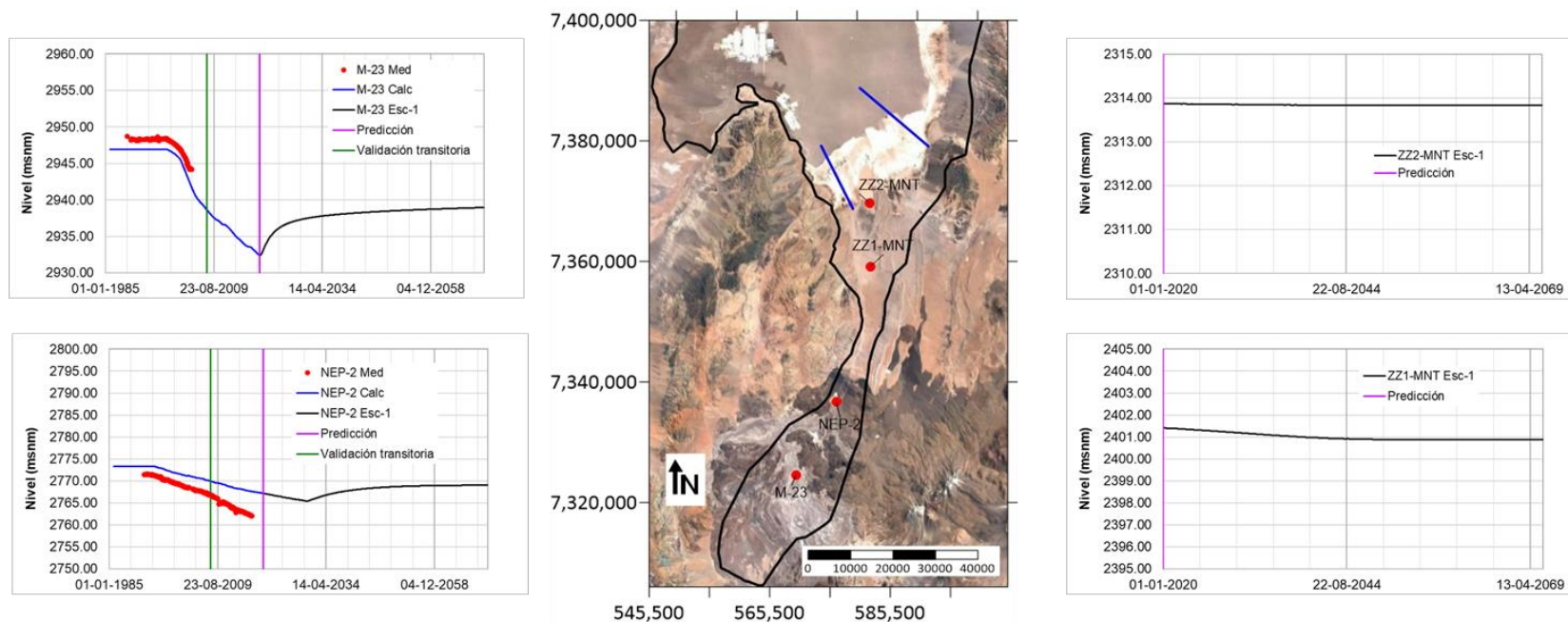
Tabla 3-5: Descensos máximos en los puntos de control por áreas de interés para el escenario 3.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3-12: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control (PSHA) para el escenario 3.**

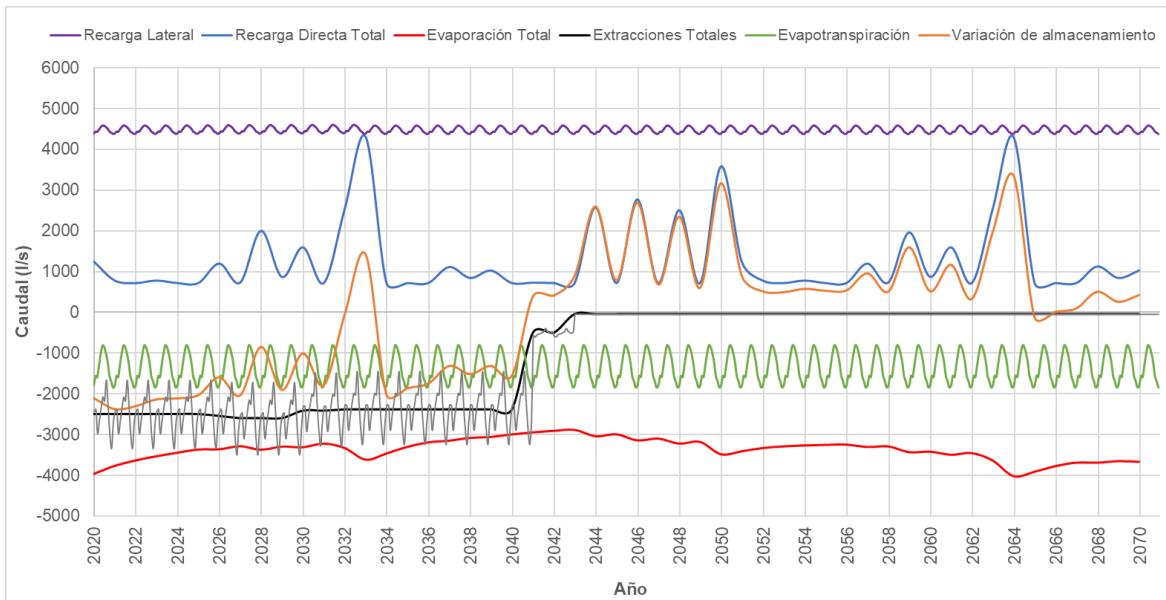
Fuente: Elaboración propia



**Figura 3-13: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control para el escenario 3 en la zona de Monturaqui.**

Fuente: Elaboración propia

El balance hídrico global calculado a partir del escenario 3 se muestra en la Figura 3-14 y el promedio por décadas para cada SHAC se muestra en la Tabla 3-6.



**Figura 3-14: Resumen del balance hídrico obtenido a partir del escenario 3 mostrando las principales entradas y salidas al sistema.**

Fuente: Elaboración propia

A diferencia de los escenarios 1 y 2, en el escenario 3, debido a la extensión de SQM, la variación del almacenamiento para la década de 2030-2039 es negativa con un valor de -1.119 L/s, siendo de -1.055 L/s en el SHAC N (salmuera) y de -49 L/s en el SHAC F (agua dulce). A partir del año 2040 las extracciones descienden considerablemente, lo que conlleva una recuperación y aumento de los niveles piezométricos en la cuenca, que se traduce en una variación del almacenamiento positiva igual a 985 L/s (2040-2049), siendo de 880 L/s en el SHAC N (salmuera) y de 94 L/s en el SHAC F (agua dulce). Sin embargo, a partir de 2050, debido al aumento de la evaporación inducida por el ascenso de los niveles piezométricos, principalmente en el núcleo, la variación del almacenamiento disminuye llegando a 773 L/s para el periodo de 2060-2070, siendo de 704 L/s en el N (salmuera) y de 57 L/s en el F (agua dulce).

La variación de almacenamiento total del periodo 2020-2070 en este escenario es negativa e igual a -49 L/s, siendo de -28 L/s en el N (salmuera) y de -20 L/s en el F (agua dulce).

Término del balance	2020-2029					2030-2039					2040-2049					2050-2059					2060-2070					2020-2070				
	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F
<b>Entradas</b>																														
Recarga Directa	51	17	14	253	642	63	18	14	693	643	59	18	14	558	643	58	18	14	511	643	61	18	14	645	643	58	18	14	534	643
Recarga Lateral	34	0	2	127	4309	34	0	2	127	4309	34	0	2	122	4309	34	0	2	122	4309	34	0	2	122	4309	34	0	2	124	4309
Recarga de otros SHACs	1773	574	1578	1482	0	1767	563	1574	1490	0	1763	592	1570	1538	0	1766	629	1570	1504	0	1769	647	1570	1464	0	1768	602	1572	1495	0
<b>Salidas</b>																														
Evaporación	746	311	1026	1414	1	744	294	1008	1224	1	728	281	996	1036	1	732	319	1029	1248	1	742	351	1047	1528	1	738	312	1021	1295	1
EVT	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788
Extracciones	0	0	17	2077	443	0	0	17	2141	236	0	0	5	303	68	0	0	0	0	50	0	0	0	0	50	0	0	8	887	167
Descarga a otros SHACs	696	219	491	0	4001	694	221	503	0	3977	702	242	518	0	4002	698	241	489	0	4040	691	231	473	0	4057	696	231	494	0	4016
<b>Resumen</b>																														
<b>Entradas totales</b>	1858	591	1593	1863	4952	1863	581	1589	2310	4953	1857	610	1585	2218	4952	1858	647	1585	2137	4952	1864	665	1585	2232	4952	1860	620	1587	2154	4952
<b>Salidas totales</b>	1872	605	1598	3491	5233	1868	589	1592	3365	5002	1860	597	1583	1339	4859	1860	634	1582	1248	4878	1863	656	1584	1528	4895	1865	617	1588	2181	4972
<b>Variación de Almacenamiento</b>	-14	-14	-5	-1628	-281	-5	-8	-3	-1055	-49	-4	13	2	880	94	-2	13	3	889	74	2	9	1	704	57	-5	3	0	-28	-20

Tabla 3-6: Resultado del balance hídrico promedio por periodo (L/s) para el escenario 3.

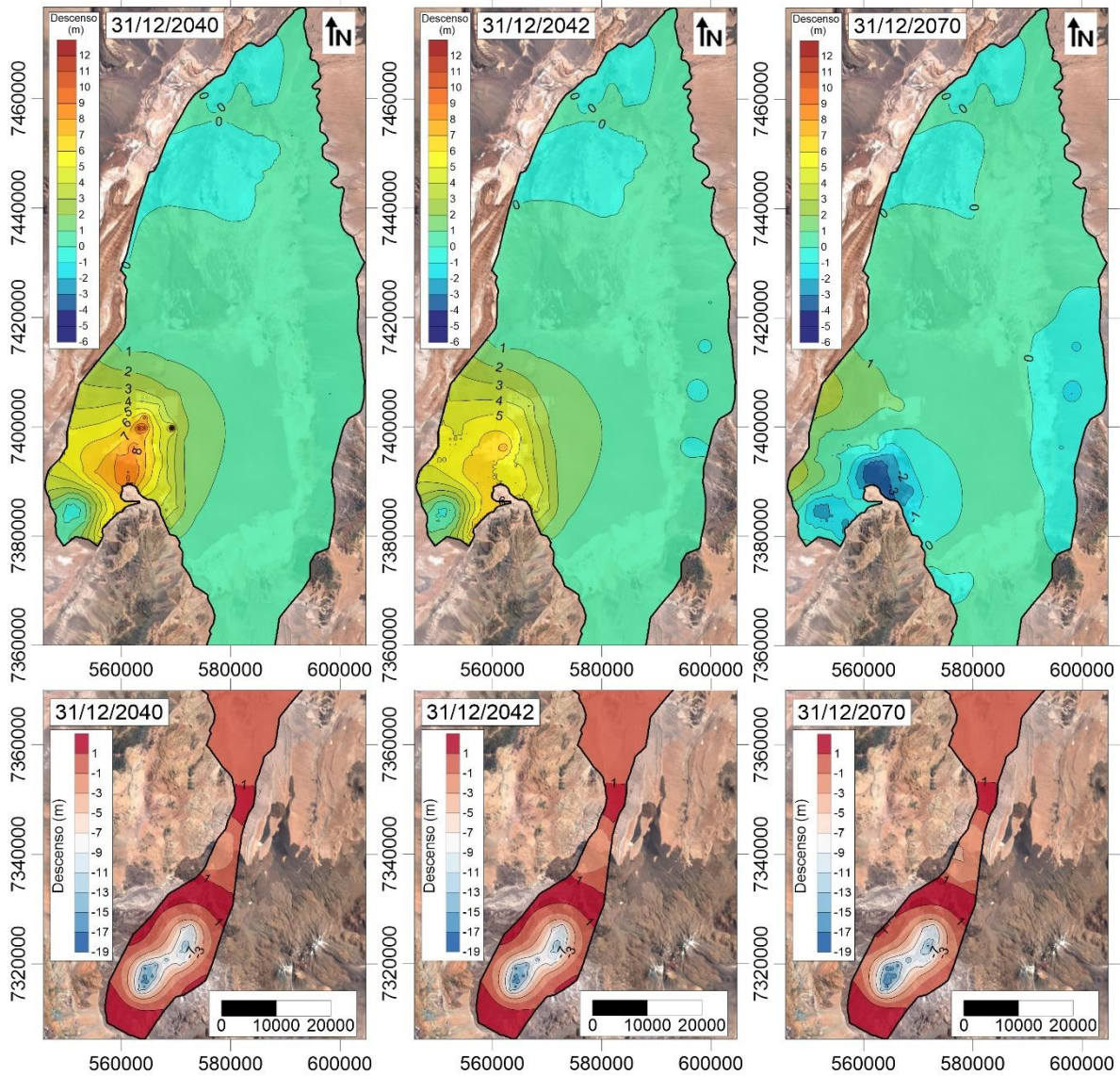
Fuente: Elaboración propia

Nota: SHACs A, B y C corresponden a zona de mezcla, SHAC N corresponde a salmuera y SHAC F corresponde a agua dulce.

Para cuantificar el efecto de la extracción futura en la cuenca, se ha calculado el descenso con respecto a la situación inicial de diciembre de 2019 para tres períodos de la simulación: diciembre de 2040 (momento a partir del cual cesan las extracciones de SQM o de otro posible operador de litio que pudiera operar desde 2031), diciembre de 2042 (momento en que cesan las extracciones de Albemarle), y diciembre de 2070 (al final de la simulación). La Figura 3-15 muestra la distribución del descenso producido para estas tres fechas. Los valores positivos indican descenso, mientras que los valores negativos indican un aumento de los niveles, es decir, una recuperación del acuífero.

Como se observa en la Figura 3-15, los mayores descensos en el núcleo se presentan en el año 2040 producto de la extensión de la extracción de SQM u otro operador de litio (2031-2040), alcanzando descensos máximos de hasta 10-11 m aproximadamente, mientras que en la zona de Monturaqui, debido al cese de extracción de MEL y CMZ en 2019 y 2031, respectivamente, los ascensos para el 2040 son de hasta 17 m. Para el año 2042, los descensos en el núcleo disminuyen producto del cese de la extracción de SQM u otro operador de litio, alcanzando 8 m aproximadamente. Por otra parte, en el año 2070 se aprecia la recuperación de los niveles en la zona del Núcleo, de hasta 3 m con respecto a los niveles a diciembre de 2019, además se aprecian las recuperaciones en el Borde Este producto del cese de las extracciones de agua industrial.

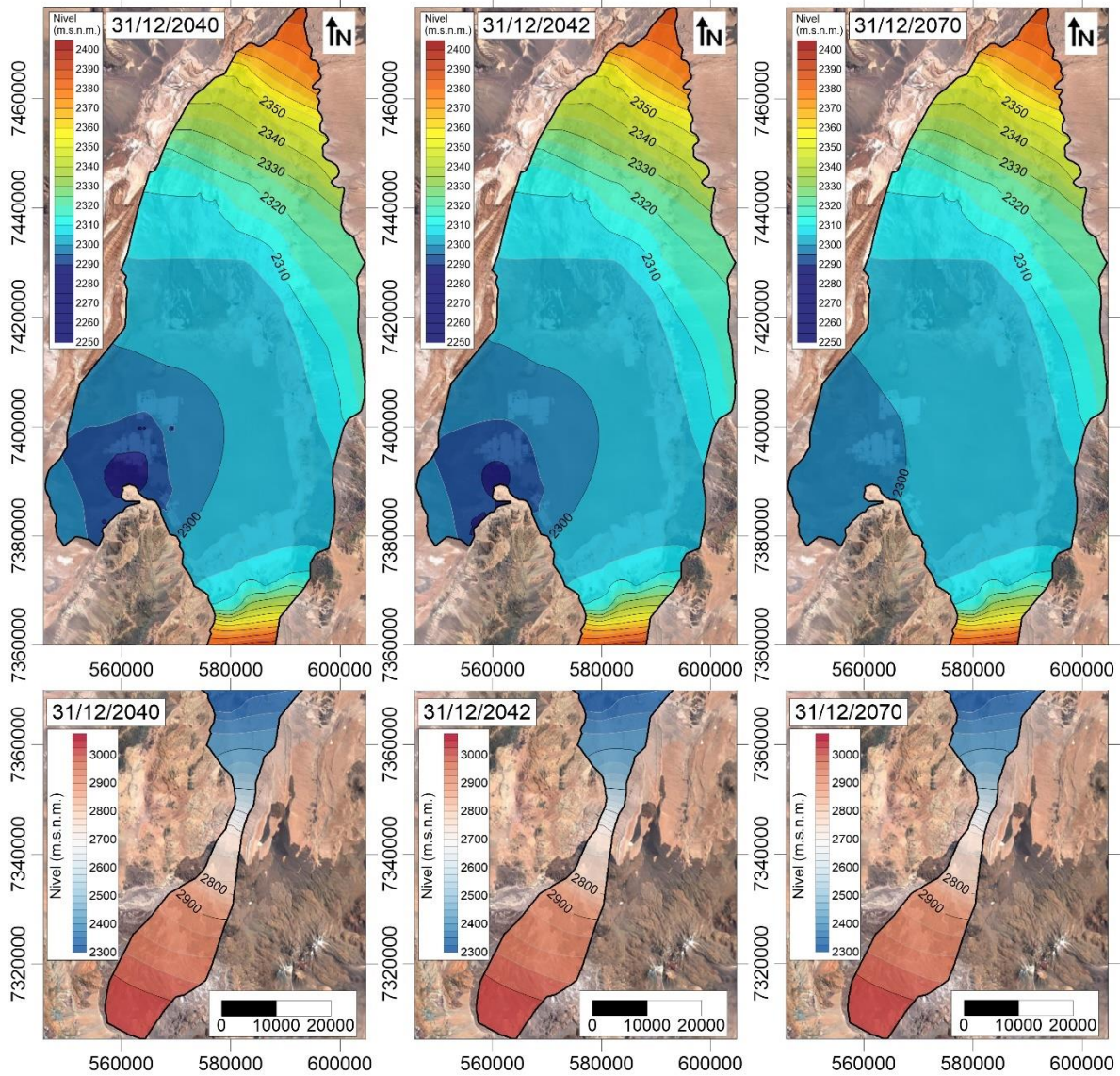




**Figura 3-15: Descenso a partir de inicio de simulación para diciembre de 2040, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 3.**

Fuente: Elaboración propia

La Figura 3-16 muestra la piezometría para diciembre de 2040, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 3.



**Figura 3-16: Piezometría para diciembre de 2040, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 3.**

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.3 Escenario 4

El escenario 4 corresponde al Caso Base (extracciones de salmuera y agua dulce/industrial aprobadas según las RCA vigentes al año 2019), más las siguientes situaciones hipotéticas (detalle de las extracciones por año en la Tabla 2-2):

- 1) Extensión de la extracción de agua industrial de CMZ hasta 2031.
- 2) Reducción gradual hasta el 50% de la extracción de agua industrial y de salmuera de SQM desde 2021 hasta el año 2030. Esto es, al final del periodo, a 120 l/s para agua dulce y a 822 l/s para salmuera. Esta reducción gradual corresponde a las extracciones definidas en el Plan de Sustentabilidad de SQM en octubre de 2020.

La Tabla 3-7 muestra los descensos máximos calculados en los puntos de control en las diversas áreas de interés para el escenario 4, y los niveles observados para cada punto de control se muestra en la Figura 3-17 y la Figura 3-18.

Como se observa, los descensos son menores a los del escenario 2, producto de la reducción gradual de la extracción por parte de SQM, excepto en la zona de Monturaqui, donde estas reducciones no tienen influencia.

El descenso máximo en el área La Punta-La Brava se da en el punto de observación PN-10, con un máximo de 0,5 m. Dicho descenso disminuye hacia el sur en el punto de observación L12-1 hasta un valor de 0,3 m y es casi nulo en el punto de observación PC-1200, cuyo nivel permanece prácticamente constante durante todo el período de simulación, mostrando únicamente las variaciones estacionales de verano - invierno de la evaporación.

En el área Peine, el mayor descenso se recoge en el punto de observación más cercano al núcleo (2037) con un valor de prácticamente de 0,3 m y disminuye a 0,2 m en el punto de observación 1028. El nivel en el punto de observación Cuña 6 permanece prácticamente constante durante todo el periodo de simulación.

En el área de Quelana el mayor descenso se observa en el punto más cercano al núcleo (SOPM-05) con un valor de 0,4 m, disminuyendo a 0,2 m en el punto de observación SOPM-08. En el punto de observación de Camar-2 se produce una recuperación producto del cese del bombeo del pozo Camar-2.

En el área de Soncor los mayores descensos se producen en puntos de observación hacia el núcleo (L2-14) y más distales (Allana) con valores en torno a 0,1 m y 0,2 m, debido a la extracción de salmuera y agua industrial de SQM. Mientras que en el área Norte, los niveles se mantienen prácticamente constantes (RM-8 y C4-B), salvo por las oscilaciones naturales.

En Monturaqui no se observa descenso en la parte más alta de la cuenca, y los niveles se comienzan a recuperar desde el inicio del escenario, debido al cese de las extracciones de MEL, sin embargo, al final de la simulación no se alcanzan los niveles previos a la extracción. En la zona de Callejón se observa un descenso máximo de 0,8 m (NEP-2) y de 0,4 m (ZZ1-MNT) al sur de Tilopozo, debido a las extracciones de CMZ.

Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)
La Punta-La Brava	
PN-10	0,53
L12-1	0,27
PC-1200	0,06
Peine	
2037	0,31
1028	0,17
Cuña6	0,01
Quelana	
SOPM-05	0,40
SOPM-08	0,18
Camar2	0,00
Soncor	
L2-14	0,23
L2-20	0,18
Cuña 2	0,06
L2-3	0,15
Allana	0,12
Zona Norte	
C4-B	0,13
RM-8	0,00
Monturaqui	
M-23	0,02
NEP-2	1,80
ZZ1-MNT	0,54
ZZ2-MNT	0,04

Tabla 3-7: Descensos máximos en los puntos de control por áreas de interés para el escenario 4.

Fuente: Elaboración propia

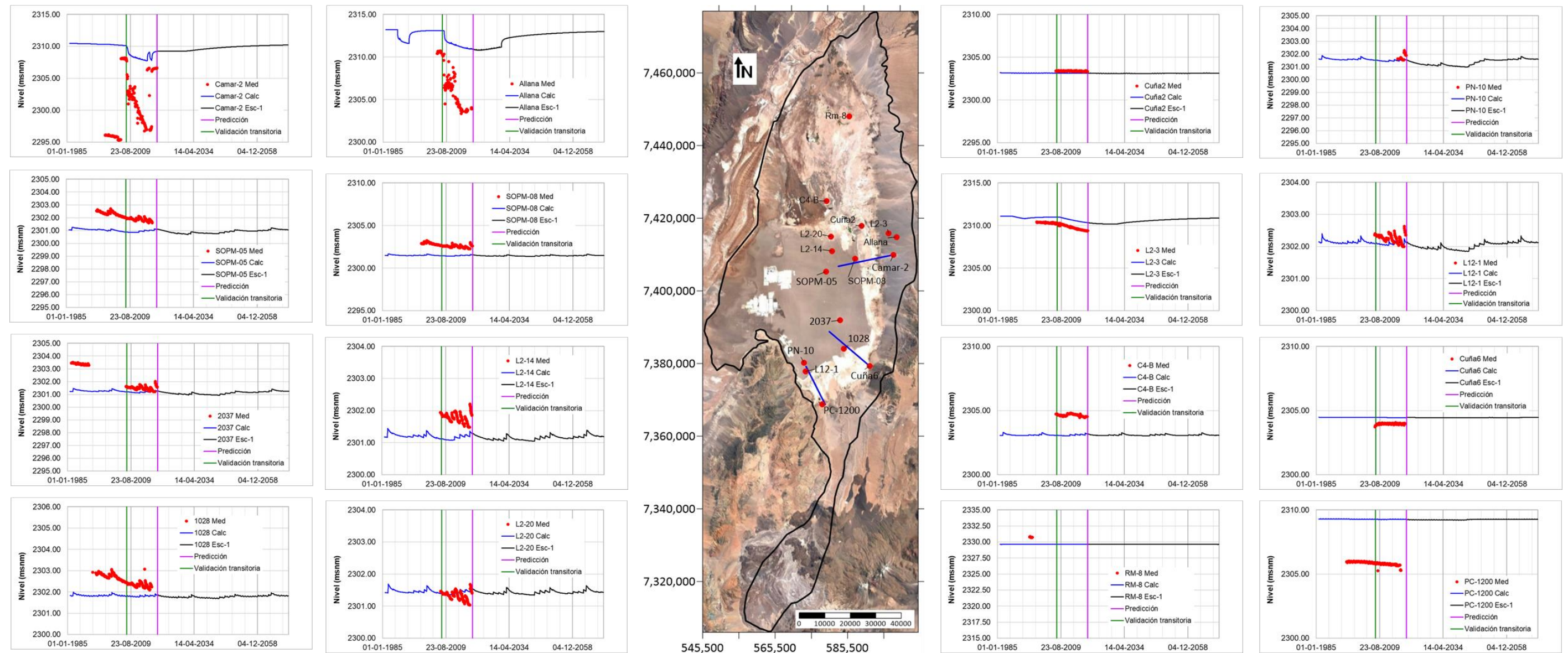
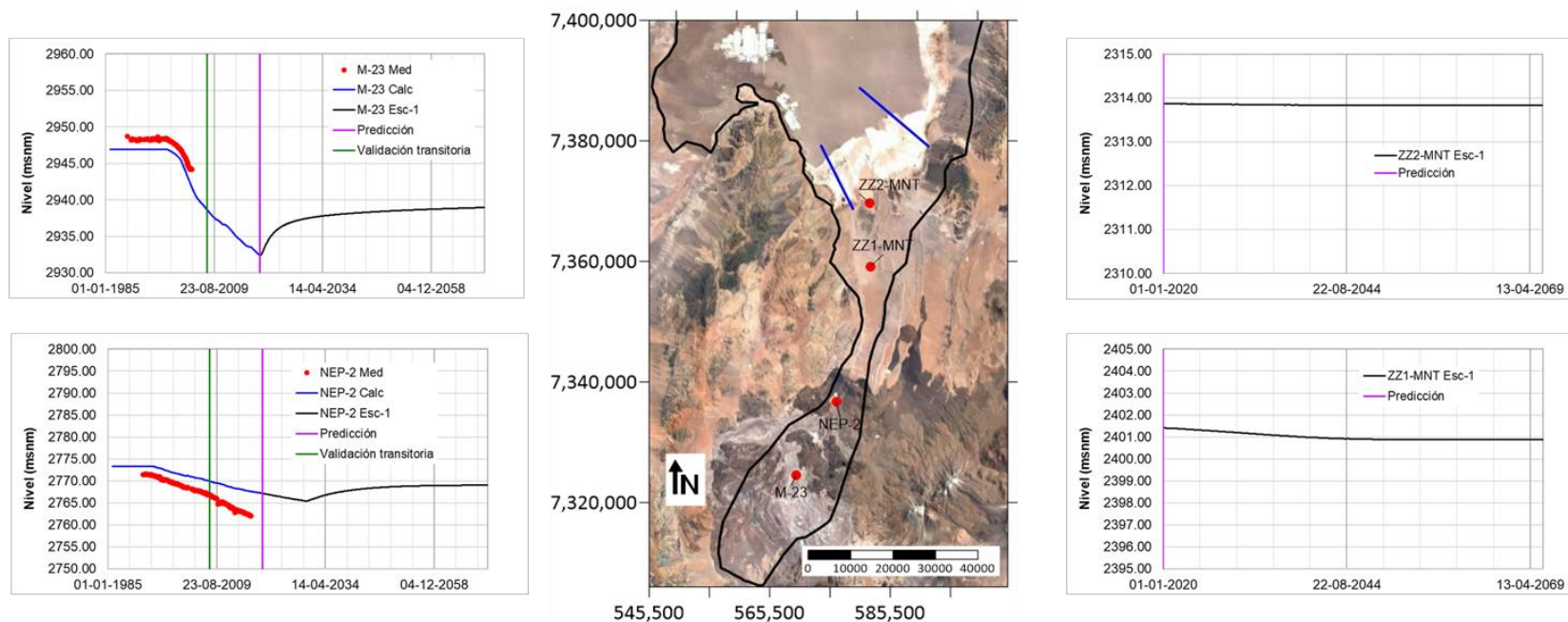


Figura 3-17: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control (PSHA) para el escenario 4.

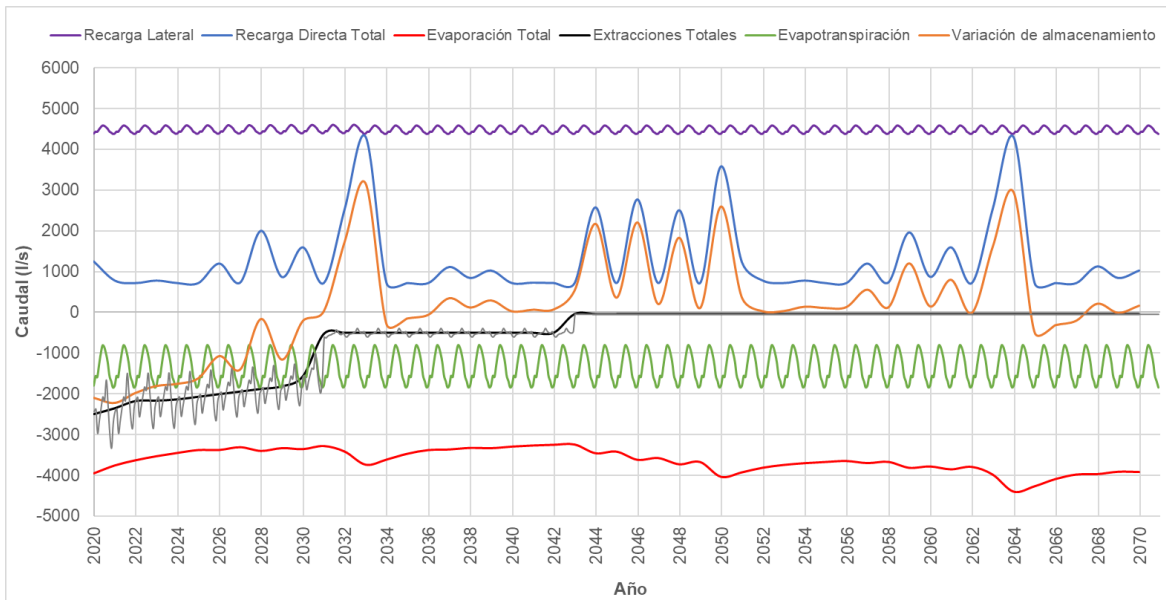
Fuente: Elaboración propia



**Figura 3-18: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control para el escenario 4 en la zona de Monturaqui.**

Fuente: Elaboración propia

El balance hídrico global calculado a partir del escenario 4 se muestra en la Figura 3-19 y el promedio por décadas para cada SHAC se muestra en la Tabla 3-8.



**Figura 3-19: Resumen del balance hídrico obtenido a partir del escenario 4 mostrando las principales entradas y salidas al sistema.**

Fuente: Elaboración propia

El balance hídrico que se obtiene para el escenario 4 es similar al obtenido para el escenario 2, con la diferencia de la disminución gradual de las extracciones. A partir del año 2030 las extracciones descienden considerablemente, lo que conlleva una recuperación y aumento de los niveles piezométricos en la cuenca, que se traduce en un aumento de la evaporación.

Respecto a los valores promedios del balance hídrico se observa que la variación de almacenamiento para la década 2020-2029 es de -1.531 L/s, lo que es mayor que los -1.942 L/s del escenario 2, debido a la disminución gradual de las extracciones de este escenario 4, siendo de -1.237 L/s en el N (salmuera) y de -263 L/s en el F (agua dulce). A partir de la década 2030-2039, debido al cese de la extracción de SQM, la variación del almacenamiento pasa a ser positiva y aumenta hasta alcanzar un valor de 760 L/s en la década de 2040-2049, siendo de 683 L/s en el N (salmuera) y de 61 L/s en el F (agua dulce). Sin embargo, a partir de 2050, debido al aumento de la evaporación, la variación del



almacenamiento se mantiene positiva pero disminuye a 442 L/s en el periodo 2060-2070, siendo de 399 L/s en el N (salmuera) y de 36 L/s en el F (agua dulce).

La variación de almacenamiento total del periodo 2020-2070 es de 145 L/s (mayor que en los escenarios 1 y 2), siendo de 153 L/s en el N (salmuera) y de -9 L/s en el F (agua dulce).

Para cuantificar el efecto de la extracción futura en la cuenca, se ha calculado el descenso con respecto a la situación inicial de diciembre de 2019 para tres períodos de la simulación: diciembre de 2030 (momento a partir del cual cesan las extracciones de SQM), diciembre de 2042 (momento en el que cesan las extracciones de Albemarle), y diciembre de 2070 (final de la simulación). La Figura 3-20 muestra la distribución del descenso producido para estas tres fechas. Los valores positivos indican descenso, mientras que los valores negativos indican un aumento de los niveles, es decir, una recuperación del acuífero.

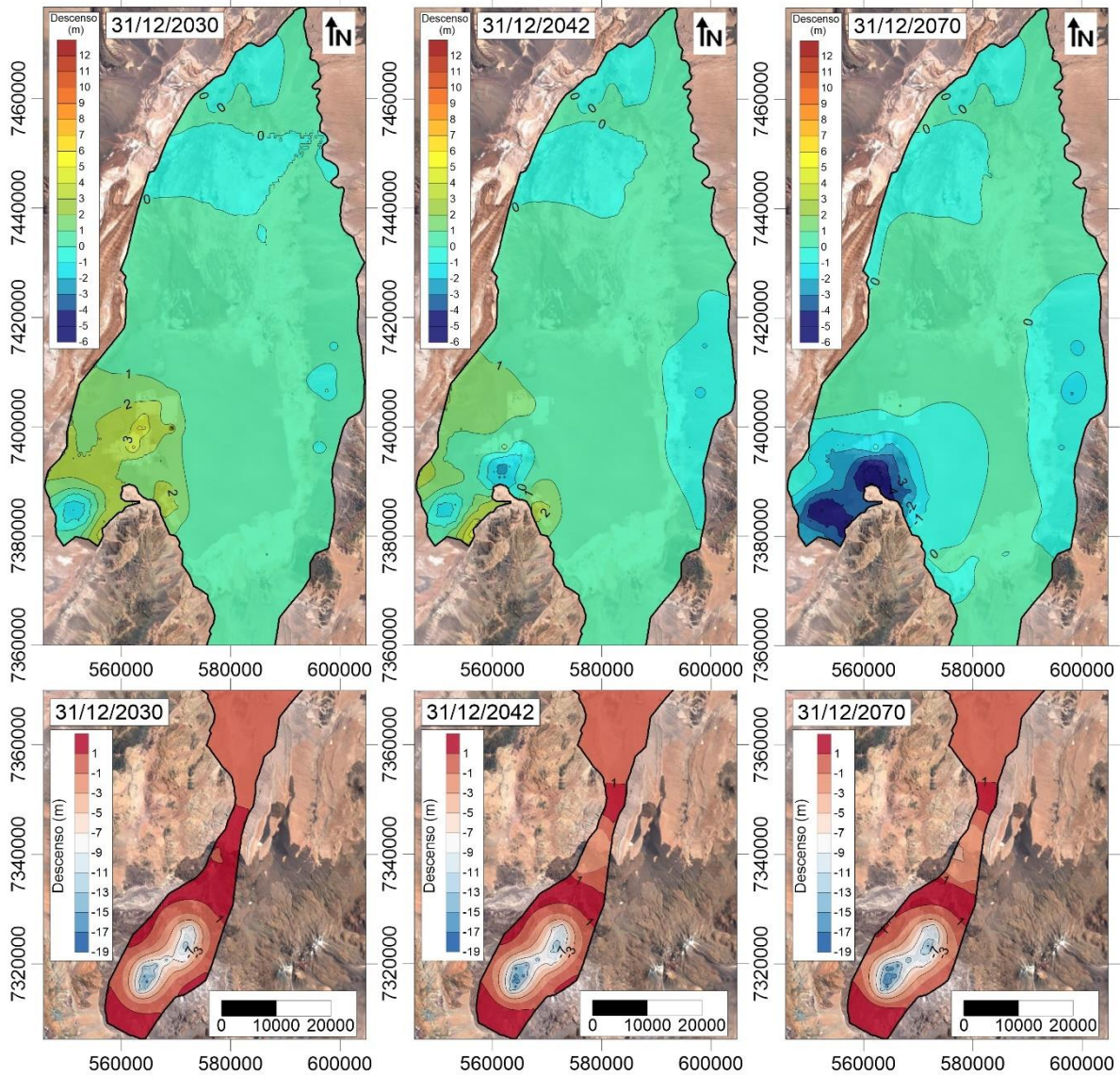
Como se observa en la Figura 3-20, el mayor descenso en el año 2030 se da en el núcleo del Salar, debido a la extracción de SQM, con descensos de aproximadamente 3-4 m, que son menores a los observados en el escenario 2, producto de la reducción gradual de este escenario 4. Para el año 2042 se aprecia una recuperación de los niveles en el núcleo producto del cese del bombeo de SQM, pero continúan aumentando los descensos en la zona de extracción de Albemarle hasta los 4 m. Por otra parte, en el año 2070, se aprecia la recuperación de los niveles en la zona del Núcleo y Borde Este, producto del cese de las extracciones de salmuera y agua industrial.

Término del balance	2020-2029					2030-2039					2040-2049					2050-2059					2060-2070					2020-2070				
	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F
<b>Entradas</b>																														
Recarga Directa	51	17	14	253	642	63	18	14	693	643	59	18	14	558	643	58	18	14	511	643	61	18	14	645	643	58	18	14	534	643
Recarga Lateral	34	0	2	127	4309	34	0	2	127	4309	34	0	2	122	4309	34	0	2	122	4309	34	0	2	122	4309	34	0	2	124	4309
Recarga de otros SHACs	1773	577	1578	1482	0	1769	606	1574	1484	0	1771	638	1571	1499	0	1773	653	1571	1470	0	1775	662	1571	1448	0	1772	628	1573	1476	0
<b>Salidas</b>																														
Evaporación	746	312	1026	1429	1	747	315	1012	1356	1	739	336	1015	1363	1	744	361	1046	1623	1	751	376	1056	1815	1	746	341	1031	1523	1
EVT	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788
Extracciones	0	0	17	1671	422	0	0	17	532	69	0	0	5	132	50	0	0	0	0	50	0	0	0	0	50	0	0	8	458	127
Descarga a otros SHACs	696	219	491	0	4004	691	223	498	0	4021	693	235	498	0	4053	692	231	474	0	4070	687	225	465	0	4078	692	227	485	0	4046
<b>Resumen</b>																														
<b>Entradas totales</b>	1858	594	1593	1862	4952	1866	624	1589	2304	4953	1864	656	1586	2179	4952	1865	670	1586	2103	4952	1870	680	1586	2215	4952	1865	645	1588	2134	4952
<b>Salidas totales</b>	1872	605	1598	3100	5215	1868	612	1591	1888	4878	1863	645	1582	1496	4892	1866	666	1585	1623	4908	1868	676	1585	1815	4916	1868	641	1588	1981	4961
<b>Variación de Almacenamiento</b>	-14	-12	-5	-1237	-263	-2	12	-1	415	74	1	11	4	683	61	-1	5	1	480	44	2	4	0	399	36	-3	4	0	153	-9

Tabla 3-8: Resultado del balance hídrico promedio por periodo (L/s) para el escenario 4.

Fuente: Elaboración propia

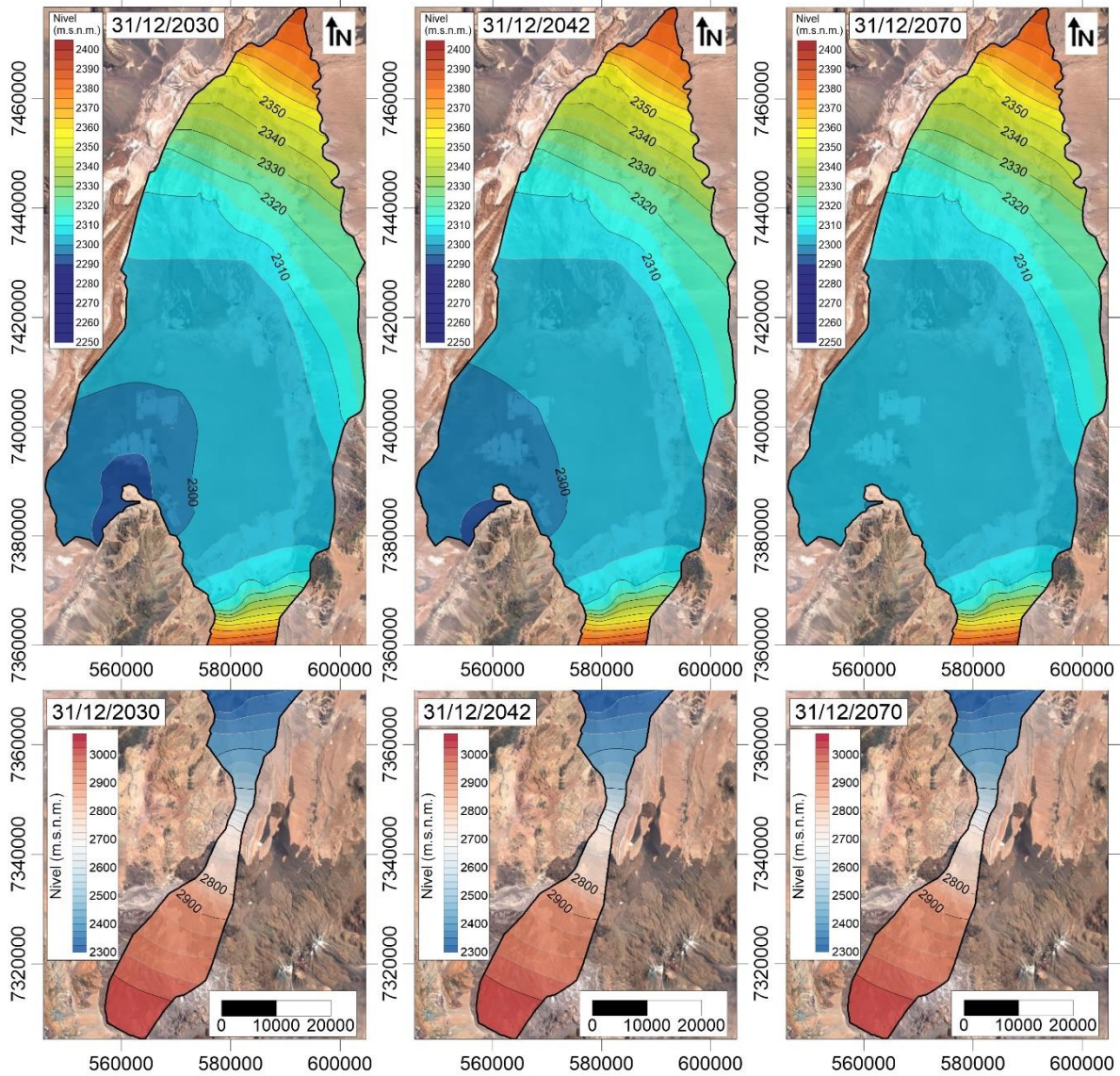
Nota: SHACs A, B y C corresponden a zona de mezcla, SHAC N corresponde a salmuera y SHAC F corresponde a agua dulce.



**Figura 3-20: Descenso a partir de inicio de simulación para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 4.**

Fuente: Elaboración propia

La Figura 3-21 muestra la piezometría calculada para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 4.



**Figura 3-21: Piezometría para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 4.**

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.4 Escenario 5

El escenario 5 corresponde al Caso Base (extracciones de salmuera y agua dulce/industrial aprobadas según las RCA vigentes al año 2019), más las siguientes situaciones hipotéticas (detalle de las extracciones por año en la Tabla 2-2):

- 1) Extensión de la extracción de agua industrial de CMZ hasta 2031.
- 2) Extensión de la extracción de agua industrial y salmuera hasta el año 2040 a una tasa fija de 822 l/s para salmuera y de 120 l/s para agua dulce/industrial, ambas desde el 2021. Se considera que SQM extrae hasta el año 2030, según el contrato vigente con Corfo. Para el periodo 2031 a 2040, se considera que extraerá un operador de litio (actualmente no definido).

La Tabla 3-9 muestra los descensos máximos calculados en los puntos de control en las diversas áreas de interés para el escenario 5, y los niveles observados para cada punto de control se muestra en la Figura 3-22 y la Figura 3-23.

Como se observa, los descensos son menores a los del escenario 3 producto de la reducción a tasa fija de la extracción por parte de SQM u otro operador, excepto en la zona de Monturaqui, donde estas reducciones no tienen influencia.

El descenso máximo en el área La Punta-La Brava se da en el punto de observación PN-10, con un valor de 0,6 m, que disminuye hacia el sur en el punto de observación L12-1 hasta un valor de 0,3 m y es prácticamente nulo en el punto de observación PC-1200, cuyo nivel permanece constante durante todo el período de simulación.

En el área Peine, el mayor descenso se recoge en el punto de observación más cercano al núcleo (2037) con un valor de 0,4 m y disminuye a 0,2 m en el punto de observación 1028. El nivel en el punto de observación Cuña 6 permanece prácticamente constante durante todo el periodo de simulación, mostrando únicamente las variaciones estacionales de verano - invierno de la evaporación.

En el área de Quelana el mayor descenso se observa en el punto más cercano al núcleo (SOPM-05) con un valor de 0,5 m, disminuye a 0,2 m en el punto de observación SOPM-08 y es nulo en el punto de observación Camar-2.

En el área de Soncor los mayores descensos se producen en los puntos de observación más cercanos al núcleo (L2-14 y L2-20) con valores en torno a 0,2 m y 0,3 m.

En el área Norte, los niveles se mantienen prácticamente constantes (RM-8 y C4-B), salvo por las oscilaciones naturales.

En Monturaqui en la parte alta de la cuenca no se observan descensos, y los niveles comienzan a recuperarse desde el inicio del escenario, debido al cese de las extracciones de MEL, sin embargo, al final de la simulación no se alcanzan los niveles previos a la extracción. A partir del año 2030 los niveles comienzan a recuperarse en Callejón, pero al final de la simulación no se han alcanzado los niveles previos a la extracción. En la zona de Callejón se dan los mayores descensos, con valores de 1,8 m (NEP-2), al sur de Tilopozo (ZZ1-MNT) el descenso máximo es de 0,5 m, y tan sólo de 5 cm en el punto de observación ZZ2-MNT.

Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)
La Punta-La Brava	
PN-10	0,57
L12-1	0,29
PC-1200	0,06
Peine	
2037	0,39
1028	0,18
Cuña6	0,01
Quelana	
SOPM-05	0,50
SOPM-08	0,21
Camar2	0,00
Soncor	
L2-14	0,29
L2-20	0,21
Cuña 2	0,07
L2-3	0,09
Allana	0,09
Zona Norte	
C4-B	0,14
RM-8	0,01
Monturaqui	
M-23	0,02
NEP-2	1,80
ZZ1-MNT	0,54
ZZ2-MNT	0,04

Tabla 3-9: Descensos máximos en los puntos de control por áreas de interés para el escenario 5.

Fuente: Elaboración propia

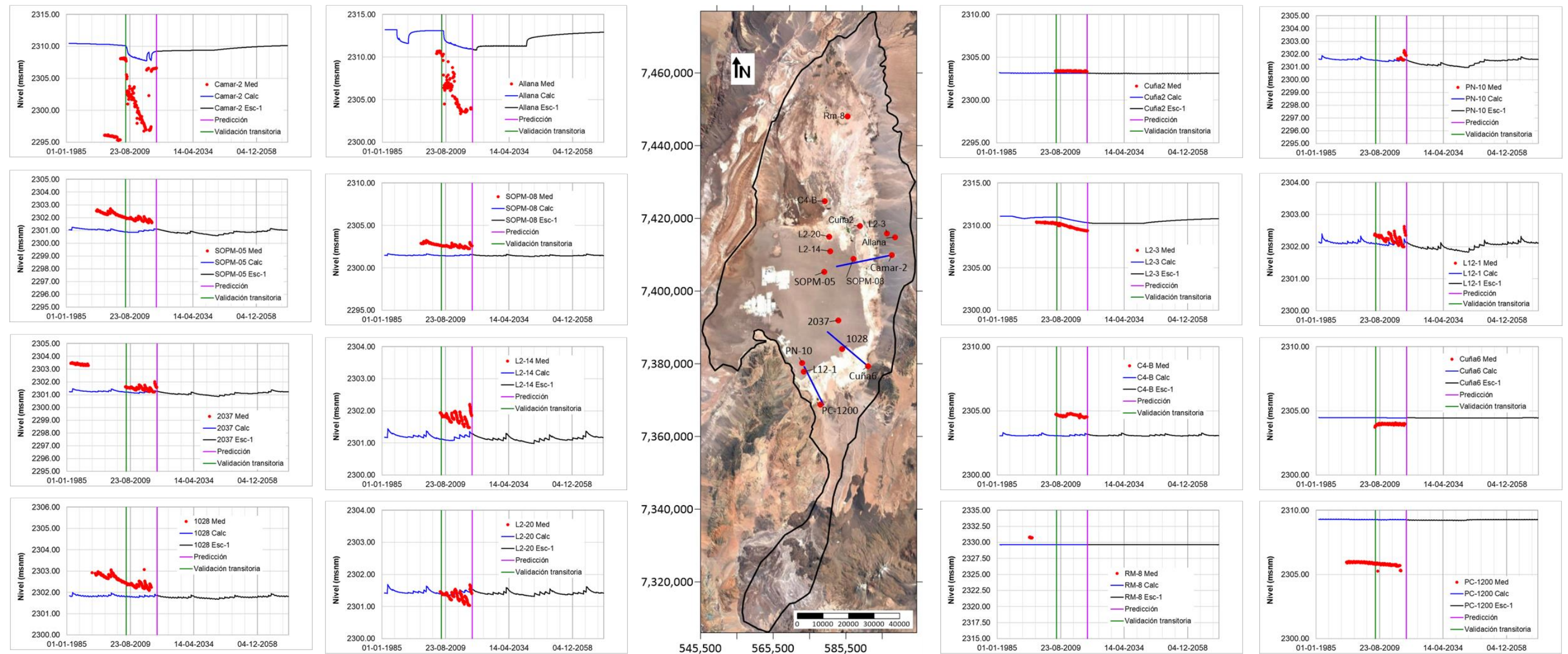
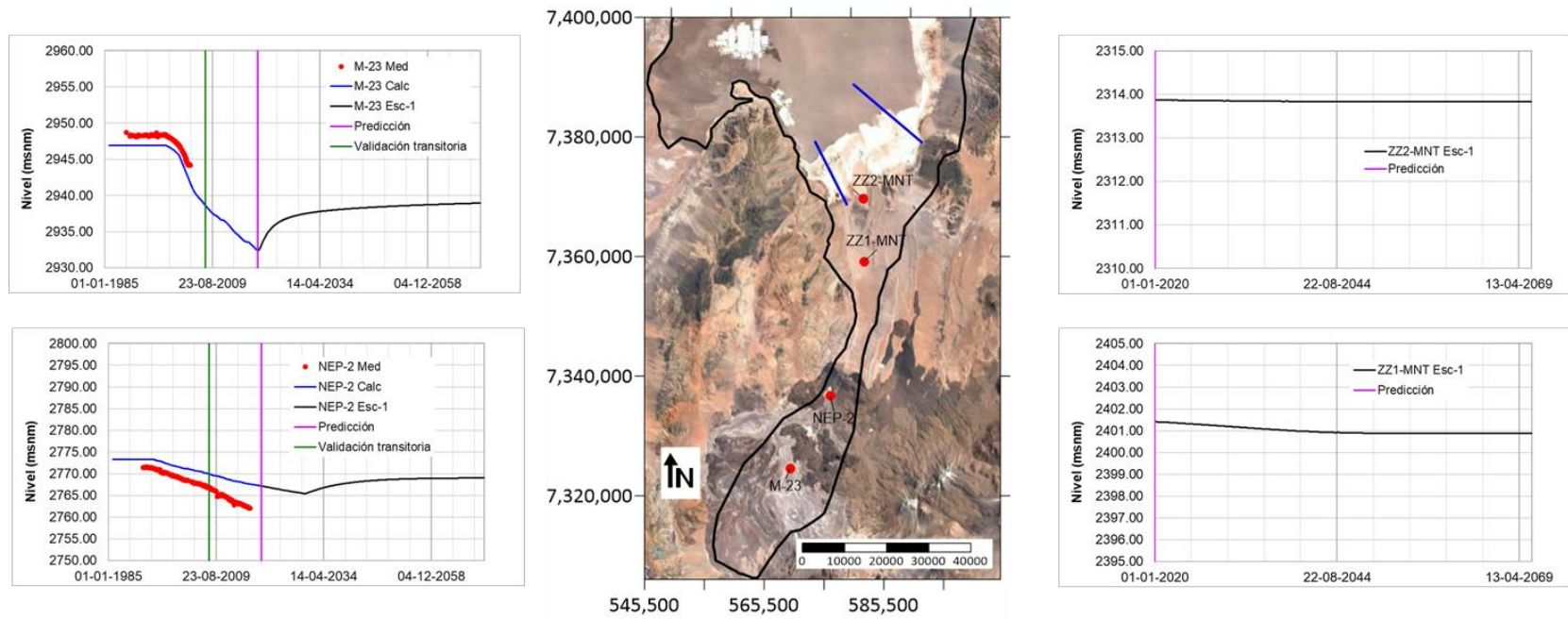


Figura 3-22: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control (PSHA) para el escenario 5.

Fuente: Elaboración propia

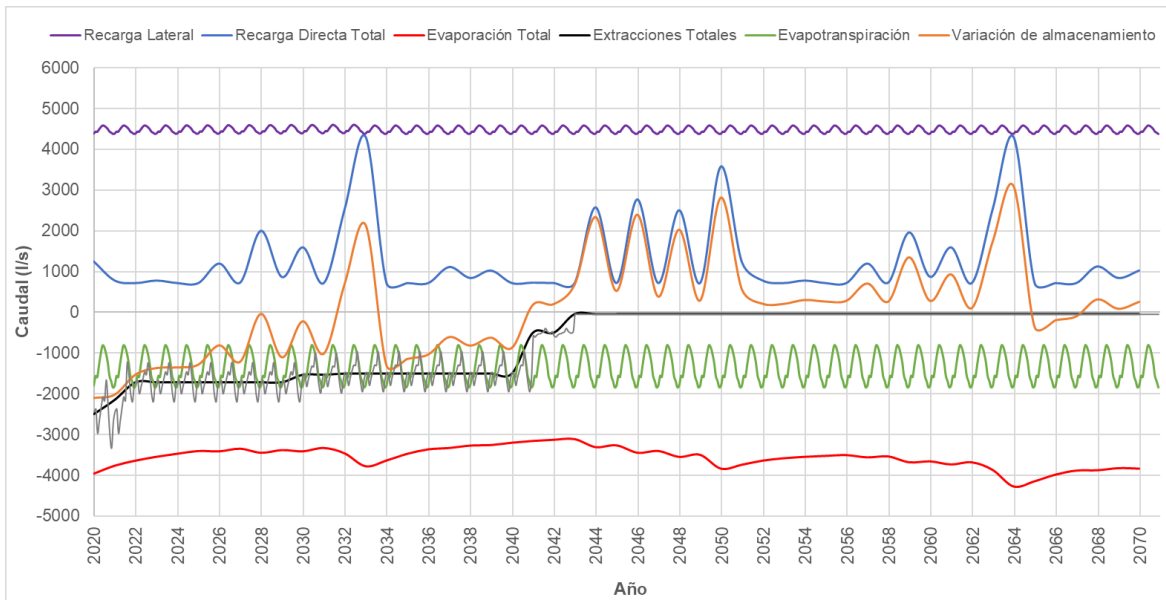




**Figura 3-23: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control para el escenario 5 en la zona de Monturaqui.**

Fuente: Elaboración propia

El balance hídrico global calculado a partir del escenario 5 se muestra en la Figura 3-24 y el promedio por décadas para cada SHAC se muestra en la Tabla 3-10.



**Figura 3-24: Resumen del balance hídrico obtenido a partir del escenario 5 mostrando las principales entradas y salidas al sistema.**

*Fuente: Elaboración propia*

Al igual que en el escenario 3, debido a la extensión de la extracción de SQM hasta 2040, la variación del almacenamiento para este escenario 5 en la década 2030-2039 es negativa, pero mayor en comparación al escenario 3 (debido a la reducción a tasa fija), con un valor de -395 L/s, siendo de -374 L/s en el N (salmuera) y de -16 L/s en el F (agua dulce). A partir del año 2040 las extracciones descienden considerablemente, lo que conlleva una recuperación y aumento de los niveles piezométricos en la cuenca, que se traduce en una variación del almacenamiento positiva e igual a 811 L/s (2040-2049), siendo de 721 L/s en el N (salmuera) y de 77 L/s en el F (agua dulce). Sin embargo, a partir de 2050, debido al aumento de la evaporación inducida por el ascenso de los niveles piezométricos, la variación de almacenamiento disminuye a 557 L/s en el periodo 2060-2070, siendo de 502 L/s en el N (salmuera) y de 46 L/s en el F (agua dulce).

La variación de almacenamiento total del periodo 2020-2070 en este escenario es positiva e igual a 86 L/s, siendo de 100 L/s en el N (salmuera) y de -14 L/s en el F (agua dulce).

Término del balance	2020-2029					2030-2039					2040-2049					2050-2059					2060-2070					2020-2070				
	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F
<b>Entradas</b>																														
Recarga Directa	51	17	14	253	642	63	18	14	693	643	59	18	14	558	643	58	18	14	511	643	61	18	14	645	643	58	18	14	534	643
Recarga Lateral	34	0	2	127	4309	34	0	2	127	4309	34	0	2	122	4309	34	0	2	122	4309	34	0	2	122	4309	34	0	2	124	4309
Recarga de otros SHACs	1774	584	1578	1482	0	1769	589	1575	1479	0	1768	613	1571	1505	0	1770	640	1570	1479	0	1772	655	1571	1452	0	1770	617	1573	1479	0
<b>Salidas</b>																														
Evaporación	746	315	1026	1446	1	748	313	1013	1352	1	736	312	1011	1244	1	740	343	1041	1487	1	748	366	1053	1717	1	744	331	1029	1454	1
EVT	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788
Extracciones	0	0	17	1433	393	0	0	17	1320	176	0	0	5	220	62	0	0	0	0	50	0	0	0	0	50	0	0	8	583	144
Descarga a otros SHACs	695	220	490	0	4012	691	220	497	0	4004	696	233	503	0	4025	694	233	478	0	4055	688	226	468	0	4067	693	226	487	0	4033
<b>Resumen</b>																														
<b>Entradas totales</b>	1859	601	1593	1863	4952	1866	607	1590	2299	4953	1861	630	1586	2185	4952	1862	658	1585	2112	4952	1867	673	1586	2219	4952	1863	635	1588	2137	4952
<b>Salidas totales</b>	1872	609	1598	2879	5193	1869	607	1591	2673	4969	1862	619	1582	1464	4876	1864	650	1584	1487	4893	1866	667	1585	1717	4906	1866	631	1588	2038	4966
<b>Variación de Almacenamiento</b>	-13	-8	-5	-1016	-241	-3	-1	-1	-374	-16	-1	12	3	721	77	-2	8	2	625	59	2	6	1	502	46	-3	3	0	100	-14

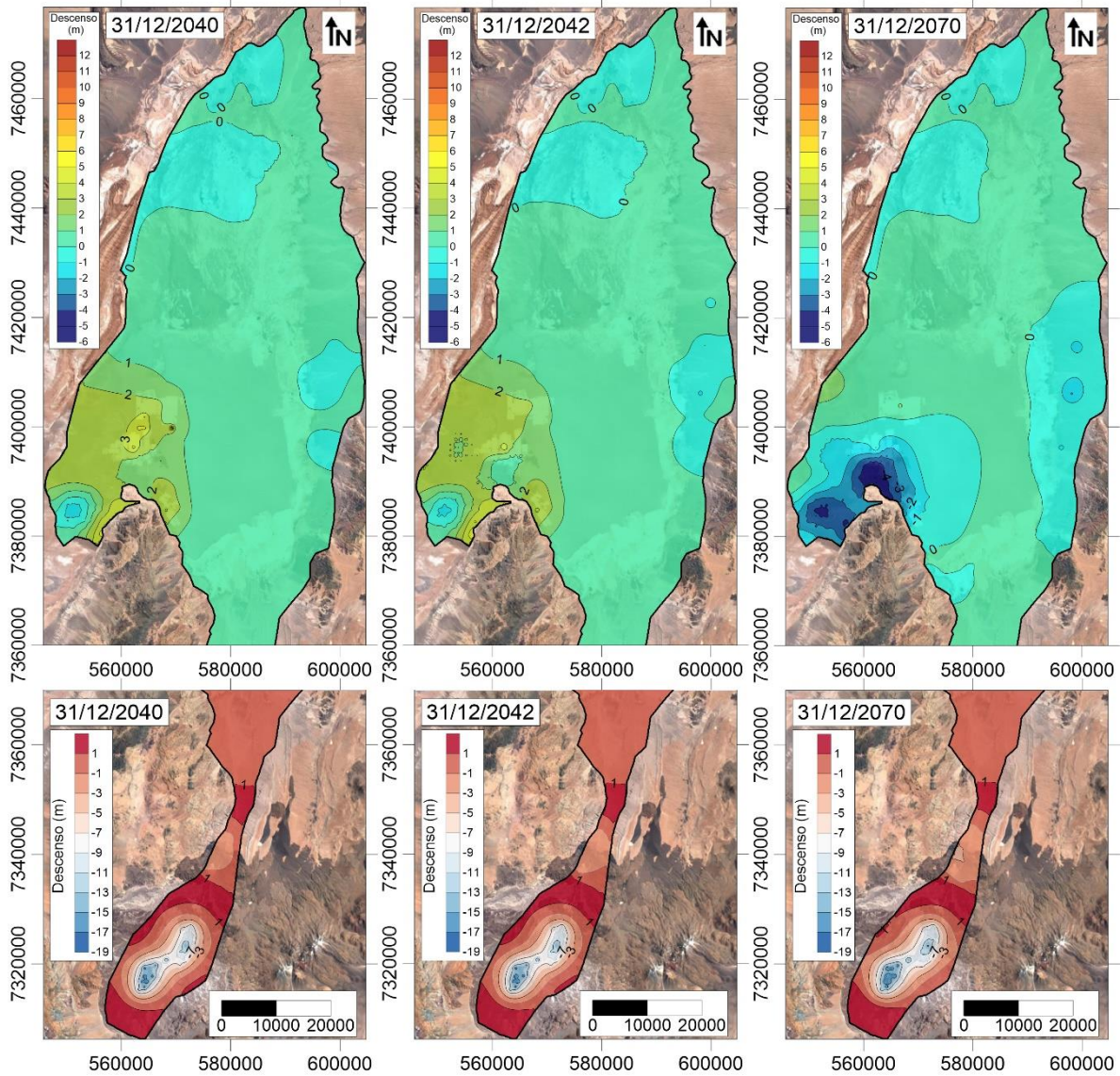
Tabla 3-10: Resultado del balance hídrico promedio por periodo (L/s) para el escenario 5.

Fuente: Elaboración propia

Nota: SHACs A, B y C corresponden a zona de mezcla, SHAC N corresponde a salmuera y SHAC F corresponde a agua dulce.

Para cuantificar el efecto de la extracción futura en la cuenca, se ha calculado el descenso con respecto a la situación inicial de diciembre de 2019 para tres períodos de la simulación: diciembre de 2040 (momento a partir del cual cesan las extracciones de SQM u otro operador), diciembre de 2042 (momento a partir del cual cesan las extracciones de Albemarle) y diciembre de 2070 (final de la simulación). La Figura 3-25 muestra la distribución del descenso producido para estas tres fechas. Los valores positivos indican descenso, mientras que los valores negativos indican un aumento de los niveles, es decir, una recuperación del acuífero.

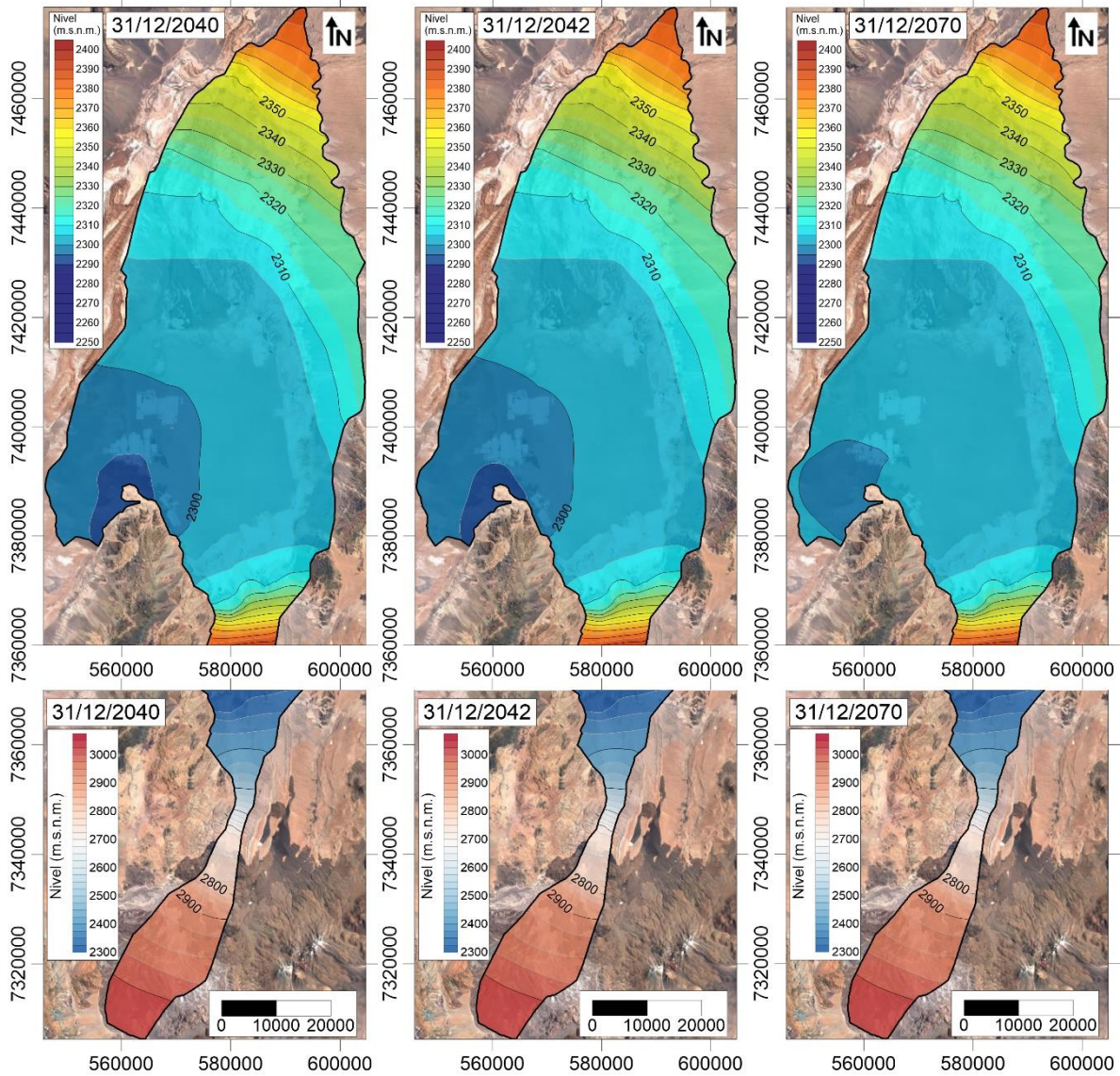
Como se observa en la Figura 3-25, los mayores descensos en el núcleo se presentan en el año 2040 producto de la extensión de la extracción de SQM u otro operador, alcanzando descensos máximos de hasta 3-4 m aproximadamente, menores a los observados en el escenario 3 (10-11 m) y similares a los del escenario 4, pero con los conos de descenso más extendidos. Para el año 2042, los descensos en el núcleo disminuyen producto del cese de la extracción de SQM u otro operador, pero continúan aumentando los descensos en la zona de extracción de Albemarle hasta los 4 m. Por otra parte, en el año 2070 se aprecia la recuperación de los niveles en la zona del Núcleo, de hasta 4-5 m con respecto a los niveles a diciembre de 2019, además se aprecian las recuperaciones en el Borde Este producto del cese de las extracciones de agua industrial.



**Figura 3-25: Descenso a partir de inicio de simulación para diciembre de 2040, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 5.**

Fuente: Elaboración propia

La Figura 3-26 muestra la piezometría calculada para diciembre de 2040, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 5.



**Figura 3-26: Piezometría para diciembre de 2040, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 5.**

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.5 Escenario 6

El escenario 6 corresponde al Caso Base (extracciones de salmuera y agua dulce/industrial aprobadas según las RCA vigentes al año 2019) más las siguientes situaciones hipotéticas (detalle de las extracciones por año en la Tabla 2-2):

- 1) Extensión de la extracción de agua industrial de CMZ hasta 2031.
- 2) Reducción gradual al 50% de la extracción de agua industrial y salmuera de SQM desde 2021 hasta 2030 (finalizando en 822 l/s para salmuera y en 120 l/s para agua industrial), y una extensión de la extracción de agua industrial y salmuera entre 2031 y 2040, por el operador de litio que gestione esta concesión minera, a una tasa fija de 822 l/s para salmuera y 120 l/s para agua industrial.

La Tabla 3-11 muestra los descensos máximos calculados en los puntos de control en las diversas áreas de interés para el escenario 6, y los niveles observados para cada punto de control se muestra en la Figura 3-27 y la Figura 3-28.

Como se observa, los descensos son levemente mayores a los del escenario 5 (tasa fija), producto de la reducción gradual durante 10 años de SQM, excepto en la zona de Monturaqui, donde estas reducciones no tienen influencia.

El descenso máximo en el área La Punta-La Brava se da en el punto de observación PN-10, con un valor de 0,6 m, que disminuye hacia el sur en el punto de observación L12-1 hasta un valor de 0,3 m y es prácticamente nulo en el punto de observación PC-1200, cuyo nivel permanece constante durante todo el período de simulación.

En el área Peine, el mayor descenso se recoge en el punto de observación más cercano al núcleo (2037) con un valor de 0,4 m y disminuye a 0,2 m en el punto de observación 1028. El nivel en el punto de observación Cuña 6 permanece prácticamente constante durante todo el periodo de simulación, mostrando únicamente las variaciones estacionales de verano - invierno de la evaporación.

En el área de Quelana el mayor descenso se observa en el punto más cercano al núcleo (SOPM-05) con un valor de 0,6 m, disminuye a 0,2 m en el punto de observación SOPM-08 y es nulo en el punto de observación Camar-2.

En el área de Soncor los mayores descensos se producen en los puntos de observación más cercanos al núcleo (L2-14 y L2-20) con valores en torno a 0,2 m y 0,3 m.

En el área Norte, los niveles se mantienen prácticamente constantes (RM-8 y C4-B), salvo por las oscilaciones naturales.

En Monturaqui, en la parte alta de la cuenca (zona de MEL) no se observan descensos, y los niveles comienzan a recuperarse desde el inicio del escenario, debido al cese de las extracciones de MEL, sin embargo, al final de la simulación no se alcanzan los niveles previos a la extracción. En la zona de Callejón se dan los mayores descensos, con valores de 1,8 m (NEP-2), al sur de Tilopozo (ZZ1-MNT) el descenso máximo es de 0,5 m, y tan sólo de 5 cm en el punto de observación ZZ2-MNT.



Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)
La Punta-La Brava	
PN-10	0,60
L12-1	0,31
PC-1200	0,07
Peine	
2037	0,42
1028	0,19
Cuña6	0,01
Quelana	
SOPM-05	0,55
SOPM-08	0,23
Camar2	0,00
Soncor	
L2-14	0,31
L2-20	0,22
Cuña 2	0,07
L2-3	0,15
Allana	0,12
Zona Norte	
C4-B	0,14
RM-8	0,01
Monturaqui	
M-23	0,02
NEP-2	1,80
ZZ1-MNT	0,54
ZZ2-MNT	0,04

Tabla 3-11: Descensos máximos en los puntos de control por áreas de interés para el escenario 6.

Fuente: Elaboración propia

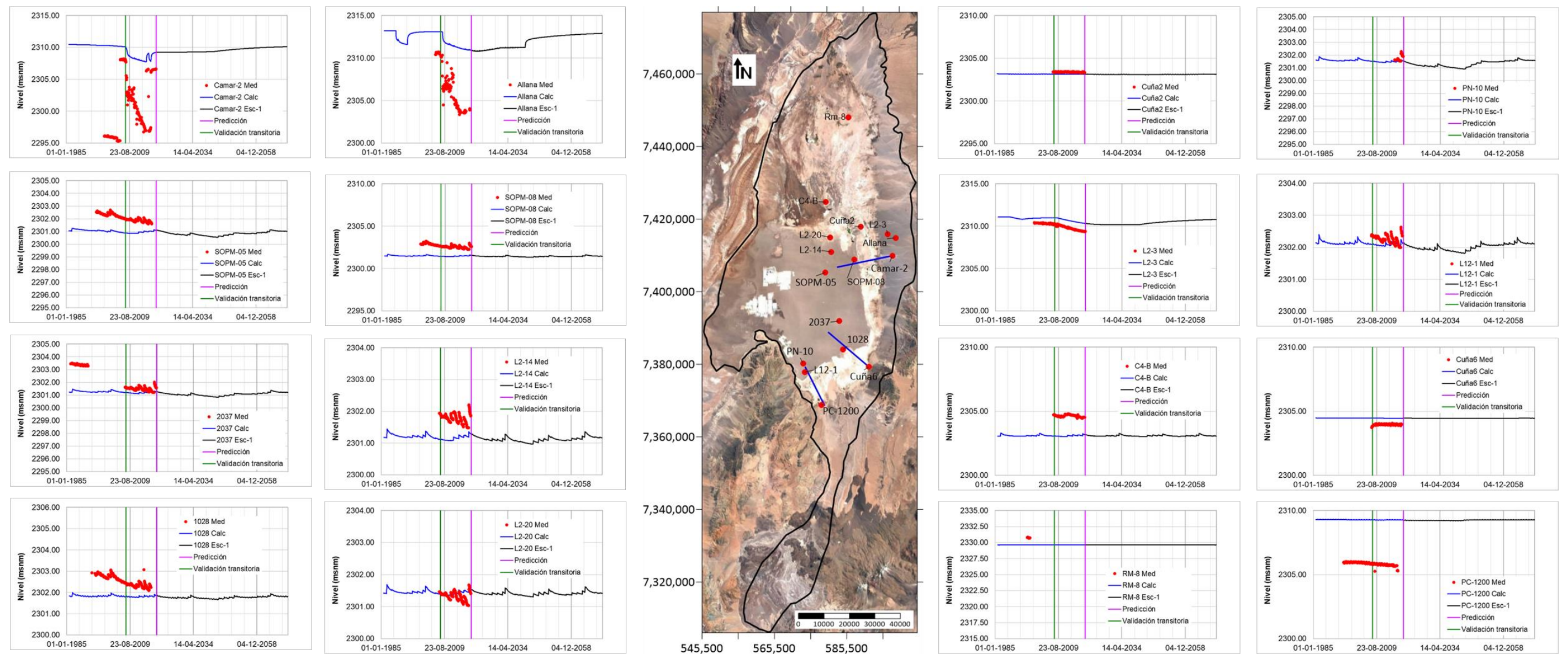
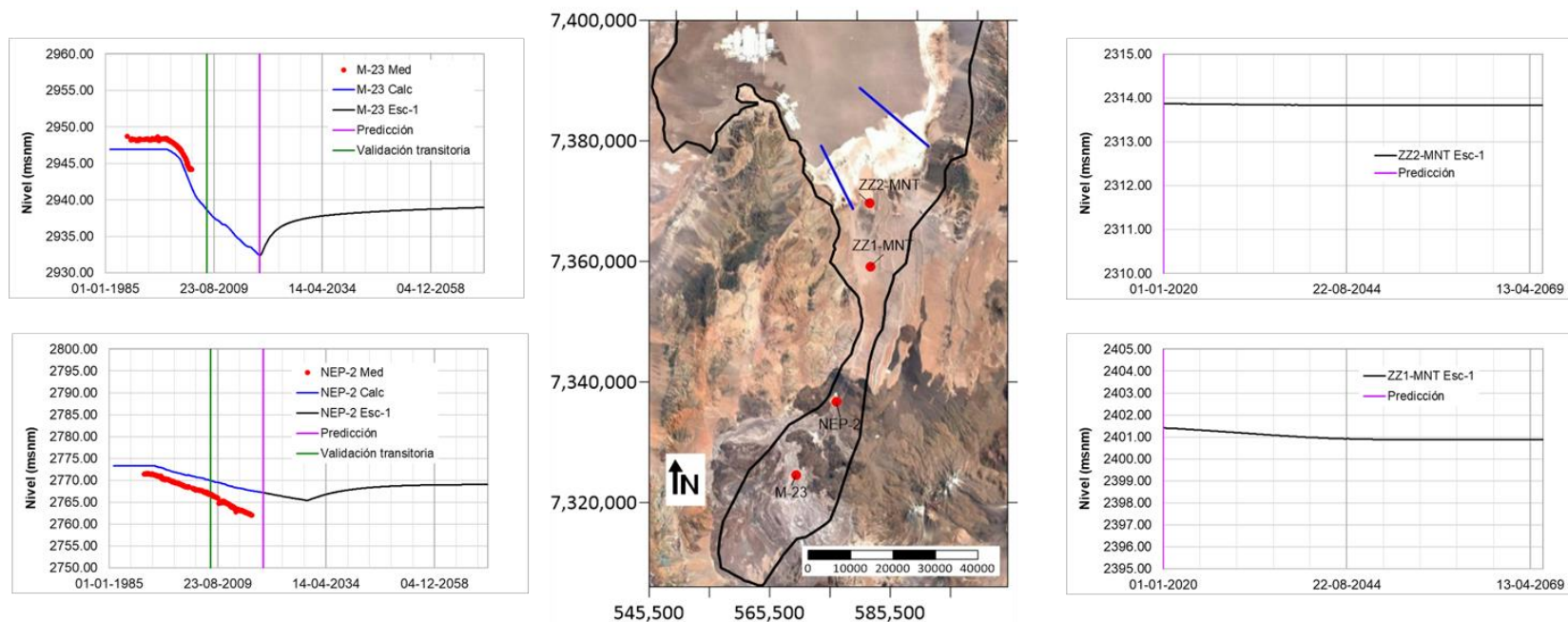


Figura 3-27: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control (PSHA) para el escenario 6.

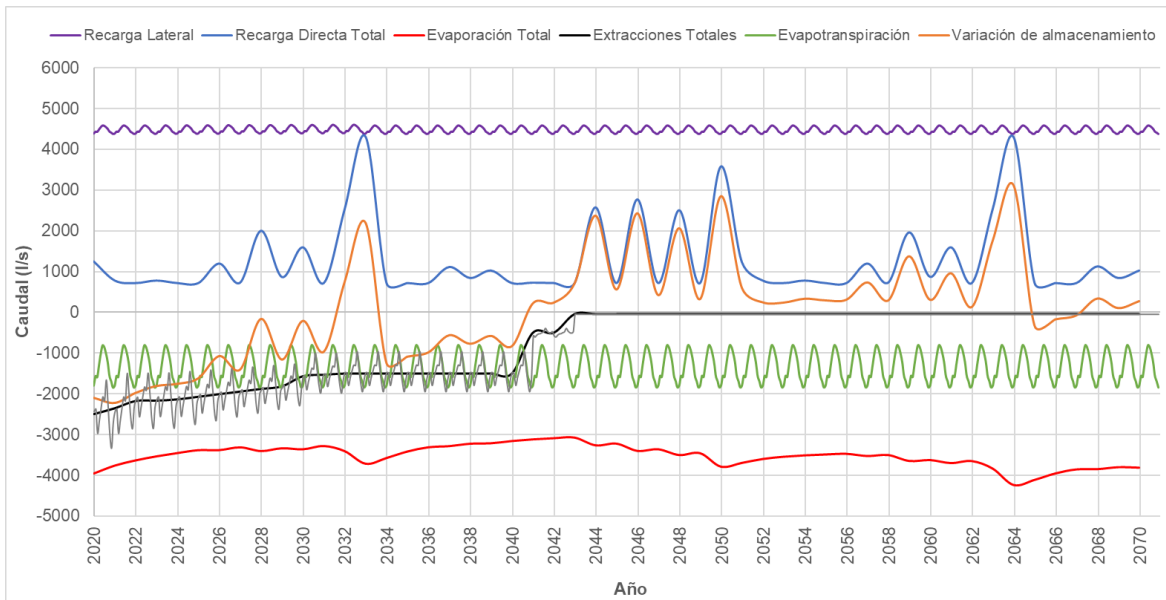
Fuente: Elaboración propia



**Figura 3-28: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control para el escenario 6 en la zona de Monturaqui.**

Fuente: Elaboración propia

El balance hídrico global calculado a partir del escenario 6 se muestra en la Figura 3-29 y el promedio por décadas para cada SHAC se muestra en la Tabla 3-12.



**Figura 3-29: Resumen del balance hídrico obtenido a partir del escenario 6 mostrando las principales entradas y salidas al sistema.**

Fuente: Elaboración propia

El balance es bastante similar al del escenario 5, con la diferencia de la introducción en este escenario 6, de la disminución gradual durante 10 años de la extracción de SQM en comparación a la tasa fija, lo que genera que en la década de 2020-2029 la variación de almacenamiento sea de -1.531 L/s (menor a los -1.283 L/s del escenario 5), siendo de -1.237 L/s en el N (salmuera) y de -263 L/s en el F (agua dulce). Debido a la extensión de la extracción de SQM hasta 2040, la variación del almacenamiento para la década 2030-2039 se mantiene negativa, con un valor de -348 L/s, siendo de -334 L/s en el N (salmuera) y de -9 L/s en el F (agua dulce). A partir del año 2040 las extracciones descienden considerablemente, lo que conlleva una recuperación y aumento de los niveles piezométricos en la cuenca, que se traduce en una variación del almacenamiento positiva e igual a 853 L/s (2040-2049), siendo de 757 L/s en el N (salmuera) y de 81 L/s en el F (agua dulce). Sin embargo, a partir de 2050, debido al aumento de la evaporación inducida por el ascenso de los niveles piezométricos, la variación de almacenamiento disminuye a

584 L/s en el periodo 2060-2070, siendo de 526 L/s en el N (salmuera) y de 49 L/s en el F (agua dulce).

La variación de almacenamiento total del periodo 2020-2070 en este escenario es positiva e igual a 67 L/s, siendo de 83 L/s en el N (salmuera) y de -15 L/s en el F (agua dulce).

Para cuantificar el efecto de la extracción futura en la cuenca, se ha calculado el descenso con respecto a la situación inicial de diciembre de 2019 para tres períodos de la simulación: diciembre de 2040 (momento en el cesan las extracciones de SQM u otro operador), diciembre de 2042 (momento a partir del cual cesan las extracciones de Albemarle) y diciembre de 2070 (final de la simulación). La Figura 3-30 muestra la distribución espacial del descenso producido para esta fecha. Los valores positivos indican descenso, mientras que los valores negativos indican un aumento de los niveles, es decir, una recuperación del acuífero.

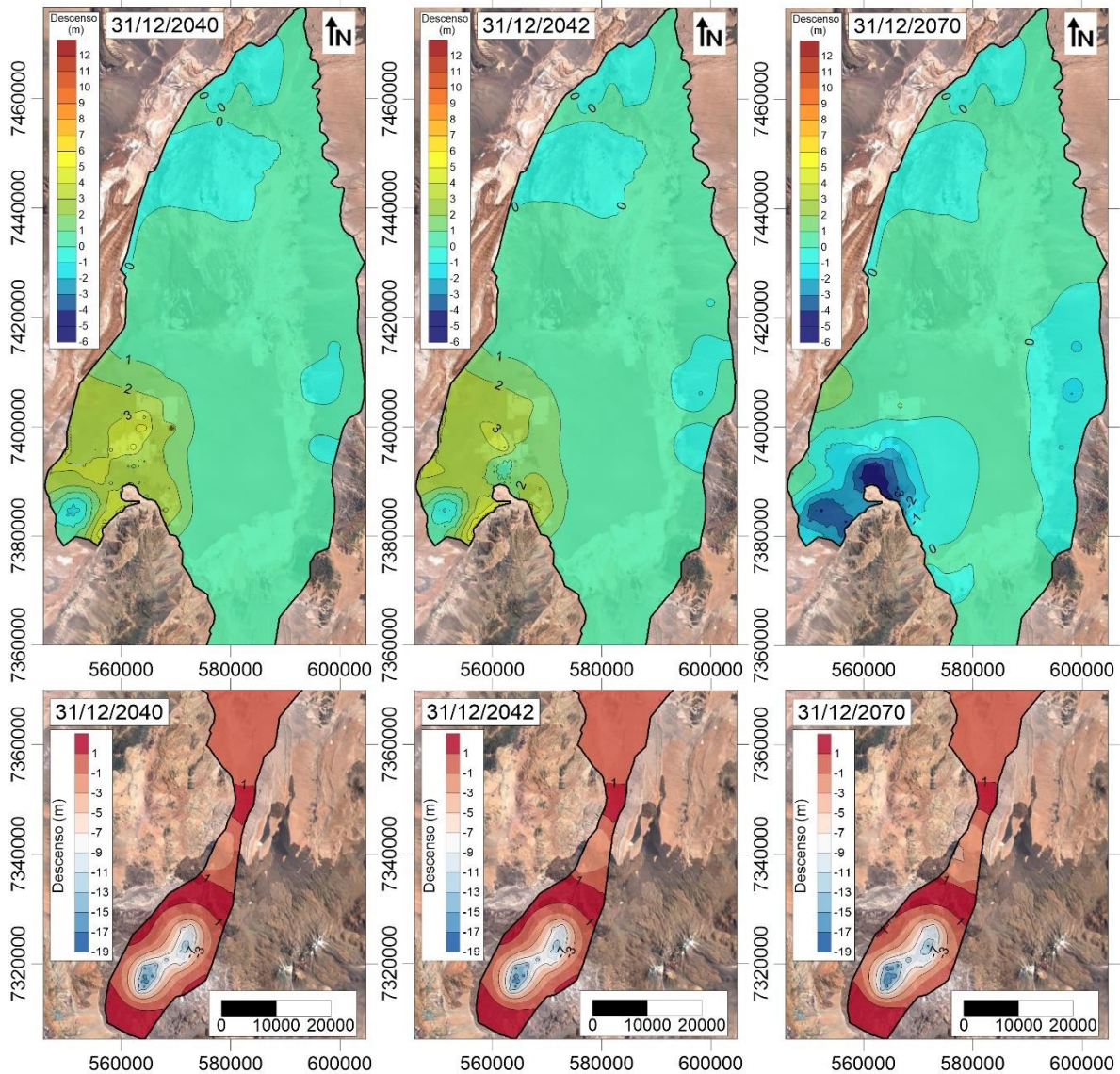
Como se observa en la Figura 3-30, los mayores descensos en el núcleo se presentan en el año 2040 producto de la extensión de la extracción de SQM u otro operador, alcanzando descensos máximos de hasta 3-4 m aproximadamente, similares a los del escenario 5, pero con los conos de descenso más extendidos producto de la disminución gradual. Para el año 2042, los descensos en el núcleo disminuyen producto del cese de la extracción de SQM u otro operador, pero continúan aumentando los descensos en la zona de extracción de Albemarle hasta los 4 m. Por otra parte, en el año 2070 se aprecia la recuperación de los niveles en la zona del Núcleo, de hasta 4 m con respecto a los niveles a diciembre de 2019, además se aprecian las recuperaciones en el Borde Este producto del cese de las extracciones de agua industrial.

Término del balance	2020-2029					2030-2039					2040-2049					2050-2059					2060-2070					2020-2070				
	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F
<b>Entradas</b>																														
Recarga Directa	51	17	14	253	642	63	18	14	693	643	59	18	14	558	643	58	18	14	511	643	61	18	14	645	643	58	18	14	534	643
Recarga Lateral	34	0	2	127	4309	34	0	2	127	4309	34	0	2	122	4309	34	0	2	122	4309	34	0	2	122	4309	34	0	2	124	4309
Recarga de otros SHACs	1773	577	1578	1482	0	1768	582	1574	1482	0	1767	610	1571	1510	0	1769	638	1570	1481	0	1771	653	1570	1453	0	1770	613	1573	1481	0
<b>Salidas</b>																														
Evaporación	746	312	1026	1429	1	746	306	1011	1312	1	735	307	1008	1212	1	739	340	1040	1458	1	747	364	1052	1694	1	743	327	1028	1426	1
EVT	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788
Extracciones	0	0	17	1671	422	0	0	17	1324	177	0	0	5	220	62	0	0	0	0	50	0	0	0	0	50	0	0	8	630	150
Descarga a otros SHACs	696	219	491	0	4004	692	220	499	0	3997	696	234	505	0	4021	694	233	480	0	4052	688	227	468	0	4065	693	227	488	0	4028
<b>Resumen</b>																														
<b>Entradas totales</b>	1858	594	1593	1862	4952	1865	600	1589	2302	4953	1860	627	1586	2190	4952	1861	656	1585	2114	4952	1867	671	1585	2220	4952	1862	631	1588	2139	4952
<b>Salidas totales</b>	1872	605	1598	3100	5215	1868	600	1591	2636	4962	1861	615	1582	1432	4872	1863	647	1584	1458	4890	1865	665	1585	1694	4904	1866	627	1588	2057	4967
<b>Variación de Almacenamiento</b>	-14	-12	-5	-1237	-263	-3	0	-2	-334	-9	-1	13	3	757	81	-2	9	2	657	62	2	6	1	526	49	-4	3	0	83	-15

Tabla 3-12: Resultado del balance hídrico promedio por periodo (L/s) para el escenario 6.

Fuente: Elaboración propia

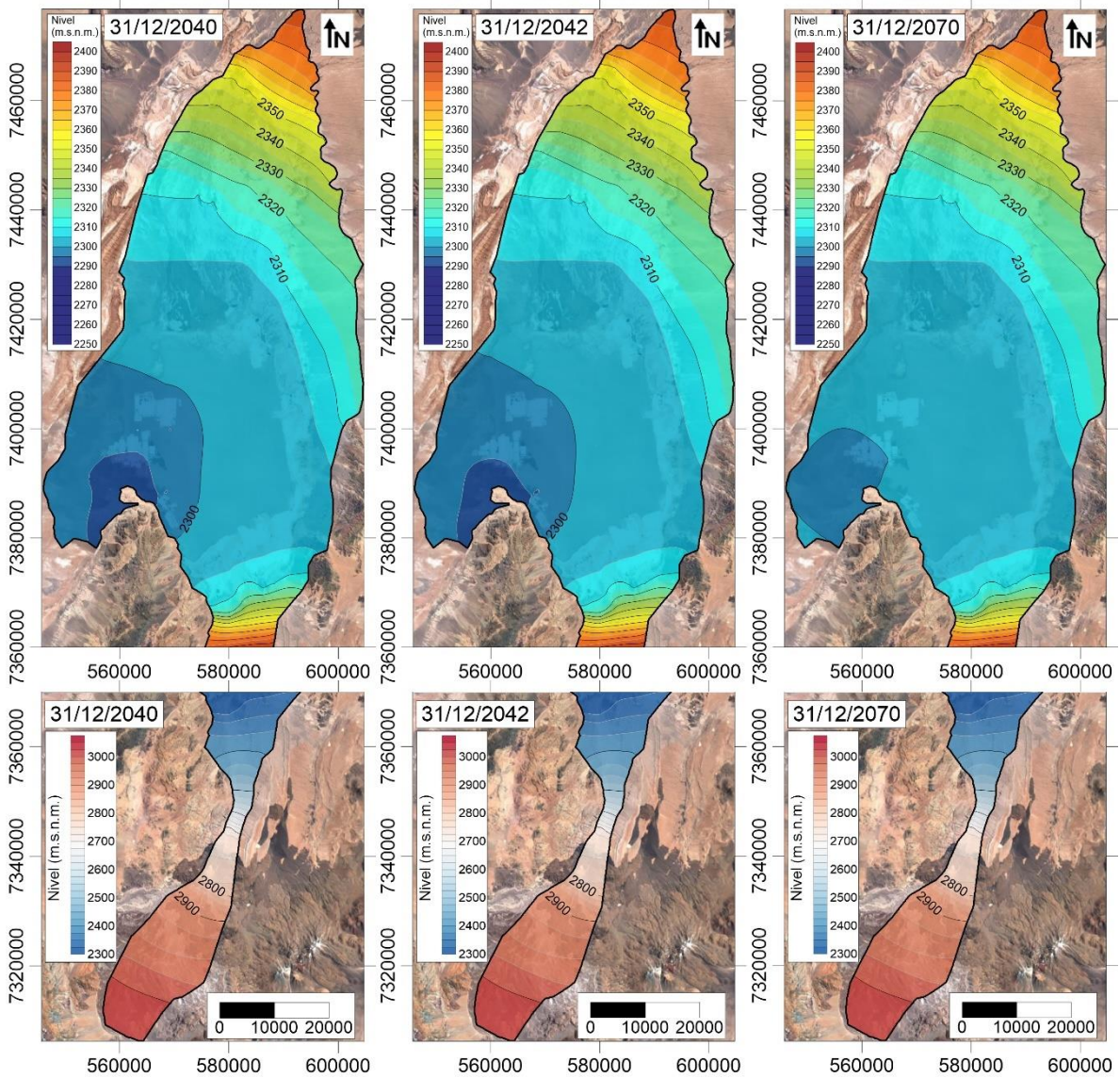
Nota: SHACs A, B y C corresponden a zona de mezcla, SHAC N corresponde a salmuera y SHAC F corresponde a agua dulce.



**Figura 3-30: Descenso a partir de inicio de simulación para diciembre de 2040, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 6.**

Fuente: Elaboración propia

La Figura 3-31 muestra la piezometría para diciembre de 2040, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 6.



**Figura 3-31: Piezometría para julio de 2042, diciembre de 2052 y diciembre de 2070 para el escenario 6.**

Fuente: Elaboración propia



### 3.2.6 Escenario 7

El escenario 7 corresponde al Caso Base (extracciones de salmuera y agua dulce/industrial aprobadas según las RCA vigentes al año 2019) más las siguientes situaciones hipotéticas (detalle de las extracciones por año en la Tabla 2-2):

- 1) Extensión de la extracción de agua industrial de CMZ hasta 2031.
- 2) Reducción de la recarga producto del cambio climático en 15% entre los años 2020 y 2044, y en 18% entre 2045 a 2070, de acuerdo con el análisis presentado en el capítulo 2.2.

Las funciones de tiempo de la recarga para este escenario se muestran en la Figura 2-1 y Figura 2-2.

La Tabla 3-13 muestra los descensos máximos calculados en los puntos de control en las diversas áreas de interés para el escenario 7, y los niveles observados para cada punto de control se muestra en la Figura 3-32 y la Figura 3-33.

Debido a la disminución en la recarga, los descensos observados son mayores que los obtenidos en el escenario 2, principalmente en la zona Norte alta, en los puntos más cercanos al Borde Este y en los puntos de Monturaqui.

En el área La Punta-La Brava se observa en el punto PN-10 un descenso máximo de 0,6 m. Dicho descenso disminuye hacia el sur en el punto de observación L12-1 hasta un valor de 0,3 m y es de 0,2 m en el pozo PC-1200.

En el área Peine, el mayor descenso se recoge en el punto de observación más cercano al núcleo (2037) con un valor de prácticamente de 0,4 m y disminuye a 0,2 m en el punto de observación 1028. En el punto de observación Cuña 6 se observa un descenso de 0,1 m.

En el área de Quelana el mayor descenso se observa en el punto más cercano al núcleo (SOPM-05) con un valor de 0,5 m, disminuyendo a 0,2 m en el punto de observación SOPM-08, mientras que en Camar 2 es de 0,4 m.

En el área de Soncor se observan descensos en los puntos de observación hacia el núcleo (L2-14 y L2-20) de entre 0,2 y 0,3 m por la extracción de salmuera y hacia el Borde Este (Allana y L2,3) con valores entre a 0,4 y 0,7 m, debido a la disminución de la recarga.

En el área Norte, los niveles se mantienen prácticamente constantes en el pozo C4-B, salvo por las oscilaciones naturales, mientras que en el pozo RM-8 se observan descensos de 1,7 m.

En Monturaqui no se observa descenso en la parte más alta de la cuenca, debido a que los niveles se comienzan a recuperar desde el inicio del escenario, por el cese de las extracciones de MEL, sin embargo, al final de la simulación no se alcanzan los niveles previos a la extracción. En la zona de Callejón se observa un descenso máximo de 2,1 m (NEP-2), de 3,1 m (ZZ1-MNT) al sur de Tilopozo y de 0,5 m (ZZ2-MNT) debido a las extracciones de CMZ y a la disminución de la recarga.

Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)
La Punta-La Brava	
PN-10	0,62
L12-1	0,32
PC-1200	0,17
Peine	
2037	0,40
1028	0,20
Cuña6	0,12
Quelana	
SOPM-05	0,53
SOPM-08	0,22
Camar2	0,36
Soncor	
L2-14	0,28
L2-20	0,20
Cuña 2	0,09
L2-3	0,44
Allana	0,70
Zona Norte	
C4-B	0,14
RM-8	1,74
Monturaqui	
M-23	0,02
NEP-2	2,07
ZZ1-MNT	3,10
ZZ2-MNT	0,47

Tabla 3-13: Descensos máximos en los puntos de control por áreas de interés para el escenario 7.

Fuente: Elaboración propia

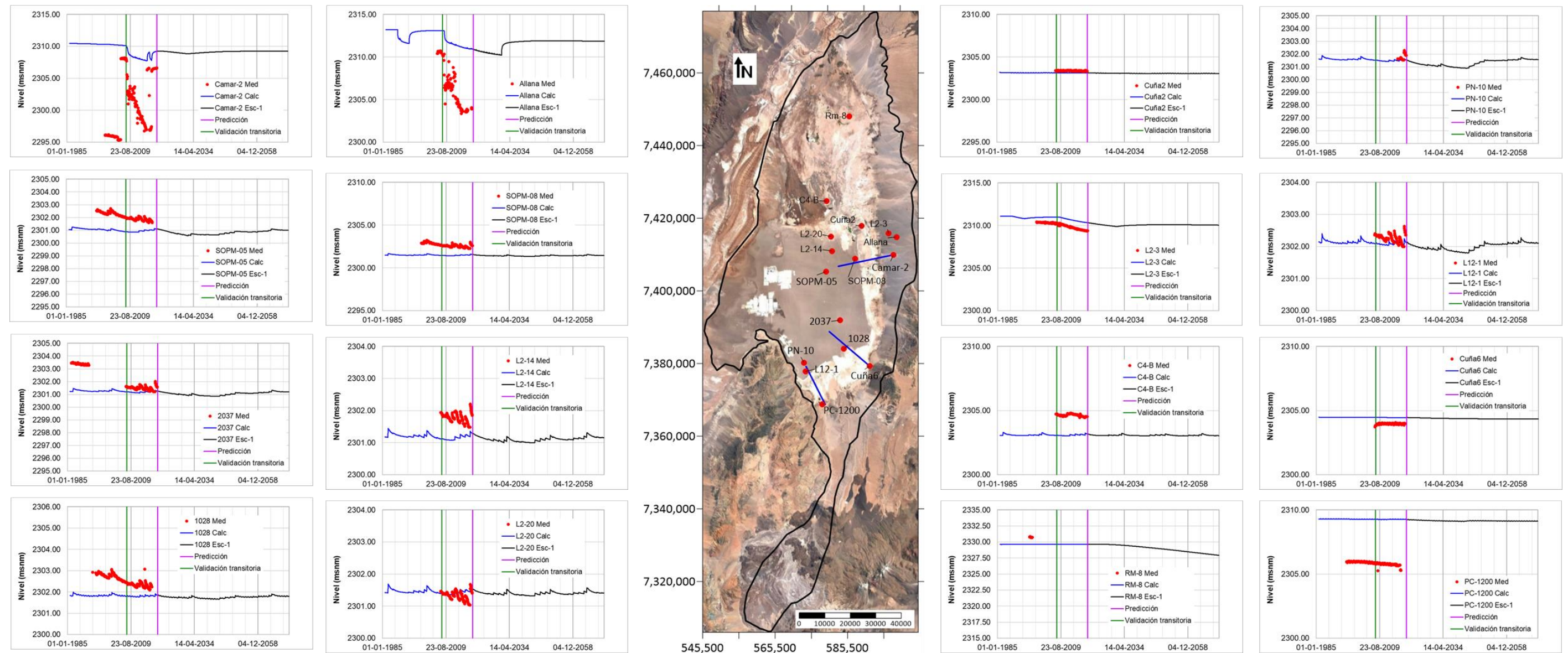
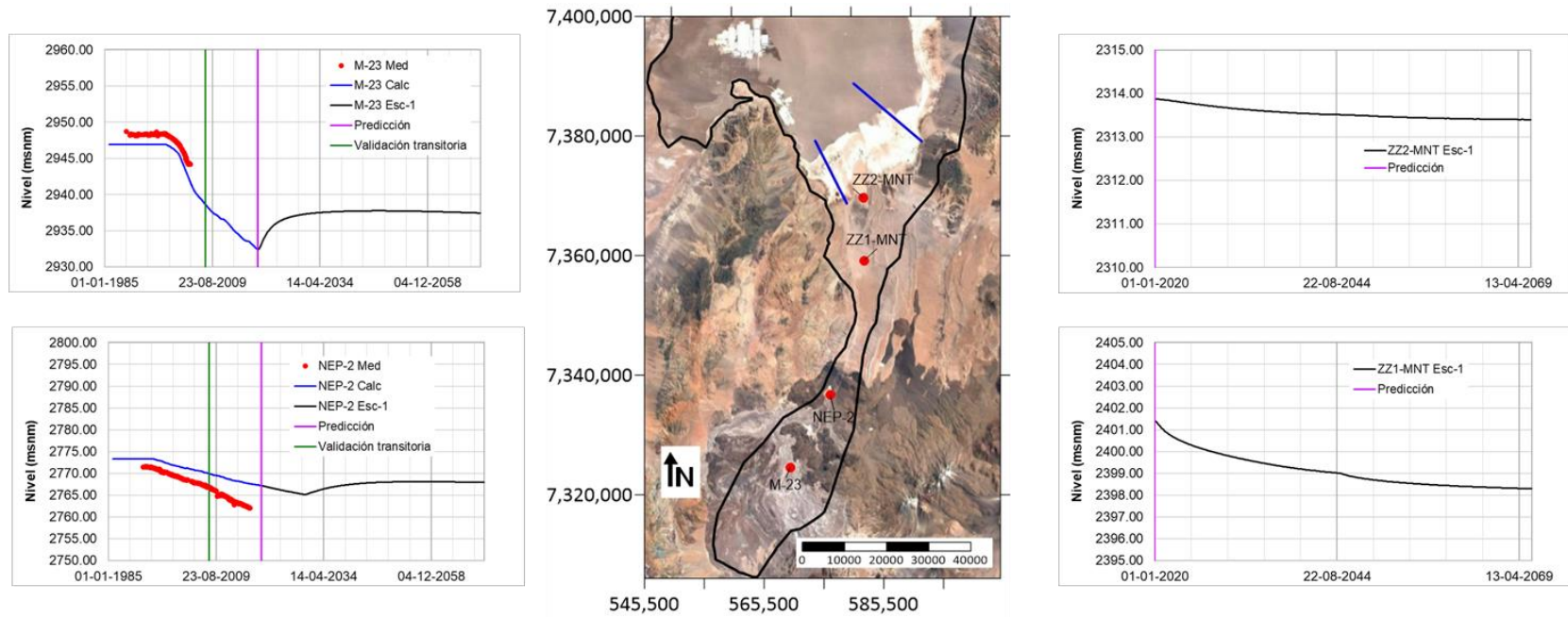


Figura 3-32: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control (PSHA) para el escenario 7.

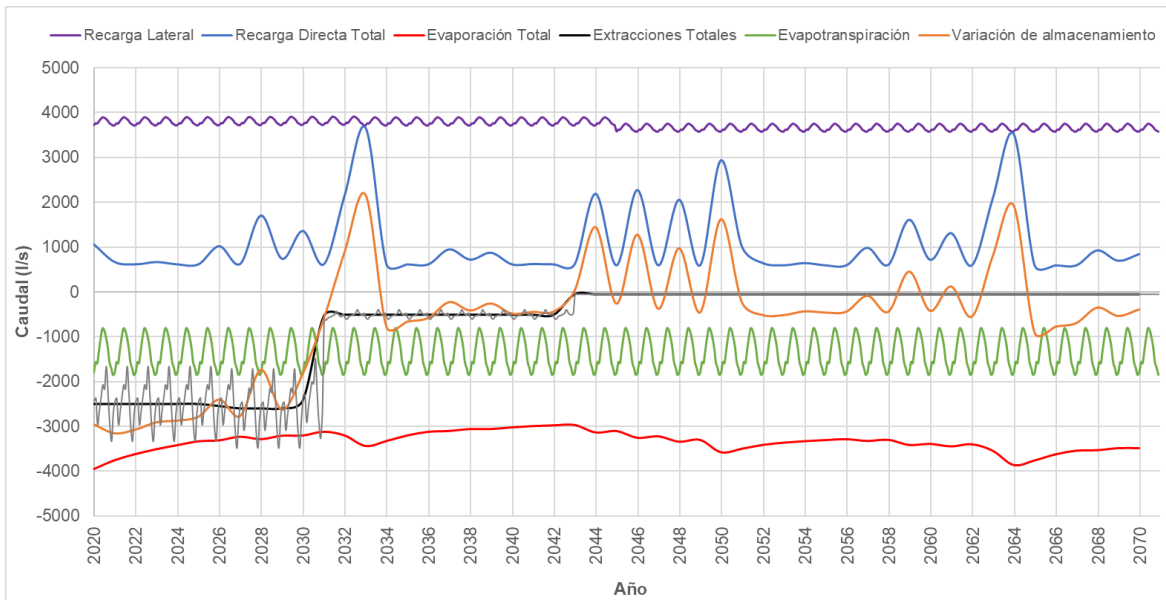
Fuente: Elaboración propia



**Figura 3-33: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control para el escenario 7 en la zona de Monturaqui.**

Fuente: Elaboración propia

El balance hídrico global calculado a partir del escenario 7 se muestra en la Figura 3-34 y el promedio por décadas para cada SHAC se muestra en la Tabla 3-14.



**Figura 3-34: Resumen del balance hídrico obtenido a partir del escenario 7 mostrando las principales entradas y salidas al sistema.**

Fuente: Elaboración propia

Para el escenario 7 se obtiene una variación de almacenamiento de -2.719 L/s para la década de 2020-2029, significativamente menor que el escenario 2, debido a la disminución en la recarga (que impacta principalmente a los SHACs F y A), siendo de -1.675 L/s en el N (salmuera), de -874 L/s en el F (agua dulce) y de -130 L/s en el A. Para la década de 2030-2039, a diferencia del escenario 2, la variación de almacenamiento sigue siendo negativa e igual a -224 L/s, compuesta de 347 L/s en el N (salmuera), -359 L/s en el F (agua dulce) y de -204 L/s en el A. En la década de 2040-2049 las extracciones de Albemarle cesan, lo que conlleva una recuperación y aumento de los niveles piezométricos en la cuenca, provocando que la variación de almacenamiento sea positiva e igual a 130 L/s, siendo de 712 L/s en el N (salmuera), de -366 en el F (agua dulce) y de -223 L/s en el A. Sin embargo, tanto para la década de 2050-2059 como para el periodo de 2060-2070, se obtienen valores negativos para la variación de almacenamiento (que son positivos en el escenario 2) y es de -158 L/s para el periodo de 2060-2070, siendo de 419 L/s en el N (salmuera), de -338 L/s en el F (agua dulce) y de -240 L/s en el A. Este cambio es debido a

que el aumento de evaporación por el ascenso de los niveles al cesar las extracciones supera a la recarga que es menor por el cambio climático.

La variación de almacenamiento total del periodo 2020-2070 en este escenario es negativa e igual a -606 L/s, siendo de 72 L/s en el N (salmuera), de -460 L/s en el F (agua dulce) y de -210 L/s en el A.

Para cuantificar el efecto de la extracción futura en la cuenca, se ha calculado el descenso con respecto a la situación inicial de diciembre de 2019 para tres períodos de la simulación: diciembre de 2030 (momento a partir del cual cesan las extracciones de SQM), diciembre de 2042 (momento en el que cesan las extracciones de Albemarle), y diciembre de 2070 (final de la simulación). La Figura 3-35 muestra la distribución del descenso producido para estas tres fechas. Los valores positivos indican descenso, mientras que los valores negativos indican un aumento de los niveles, es decir, una recuperación del acuífero.

Como se observa en la Figura 3-35, los descensos en el núcleo del salar son similares a los del escenario 2, al año 2030 debido a la extracción de SQM, se observan descensos de aproximadamente 6-7 m. A diferencia del escenario 2, se observan descensos importantes en la zona Norte de hasta 1,74 m, parte del Borde Este y en el sector Callejón para el año 2030, los cuales se acentúan para los años 2042 y 2070, debido a la disminución de la recarga. Por otra parte, en el año 2070, se aprecia la recuperación de los niveles en la zona del Núcleo y algunos sectores del Borde Este, producto del cese de las extracciones de salmuera y agua industrial.

Cabe hacer presente que la simulación de cambio climático depende fuertemente de los datos de precipitación y recarga impuestos, por lo que la elección de otras series de dato ya sea mayores o menores, pueden producir resultados de descenso y balance diferentes a los aquí presentados.

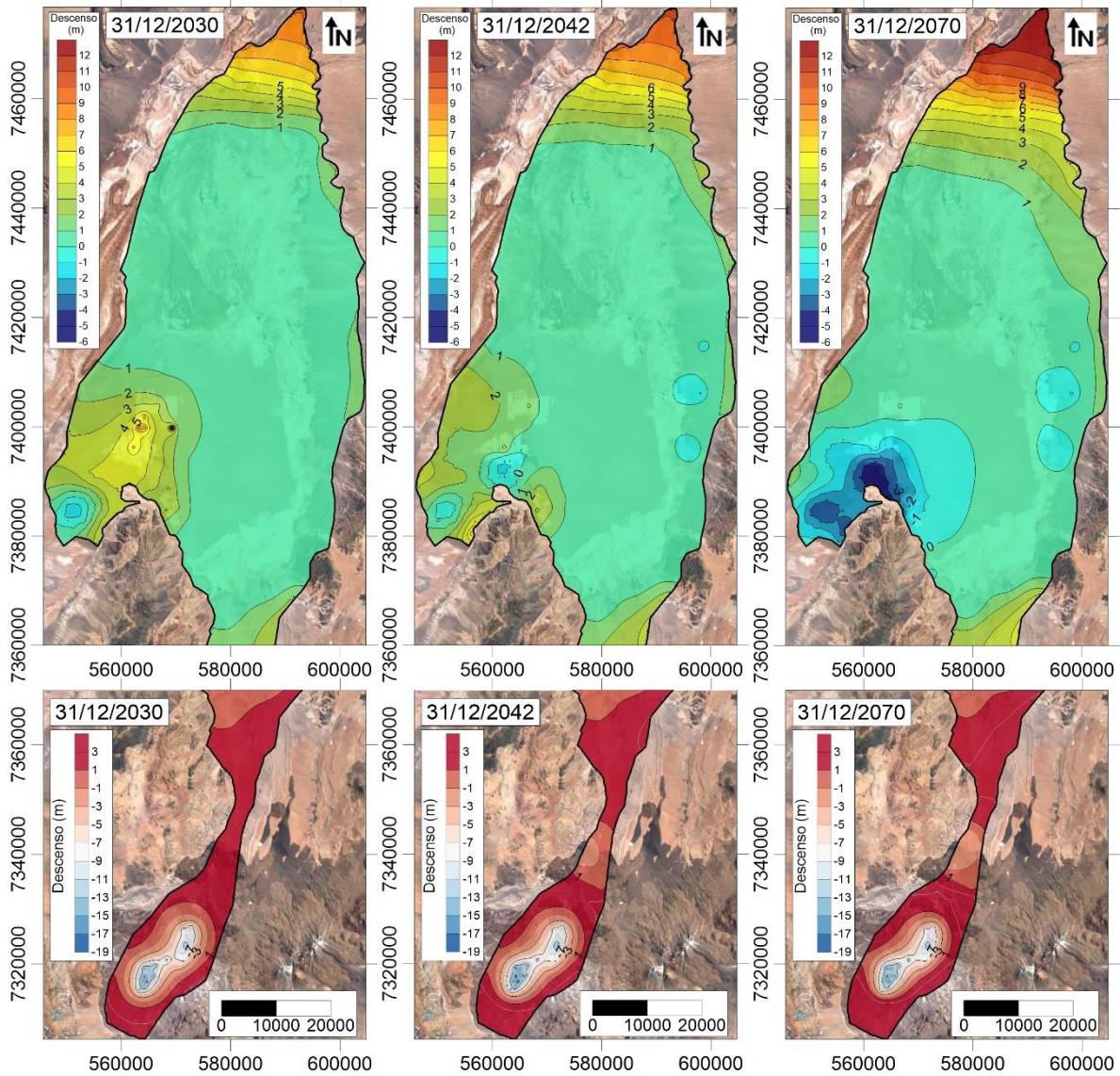
Término del balance	2020-2029					2030-2039					2040-2049					2050-2059					2060-2070					2020-2070				
	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F
<b>Entradas</b>																														
Recarga Directa	43	15	11	215	546	53	15	11	589	547	49	15	11	463	537	47	14	11	419	527	50	15	11	529	527	49	15	11	445	537
Recarga Lateral	29	0	1	108	3663	29	0	1	108	3663	29	0	1	102	3598	28	0	1	100	3534	28	0	1	100	3534	29	0	1	104	3597
Recarga de otros SHACs	1666	559	1549	1479	0	1562	563	1508	1484	0	1519	584	1486	1493	0	1471	585	1469	1449	0	1446	585	1461	1417	0	1531	575	1494	1463	0
<b>Salidas</b>																														
Evaporación	743	306	1007	1400	1	727	283	948	1223	1	700	290	928	1213	1	682	304	946	1445	1	663	310	947	1626	1	702	299	955	1386	1
EVT	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788
Extracciones	0	0	17	2077	443	0	0	17	611	74	0	0	5	132	50	0	0	0	0	50	0	0	0	0	50	0	0	8	553	132
Descarga a otros SHACs	696	216	490	0	3851	692	218	501	0	3706	690	228	502	0	3663	682	221	473	0	3599	671	214	463	0	3560	686	219	485	0	3674
<b>Resumen</b>																														
<b>Entradas totales</b>	1739	574	1562	1802	4209	1645	578	1521	2181	4210	1597	599	1498	2058	4135	1546	600	1482	1969	4061	1524	599	1473	2046	4061	1608	590	1506	2012	4134
<b>Salidas totales</b>	1869	596	1579	3478	5083	1849	575	1531	1834	4569	1820	592	1499	1346	4501	1795	598	1483	1445	4437	1764	598	1474	1626	4399	1818	592	1512	1940	4594
<b>Variación de Almacenamiento</b>	-130	-22	-17	-1675	-874	-204	3	-10	347	-359	-223	7	0	712	-366	-248	1	-2	523	-376	-240	2	-1	419	-338	-210	-2	-6	72	-460

Tabla 3-14: Resultado del balance hídrico promedio por periodo (L/s) para el escenario 7.

Fuente: Elaboración propia

Nota: SHACs A, B y C corresponden a zona de mezcla, SHAC N corresponde a salmuera y SHAC F corresponde a agua dulce.

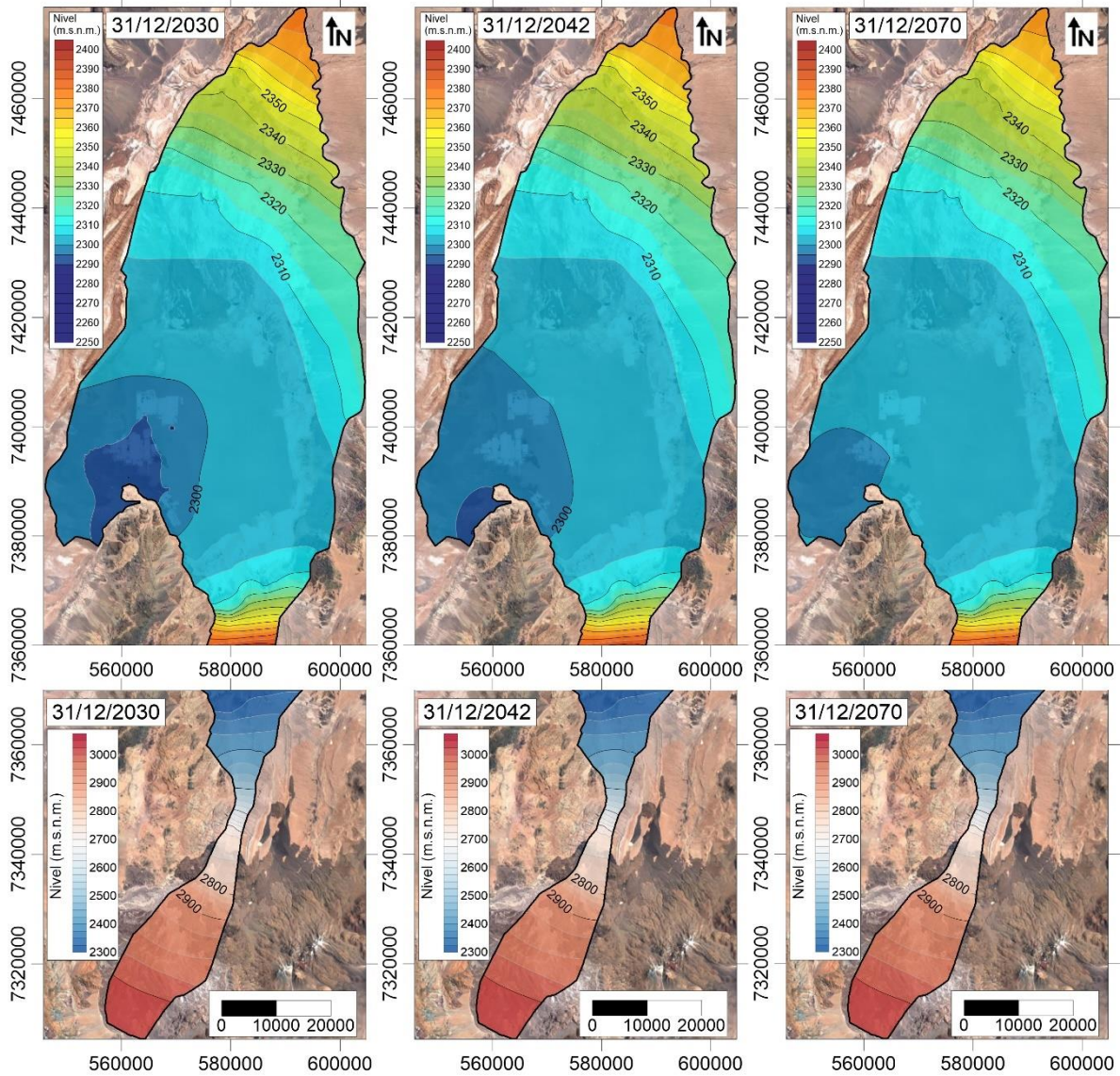




**Figura 3-35: Descenso a partir de inicio de simulación para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 7.**

Fuente: Elaboración propia

La Figura 3-36 muestra la piezometría calculada para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 7.



**Figura 3-36: Piezometría para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 7.**

Fuente: Elaboración propia

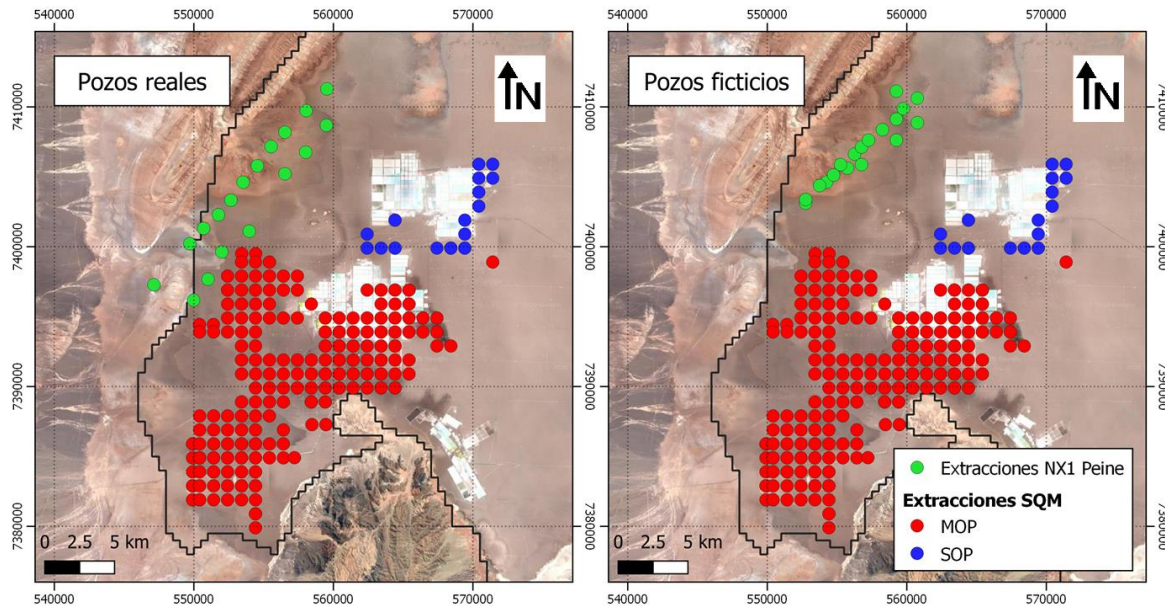
### 3.2.7 Escenario 8

El escenario 8 corresponde al Caso Base (extracciones de salmuera y agua dulce/industrial aprobadas según las RCA vigentes al año 2019), más las siguientes situaciones hipotética (detalle de las extracciones por año en la Tabla 2-2):

- 1) Extensión de la extracción de agua industrial de CMZ hasta 2031.
- 2) Aprobación del proyecto NX1 de Peine con extracciones de agua industrial (25 l/s) y salmuera (230 l/s) entre 2021 y 2040.

Para este escenario se han incluido los pozos de NX1 Peine en el modelo numérico. Las coordenadas de los pozos se tomaron de la Adenda 2 presentada en el EIA de NX1 (CPH Consultores, 2015), con un total de 15 pozos de extracción de salmuera y 3 pozos de extracción de agua industrial. Cabe destacar que las coordenadas de varios de estos pozos se ubican fuera del dominio modelado. Por ello, para este escenario, las coordenadas de los pozos de NX1 Peine han sido modificadas para quedar dentro del polígono definido para su extracción (Anexo I - Apéndice A). Sin embargo, debido a que la ubicación de los pozos es aproximada, los resultados de esta simulación se tomarán de modo orientativo, y este escenario no se considerará para ser analizado en los perfiles de flujo con densidad variable.

La Figura 3-37 muestra la ubicación real de los pozos de NX1 Peine y la nueva ubicación definida para tener resultados orientativos de este escenario.



**Figura 3-37: Distribución de pozos de NX1 Peine reales (izquierda) y ficticios (derecha) y pozos de SQM (MOP y SOP) para extracción definida en el escenario 8.**

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 3-15 muestra los descensos máximos calculados en los puntos de control en las diversas áreas de interés para el escenario 8, y los niveles observados para cada punto de control se muestra en la Figura 3-38 y la Figura 3-39.

Los descensos observados en los puntos de control son algo mayores pero muy parecidos a los obtenidos en el escenario 2 (escenario extracciones aprobadas por RCA vigentes y aprobación ambiental de extensión extracción de CMZ).

El descenso máximo en el área La Punta-La Brava se da en el punto de observación PN-10, con un descenso máximo de 0,6 m. Dicho descenso disminuye hacia el sur en el punto de observación L12-1 hasta un valor de 0,3 m y es casi nulo en el punto de observación PC-1200, cuyo nivel permanece prácticamente constante durante todo el período de simulación, mostrando únicamente las variaciones estacionales de verano - invierno de la evaporación.

En el área Peine, el mayor descenso se recoge en el punto de observación más cercano al núcleo (2037) con un valor de prácticamente de 0,4 m y disminuye a 0,2 m en el punto de

observación 1028. El nivel en el punto de observación Cuña 6 permanece prácticamente constante durante todo el periodo de simulación.

En el área de Quelana el mayor descenso se observa en el punto más cercano al núcleo (SOPM-05) con un valor de 0,5 m, disminuyendo a 0,2 m en el punto de observación SOPM-08. En el punto de observación de Camar-2 se produce una recuperación producto del cese del bombeo del pozo Camar-2.

En el área de Soncor los mayores descensos se producen en puntos de observación hacia el núcleo (L2-14) y más distales (Allana) con valores en torno a 0,3 m, debido a la extracción de salmuera y agua industrial de SQM. Mientras que en el área Norte, los niveles se mantienen prácticamente constantes (RM-8 y C4-B), salvo por las oscilaciones naturales.

En Monturaqui no se observa descenso en la parte más alta de la cuenca, y los niveles se comienzan a recuperar desde el inicio del escenario, debido al cese de las extracciones de MEL, sin embargo, al final de la simulación no se alcanzan los niveles previos a la extracción. En la zona de Callejón se observa un descenso máximo de 0,8 m (NEP-2) y de 0,4 m (ZZ1-MNT) al sur de Tilopozo, debido a las extracciones de CMZ.

Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)
La Punta-La Brava	
PN-10	0,60
L12-1	0,31
PC-1200	0,07
Peine	
2037	0,39
1028	0,19
Cuña6	0,01
Quelana	
SOPM-05	0,52
SOPM-08	0,22
Camar2	0,03
Soncor	
L2-14	0,29
L2-20	0,21
Cuña 2	0,07
L2-3	0,23
Allana	0,29
Zona Norte	
C4-B	0,14
RM-8	0,01
Monturaqui	
M-23	0,02
NEP-2	1,80
ZZ1-MNT	0,54
ZZ2-MNT	0,04

Tabla 3-15: Descensos máximos en los puntos de control por áreas de interés para el escenario 8.

Fuente: Elaboración propia

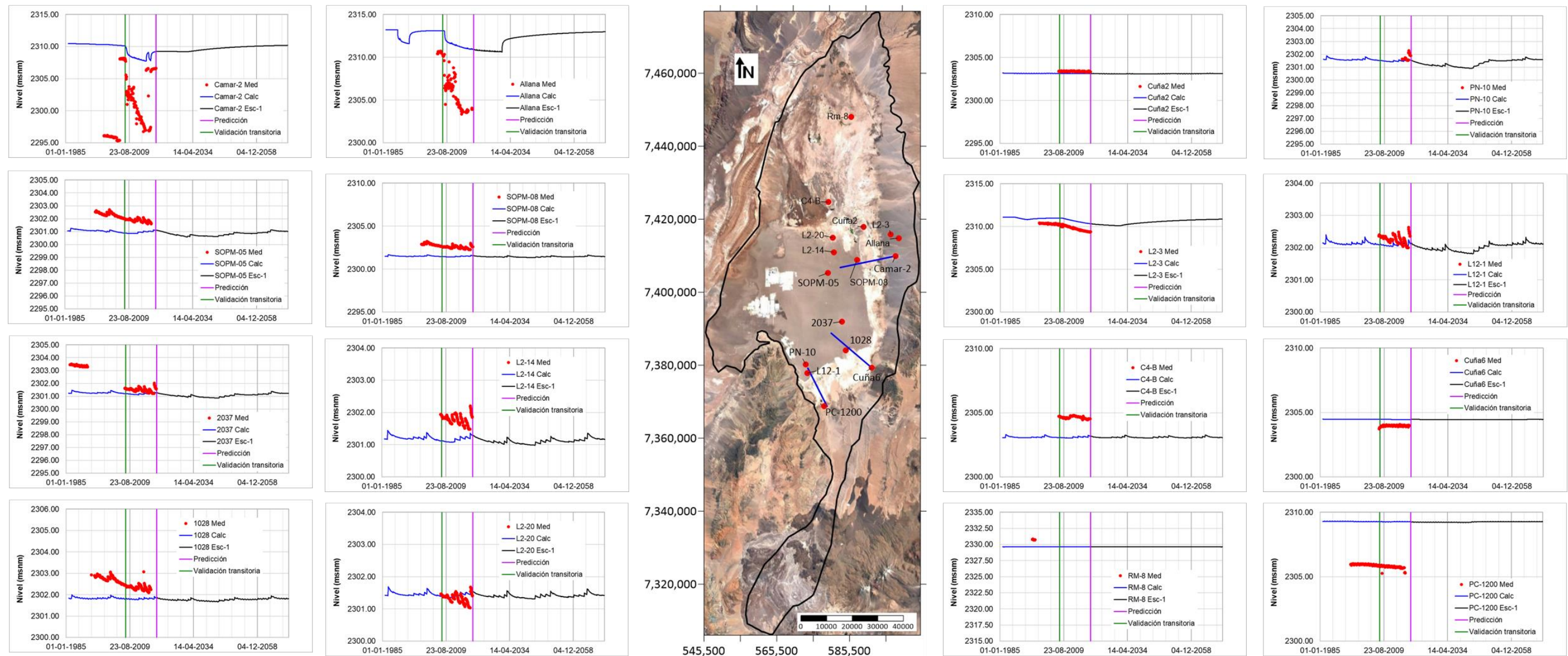
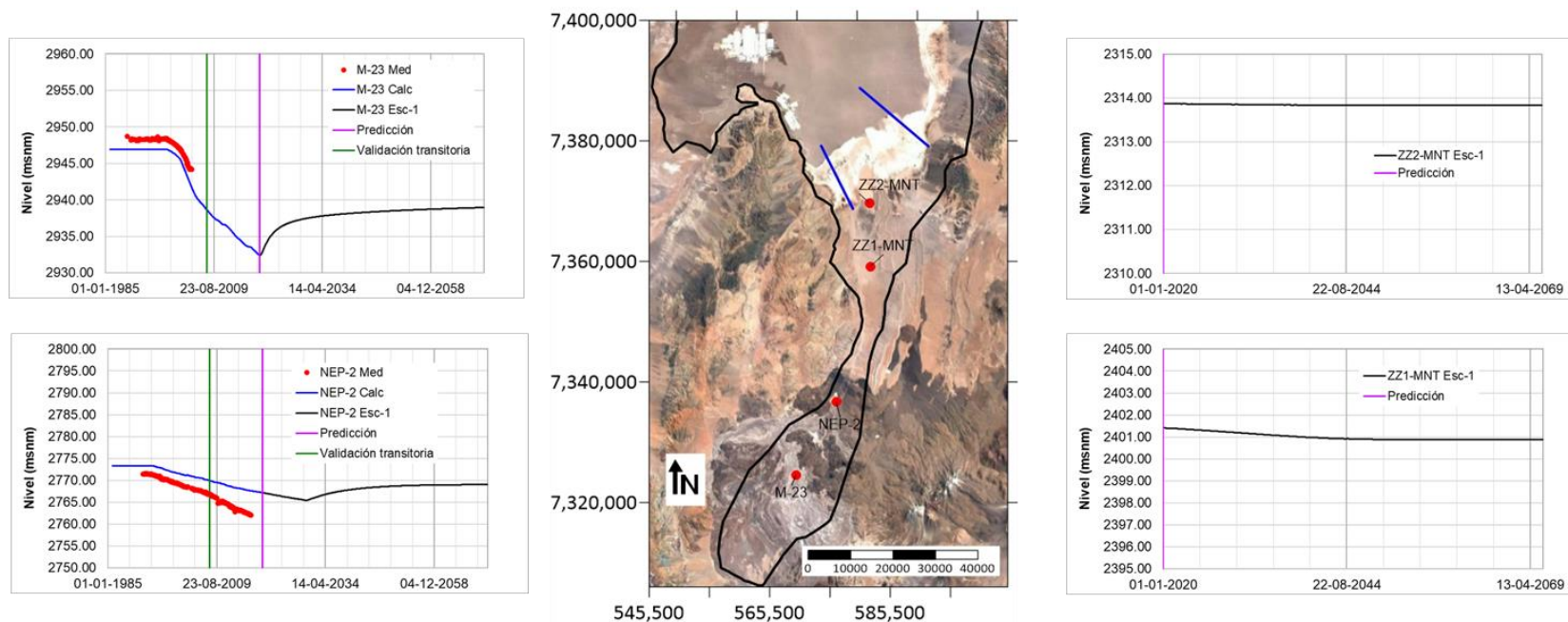


Figura 3-38: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control (PSHA) para el escenario 8.

Fuente: Elaboración propia

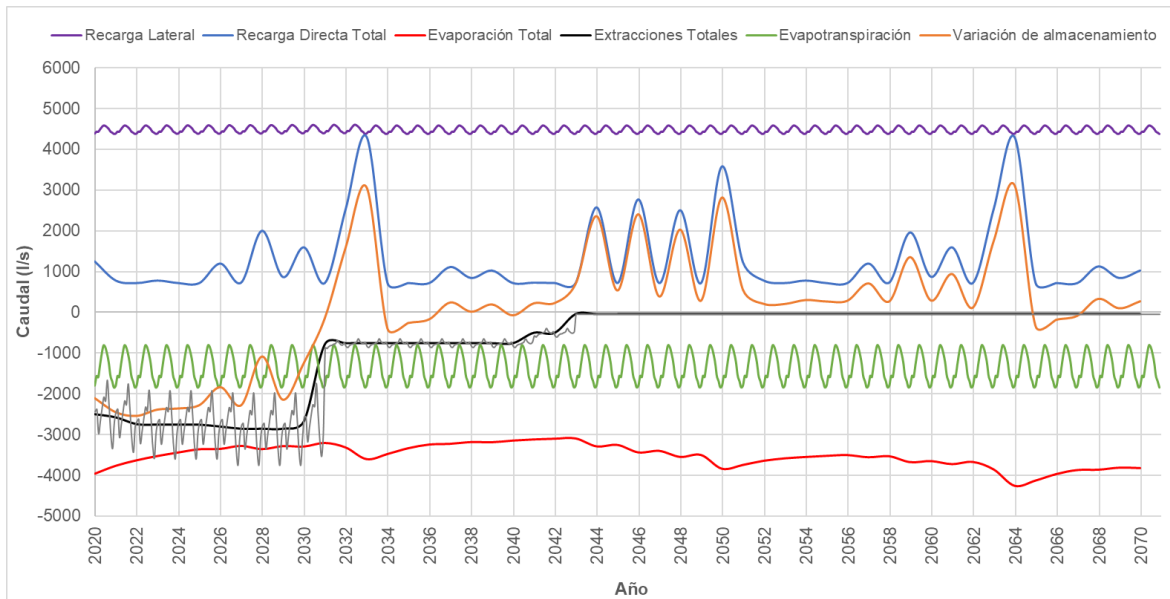


**Figura 3-39: Serie temporal de niveles piezométricos en diversos puntos de control para el escenario 8 en la zona de Monturaqui.**

Fuente: Elaboración propia



El balance hídrico global calculado a partir del escenario 8 se muestra en la Figura 3-40 y el promedio por décadas para cada SHAC se muestra en la Tabla 3-16.



**Figura 3-40: Resumen del balance hídrico obtenido a partir del escenario 8 mostrando las principales entradas y salidas al sistema.**

Fuente: Elaboración propia

El balance hídrico que se obtiene para el escenario 8 es muy similar al obtenido para el escenario 2. Sin embargo, la variación de almacenamiento para las décadas 2020-2029 y 2030-2039 es algo menor con valores de -2.143 L/s y 288 L/s, respectivamente, frente a los valores de -1.942 L/s y 501 L/s obtenidos para las mismas dos décadas en el escenario 2. Esto se debe a que las extracciones de NX1 Peine extraen salmuera por lo que afectan principalmente en el SHAC N (salmuera). La variación de almacenamiento aumenta hasta alcanzar un valor de 906 L/s en la década de 2040-2049, siendo de 826 L/s en el N (salmuera) y de 64 L/s en el F (agua dulce). Sin embargo, a partir de 2050, debido al aumento de la evaporación, la variación del almacenamiento se mantiene positiva pero disminuye a 572 L/s en el periodo 2060-2070, siendo de 525 L/s en el N (salmuera) y de 39 L/s en el F (agua dulce).

La variación de almacenamiento total del periodo 2020-2070 en este escenario es igual a 73 L/s, siendo de 83 L/s en el N (salmuera) y de -10 L/s en el F (agua dulce).

A modo de ejemplo, en la Tabla 3-17 se presenta una comparación entre los balances de los escenarios 2 y 8 diferenciados por SHAC (tipo de agua), para las décadas 2020-2029, 2030-2039 y 2040-2049. En ella se observa que para el escenario 8, con extracción de NX1 Peine, la variación de almacenamiento en el sector del Núcleo, disminuye en un 12% para la década 2020-2029 (disminuye de -1.628 l/s en escenario 2 a los -1.820 l/s del escenario 8) y, en un 50% (disminuyendo de 419 l/s en escenario 2 a 208 l/s del escenario 8 para la década 2030-2039), respecto de la situación sin NX1 Peine (escenario 2).

Término del balance	2020-2029					2030-2039					2040-2049					2050-2059					2060-2070					2020-2070				
	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F	A	B	C	N	F
<b>Entradas</b>																														
Recarga Directa	51	17	14	253	642	63	18	14	693	643	59	18	14	558	643	58	18	14	511	643	61	18	14	645	643	58	18	14	534	643
Recarga Lateral	34	0	2	127	4309	34	0	2	127	4309	34	0	2	122	4309	34	0	2	122	4309	34	0	2	122	4309	34	0	2	124	4309
Recarga de otros SHACs	1773	574	1578	1483	0	1768	598	1574	1494	0	1770	635	1571	1514	0	1772	650	1571	1479	0	1774	660	1571	1453	0	1772	624	1573	1484	0
<b>Salidas</b>																														
Evaporación	746	311	1026	1405	1	745	306	1009	1240	1	736	327	1009	1211	1	741	354	1043	1471	1	749	372	1053	1695	1	744	335	1028	1410	1
EVT	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788	430	74	64	0	788
Extracciones	0	0	17	2287	443	0	0	17	866	74	0	0	5	158	50	0	0	0	0	50	0	0	0	0	50	0	0	8	649	132
Descarga a otros SHACs	696	219	491	0	4001	693	225	502	0	4015	697	239	504	0	4050	694	235	477	0	4066	688	228	467	0	4075	694	229	488	0	4042
<b>Resumen</b>																														
<b>Entradas totales</b>	1858	591	1593	1863	4952	1865	616	1589	2314	4953	1863	652	1586	2194	4952	1864	668	1586	2113	4952	1869	678	1586	2220	4952	1864	642	1588	2143	4952
<b>Salidas totales</b>	1872	605	1598	3692	5233	1868	606	1591	2107	4878	1863	641	1582	1369	4889	1866	663	1584	1471	4905	1868	674	1585	1695	4913	1867	638	1588	2059	4963
<b>Variación de Almacenamiento</b>	-14	-14	-5	-1829	-281	-3	11	-2	208	75	1	12	4	826	64	-2	5	2	642	48	2	5	1	525	39	-3	4	0	83	-10

Tabla 3-16: Resultado del balance hídrico promedio por periodo (L/s) para el escenario 8.

Fuente: Elaboración propia

Nota: SHACs A, B y C corresponden a zona de mezcla, SHAC N corresponde a salmuera y SHAC F corresponde a agua dulce.

ESCENARIO 2	2020-2029			2030-2039			2040-2049		
	F	A+B+C	N	F	A+B+C	N	F	A+B+C	N
<b>Entradas (L/s)</b>									
Recarga Directa	642	82	253	643	95	693	643	91	558
Recarga Lateral	4309	36	127	4309	36	127	4309	36	122
Recarga de otros SHACs	0	3925	1482	0	3940	1491	0	3976	1509
<b>Entradas totales (L/s)</b>	<b>4952</b>	<b>4042</b>	<b>1863</b>	<b>4953</b>	<b>4070</b>	<b>2311</b>	<b>4952</b>	<b>4101</b>	<b>2189</b>
<b>Salidas (L/s)</b>									
Evaporación	1	2083	1414	1	2061	1281	1	2075	1284
EVT	788	568	0	788	568	0	788	568	0
Extracciones	443	17	2077	74	17	611	50	5	132
Descarga a otros SHACs	4001	1406	0	4013	1420	0	4049	1436	0
<b>Salidas totales (L/s)</b>	<b>5233</b>	<b>4075</b>	<b>3491</b>	<b>4876</b>	<b>4064</b>	<b>1892</b>	<b>4888</b>	<b>4084</b>	<b>1416</b>
<b>Variación de Almacenamiento (L/s)</b>	<b>-281</b>	<b>-33</b>	<b>-1628</b>	<b>77</b>	<b>6</b>	<b>419</b>	<b>65</b>	<b>17</b>	<b>773</b>

ESCENARIO 8	2020-2029			2030-2039			2040-2049		
	Sin Operación NX1								
Tipo de agua	F	A+B+C	N	F	A+B+C	N	F	A+B+C	N
<b>Entradas (L/s)</b>									
Recarga Directa	642	82	253	643	95	693	643	91	558
Recarga Lateral	4309	36	127	4309	36	127	4309	36	122
Recarga de otros SHACs	0	3925	1483	0	3940	1494	0	3976	1514
<b>Entradas totales (L/s)</b>	<b>4952</b>	<b>4042</b>	<b>1863</b>	<b>4953</b>	<b>4070</b>	<b>2314</b>	<b>4952</b>	<b>4101</b>	<b>2194</b>
<b>Salidas (L/s)</b>									
Evaporación	1	2083	1405	1	2060	1240	1	2072	1211
EVT	788	568	0	788	568	0	788	568	0
Extracciones	443	17	2287	74	17	866	50	5	158
Descarga a otros SHACs	4001	1406	0	4015	1420	0	4050	1440	0
<b>Salidas totales (L/s)</b>	<b>5233</b>	<b>4075</b>	<b>3692</b>	<b>4878</b>	<b>4065</b>	<b>2107</b>	<b>4889</b>	<b>4086</b>	<b>1369</b>
<b>Variación de Almacenamiento (L/s)</b>	<b>-281</b>	<b>-33</b>	<b>-1829</b>	<b>75</b>	<b>6</b>	<b>208</b>	<b>64</b>	<b>17</b>	<b>826</b>

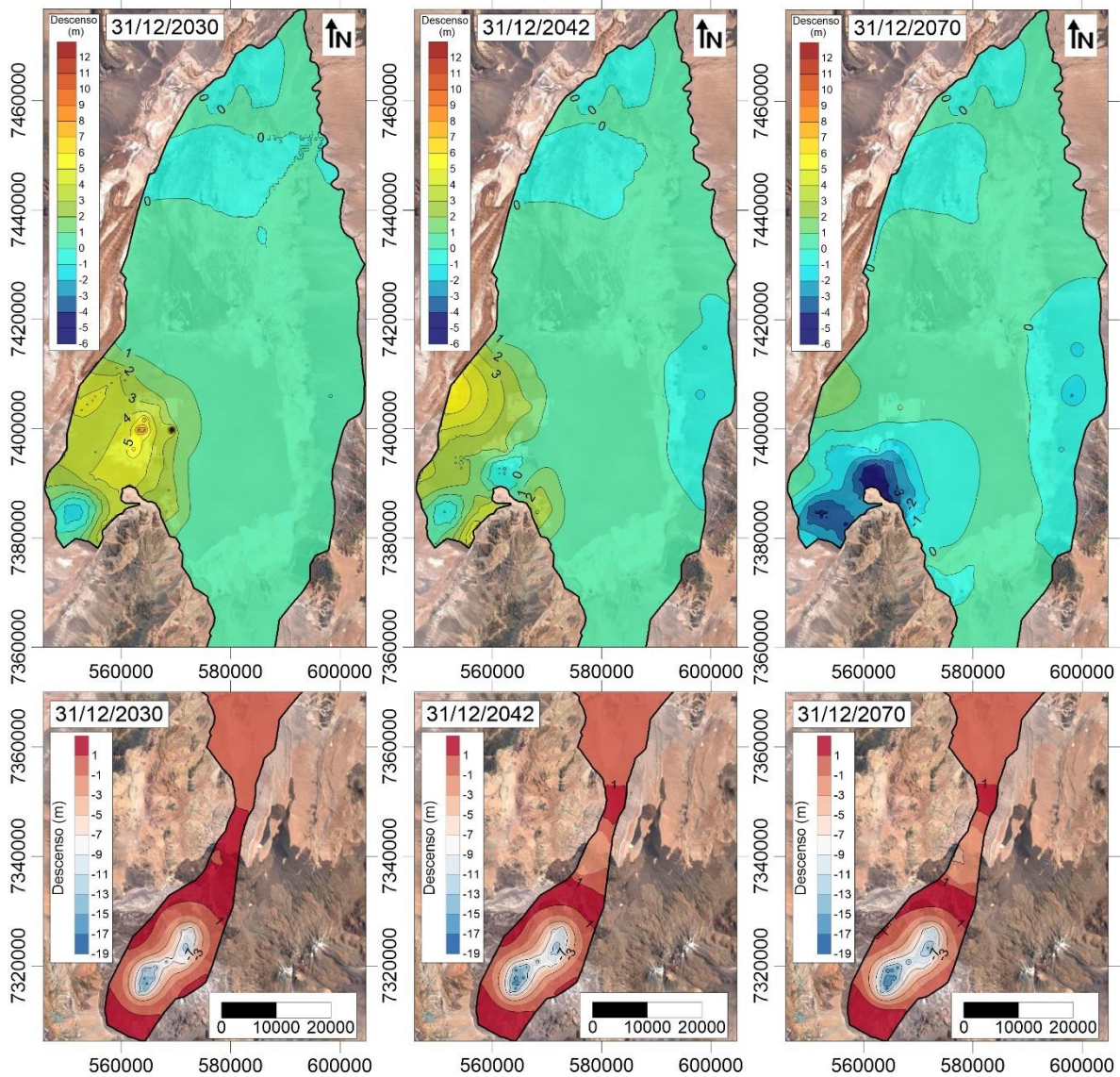
**Tabla 3-17. Balance Hídrico escenario 2 y escenario 8 por tipo de agua, en que se observa un aumento de la variación de almacenamiento en la zona del Núcleo dada por el escenario 8.**

Fuente: Elaboración propia

Nota: SHACs A, B y C corresponden a zona de mezcla, SHAC N corresponde a salmuera y SHAC F corresponde a agua dulce.

Para cuantificar el efecto de la extracción futura en la cuenca, se ha calculado el descenso con respecto a la situación inicial de diciembre de 2019 para tres períodos de la simulación: diciembre de 2030 (momento a partir del cual cesan las extracciones de SQM), diciembre de 2042 (momento en el que cesan las extracciones de Albemarle), y diciembre de 2070 (final de la simulación). La Figura 3-41 muestra la distribución del descenso producido para estas fechas. Los valores positivos indican descenso, mientras que los valores negativos indican un aumento de los niveles, es decir, una recuperación del acuífero.

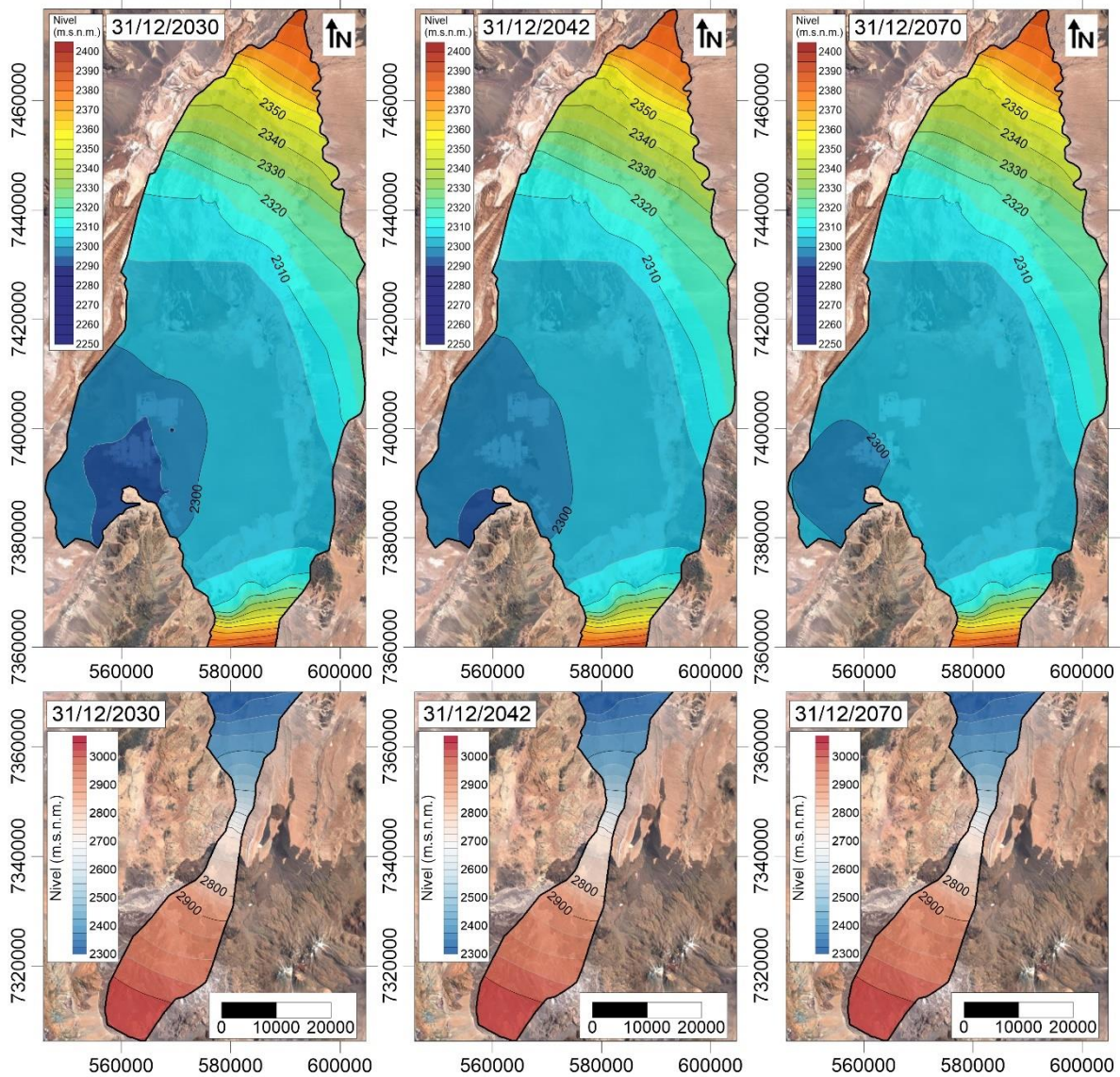
Como se observa en la Figura 3-41, los descensos observados son muy similares a los del escenario 2, el mayor descenso en el año 2030 se da en la parte del núcleo del Salar, debido a la extracción de SQM, con descensos de aproximadamente 6-7 m, sin embargo, se observan mayores descensos en la zona de NX1 Peine. Para el año 2042 se aprecia una recuperación de los niveles en el núcleo producto del cese del bombeo de SQM, pero continúan aumentando los descensos en la zona de extracción de Albemarle y NX1 Peine hasta los 5 m aproximadamente. Por otra parte, en el año 2070, se aprecia la recuperación de los niveles en la zona del Núcleo y Borde Este, producto del cese de las extracciones de salmuera y agua industrial.



**Figura 3-41: Descenso a partir de inicio de simulación para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 8.**

Fuente: Elaboración propia

La Figura 3-42 muestra la piezometría calculada para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 8.



**Figura 3-42: Piezometría para diciembre de 2030, diciembre de 2042 y diciembre de 2070 para el escenario 8.**

Fuente: Elaboración propia

### 3.3 Resumen de resultados modelo de flujo 3D y elección de escenarios de flujo con densidad variable.

Para la elección de los escenarios a simular con los perfiles de SEAWAT para Quelana, Peine y La Punta-La Brava se ha revisado la variación de los niveles en los puntos elegidos para definir la condición de borde para los distintos perfiles.

Es importante recordar que los niveles en los puntos elegidos para definir la condición de borde se transforman de niveles equivalentes de salmuera a niveles naturales, ya que los perfiles SEAWAT trabajan con niveles naturales. En el punto 5.4.3 del Informe de Modelo Hidrogeológico se explica en detalle la metodología aplicada.

La Figura 3-43 muestra la variación de los niveles en los puntos elegidos para definir la condición de borde en el perfil de Quelana, la Figura 3-44 muestra la variación de los niveles en los puntos elegidos para definir la condición de borde en el perfil de Peine y la Figura 3-45 muestra la variación de los niveles en los puntos elegidos para definir la condición de borde en el perfil de La Punta-La Brava.

Como se observa en las figuras, en función de la respuesta de los niveles a los distintos escenarios y las distintas tendencias se puede destacar que:

- El escenario 3 es el que produce los mayores descensos en la zona del Núcleo de los 3 perfiles, mientras que el escenario 4 es el que produce menores descensos, seguido del escenario 5.
- El escenario 7 produce los mayores descensos en la zona Marginal, producto de la disminución de la recarga por cambio climático.

Es importante destacar que se obtiene la misma respuesta en los niveles en los puntos elegidos para la condición de borde de los distintos perfiles a partir del escenario 1 y 2. Es decir, los resultados numéricos indican que la ampliación de CMZ (2031) no provoca cambios significativos en las zonas de los sistemas lagunares. Por tanto, los resultados de los perfiles para el escenario 2 son equivalentes a los del escenario 1.

Los escenarios 5 y 6 presentan respuestas similares a los escenarios 1 y 2 en términos de niveles en los puntos elegidos para definir las condiciones de borde de los perfiles, por lo que no se simularan estos escenarios en los perfiles 2D.

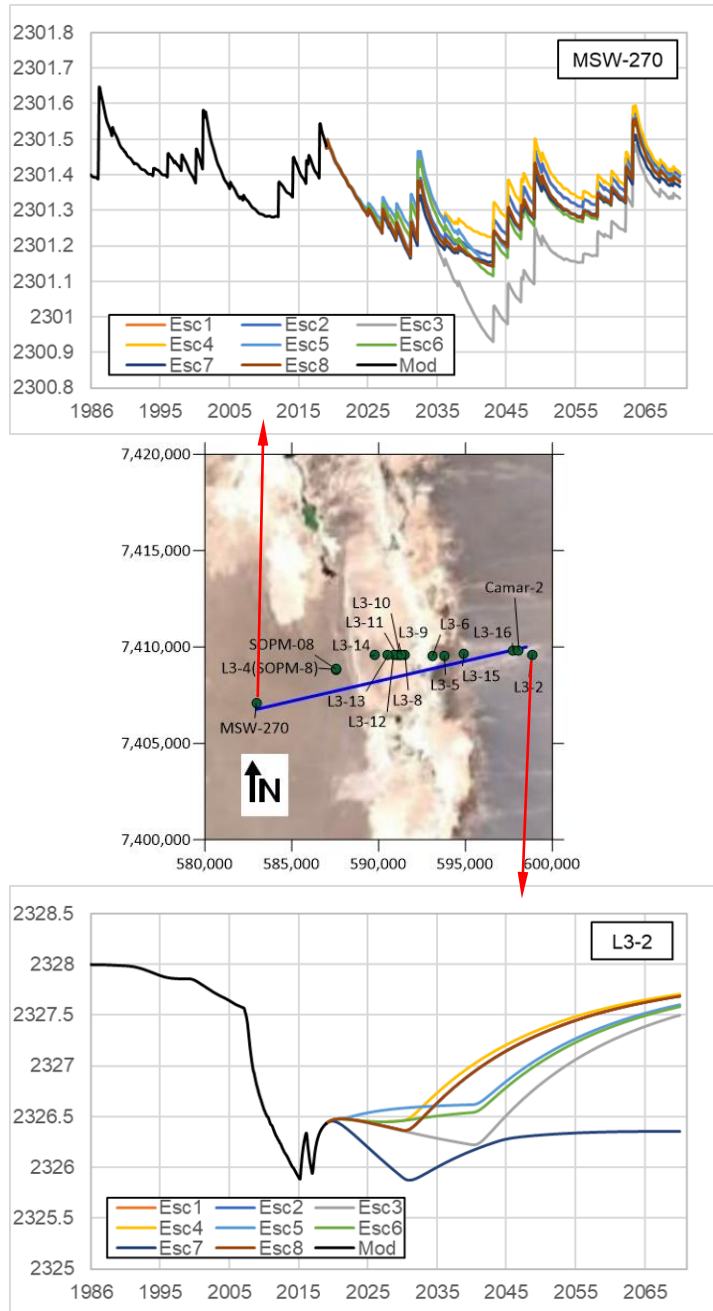


El escenario 8 (inclusión del proyecto NX1 Peine) presenta una respuesta muy similar a los escenarios 1 y 2, salvo leves aumentos en los descensos de los puntos elegidos para definir las condiciones de borde del núcleo de los perfiles, por lo que tampoco se simulará este escenario en los perfiles 2D.

La Tabla 3-18 muestra el resumen del balance hídrico global por década, con el total de las entradas, salidas y variación de almacenamiento, obtenido a partir de cada escenario de simulación.

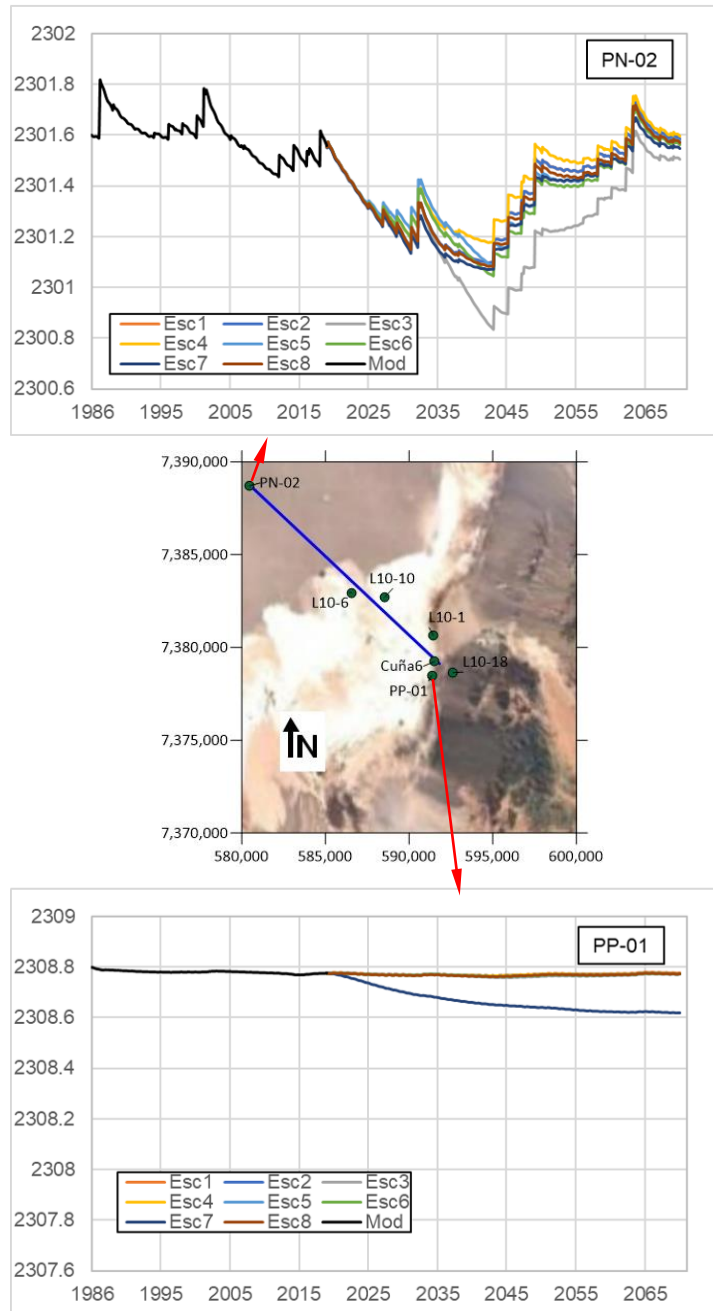
La Tabla 3-18 muestra la variación de almacenamiento para cada SHAC por década, obtenido a partir de cada escenario de simulación. Con el objetivo de analizar de forma aproximada la variación de almacenamiento por tipo de agua, se agruparon los SHACs A, B y C, para cuantificar la variación de almacenamiento en la zona de mezcla.

La Tabla 3-20 muestra el resumen del descenso máximo obtenido en los puntos de control a partir de los 8 escenarios simulados, comparando con la situación de diciembre de 2019. Estos descensos corresponden como ya se indicó, a niveles equivalentes de salmuera.



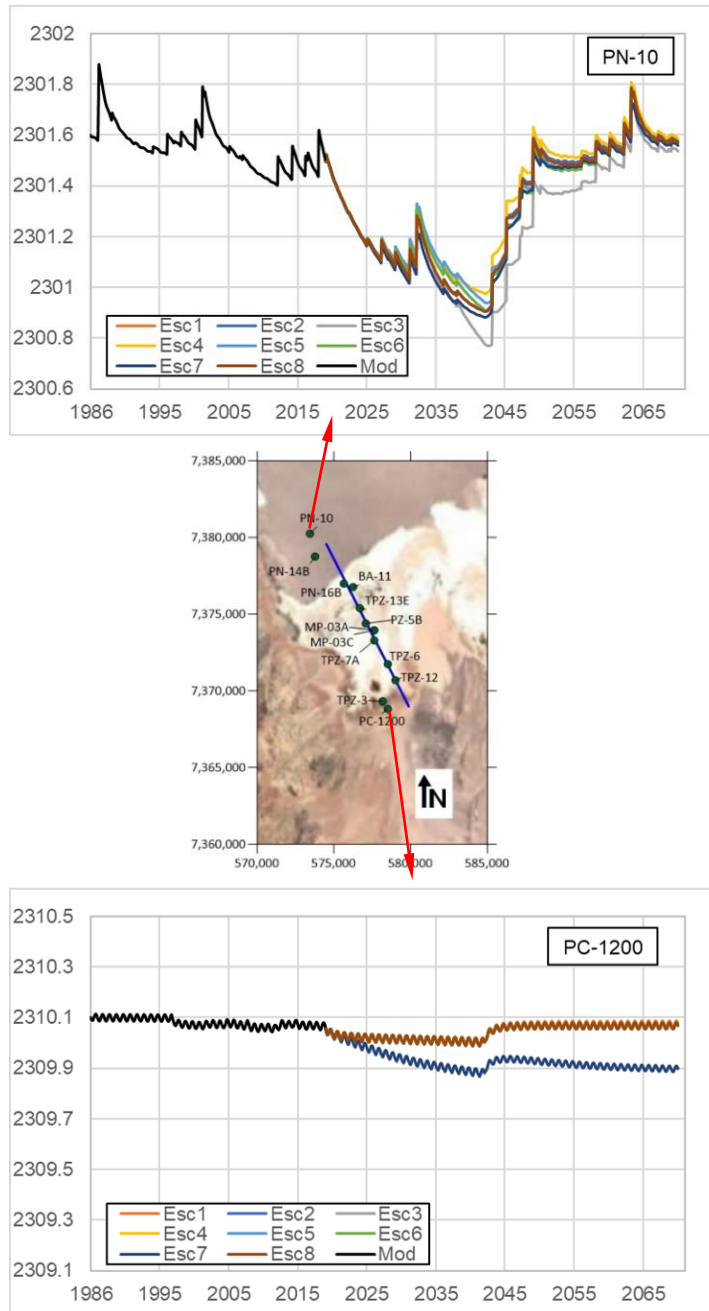
**Figura 3-43: Niveles obtenidos a partir del modelo tridimensional de flujo para los distintos escenarios de gestión para los puntos definidos como condición de borde del perfil de Quelana.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3-44: Niveles obtenidos a partir del modelo tridimensional de flujo para los distintos escenarios de gestión para los puntos definidos como condición de borde del perfil de Peine.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3-45: Niveles obtenidos a partir del modelo tridimensional de flujo para los distintos escenarios de gestión para los puntos definidos como condición de borde del perfil de La Punta-La Brava.**

Fuente: Elaboración propia

Escenarios	Término del Balance (L/s)	Período				
		2020-2029	2030-2039	2040-2049	2050-2059	2060-2070
Escenario 1	Entradas	5.450	5.902	5.758	5.710	5.848
	Salidas	7.259	5.395	4.904	5.103	5.352
	Variación Almacenamiento	-1.809	507	854	607	496
Escenario 2	Entradas	5.450	5.902	5.758	5.710	5.848
	Salidas	7.392	5.401	4.903	5.102	5.350
	Variación Almacenamiento	-1.942	501	855	608	498
Escenarios 3	Entradas	5.450	5.902	5.758	5.710	5.848
	Salidas	7.392	7.021	4.774	4.734	5.075
	Variación Almacenamiento	-1.942	-1.119	985	976	773
Escenario 4	Entradas	5.450	5.902	5.758	5.710	5.848
	Salidas	6.980	5.404	4.998	5.182	5.406
	Variación Almacenamiento	-1.531	498	760	528	442
Escenario 5	Entradas	5.450	5.902	5.758	5.710	5.848
	Salidas	6.733	6.297	4.947	5.018	5.291
	Variación Almacenamiento	-1.283	-395	811	692	557
Escenario 6	Entradas	5.450	5.902	5.758	5.710	5.848
	Salidas	6.980	6.250	4.905	4.982	5.264
	Variación Almacenamiento	-1.531	-348	853	728	584

Escenarios	Término del Balance (L/s)	Período				
		2020-2029	2030-2039	2040-2049	2050-2059	2060-2070
Escenario 7	Entradas	4.632	5.017	4.805	4.682	4.795
	Salidas	7.351	5.241	4.675	4.784	4.953
	Variación Almacenamiento	-2.719	-224	130	-102	-158
Escenario 8	Entradas	5.450	5.902	5.758	5.710	5.848
	Salidas	7.593	5.614	4.852	5.015	5.276
	Variación Almacenamiento	-2.143	288	906	695	572

Tabla 3-18: Balance hídrico global promedio por periodo (L/s) calculado a partir del modelo tridimensional de flujo para los distintos escenarios de simulación

Fuente: Elaboración propia

Esc.	Término del balance (l/s)	N						A+B+C						F					
		2020-2029	2030-2039	2040-2049	2050-2059	2060-2070	2020-2070	2020-2029	2030-2039	2040-2049	2050-2059	2060-2070	2020-2070	2020-2029	2030-2039	2040-2049	2050-2059	2060-2070	2020-2070
1	Entradas	1.863	2.311	2.189	2.108	2.217	2.139	4.029	4.058	4.090	4.107	4.122	4.082	4.952	4.953	4.952	4.952	4.952	4.952
	Salidas	3.491	1.892	1.416	1.552	1.765	2.018	4.062	4.052	4.072	4.101	4.115	4.081	5.099	4.870	4.889	4.907	4.916	4.936
	ΔV	-1.628	419	773	556	452	121	-33	6	18	6	7	1	-147	82	64	45	37	17
2	Entradas	1.863	2.311	2.189	2.108	2.217	2.139	4.029	4.058	4.089	4.105	4.120	4.081	4.952	4.953	4.952	4.952	4.952	4.952
	Salidas	3.491	1.892	1.416	1.552	1.765	2.018	4.062	4.052	4.072	4.099	4.113	4.080	5.233	4.876	4.888	4.905	4.914	4.962
	ΔV	-1.628	419	773	556	452	121	-33	6	18	6	7	1	-281	77	65	47	38	-10
3	Entradas	1.863	2.310	2.218	2.137	2.232	2.154	4.029	4.021	4.040	4.077	4.102	4.055	4.952	4.953	4.952	4.952	4.952	4.952
	Salidas	3.491	3.365	1.339	1.248	1.528	2.181	4.062	4.036	4.029	4.065	4.090	4.057	5.233	5.002	4.859	4.878	4.895	4.972
	ΔV	-1.628	-1.055	880	889	704	-28	-33	-15	11	13	12	-2	-281	-49	94	74	57	-20
4	Entradas	1.862	2.304	2.179	2.103	2.215	2.134	4.032	4.066	4.094	4.108	4.122	4.085	4.952	4.953	4.952	4.952	4.952	4.952
	Salidas	3.100	1.888	1.496	1.623	1.815	1.981	4.062	4.057	4.077	4.104	4.116	4.084	5.215	4.878	4.892	4.908	4.916	4.961
	ΔV	-1.237	415	683	480	399	153	-30	9	17	4	6	1	-263	74	61	44	36	-9
5	Entradas	1.863	2.299	2.185	2.112	2.219	2.137	4.040	4.049	4.065	4.092	4.112	4.072	4.952	4.953	4.952	4.952	4.952	4.952
	Salidas	2.879	2.673	1.464	1.487	1.717	2.038	4.066	4.054	4.051	4.085	4.104	4.072	5.193	4.969	4.876	4.893	4.906	4.966
	ΔV	-1.016	-374	721	625	502	100	-26	-5	14	8	8	0	-241	-16	77	59	46	-14
6	Entradas	1.862	2.302	2.190	2.114	2.220	2.139	4.032	4.041	4.060	4.089	4.110	4.068	4.952	4.953	4.952	4.952	4.952	4.952
	Salidas	3.100	2.636	1.432	1.458	1.694	2.057	4.062	4.046	4.046	4.081	4.101	4.068	5.215	4.962	4.872	4.890	4.904	4.967
	ΔV	-1.237	-334	757	657	526	83	-30	-5	15	9	9	0	-263	-9	81	62	49	-15
7	Entradas	1.802	2.181	2.058	1.969	2.046	2.012	3.862	3.731	3.683	3.617	3.585	3.693	4.209	4.210	4.135	4.061	4.061	4.134
	Salidas	3.478	1.834	1.346	1.445	1.626	1.940	4.031	3.942	3.899	3.866	3.824	3.911	5.083	4.569	4.501	4.437	4.399	4.594
	ΔV	-1.675	347	712	523	419	72	-169	-211	-216	-249	-239	-217	-874	-359	-366	-376	-338	-460
8	Entradas	1.863	2.314	2.194	2.113	2.220	2.143	4.029	4.058	4.089	4.105	4.120	4.081	4.952	4.953	4.952	4.952	4.952	4.952
	Salidas	3.692	2.107	1.369	1.471	1.695	2.059	4.062	4.052	4.073	4.100	4.113	4.081	5.233	4.878	4.889	4.905	4.913	4.963
	ΔV	-1.829	208	826	642	525	83	-33	5	17	5	7	0	-281	75	64	48	39	-10

**Tabla 3-19: Resumen del balance (L/s) por década y total para cada SHAC obtenido a partir de cada escenario de simulación.**

Fuente: Elaboración propia

Nota: ΔV: Variación Almacenamiento

Puntos de Observación	Descensos (m)							
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6	Escenario 7	Escenario 8
La Punta-La Brava								
PN-10	0,60	0,60	0,73	0,53	0,57	0,60	0,62	0,60
L12-1	0,31	0,31	0,37	0,27	0,29	0,31	0,32	0,31
PC-1200	0,06	0,07	0,07	0,06	0,06	0,07	0,17	0,07
Peine								
2037	0,37	0,37	0,61	0,31	0,39	0,42	0,40	0,39
1028	0,19	0,19	0,24	0,17	0,18	0,19	0,20	0,19
Cuña 6	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,12	0,01
Quelana								
SOPM-05	0,51	0,51	0,88	0,40	0,50	0,55	0,53	0,52
SOPM-08	0,21	0,21	0,31	0,18	0,21	0,23	0,22	0,22
Camar 2	0,03	0,03	0,14	0,00	0,00	0,00	0,36	0,03
Soncor								
L2-14	0,27	0,27	0,46	0,23	0,29	0,31	0,28	0,29
L2-20	0,20	0,20	0,29	0,18	0,21	0,22	0,20	0,21
Cuña 2	0,07	0,07	0,09	0,06	0,07	0,07	0,09	0,07
L2-3	0,23	0,23	0,34	0,15	0,09	0,15	0,44	0,23
Allana	0,29	0,29	0,41	0,12	0,09	0,12	0,70	0,29



Puntos de Observación	Descensos (m)							
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6	Escenario 7	Escenario 8
Zona Norte								
C4-B	0,14	0,14	0,15	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14
RM-8	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	1,74	0,01
Monturaqui								
M-23	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
NEP-2	0,77	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	2,07	1,80
ZZ1-MNT	0,39	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	3,10	0,54
ZZ2-MNT	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,47	0,04

Tabla 3-20: Descenso con respecto a la situación de diciembre de 2019 calculado a partir del modelo tridimensional de flujo en los puntos de observación para los distintos escenarios de simulación.

Fuente: Elaboración propia

## 4 Escenarios predictivos: Perfiles de flujo 2D con densidad variable

En base a los resultados presentados en el punto 3.3 de los escenarios simulados en el modelo 3D de flujo, se han elegido como escenarios a simular con los perfiles de flujo con densidad variable los escenarios 3, 4 y 7, que corresponden a los escenarios que simulan los extremos en términos de los niveles simulados para las condiciones de borde de los perfiles, tanto para el núcleo como para la zona marginal. Adicionalmente, se ha simulado el escenario 1 como caso base, el cual es equivalente al escenario 2, ya que la extensión de CMZ no influye en los niveles de los pozos que conforman las condiciones de borde impuestas en los perfiles 2D. La Tabla 4-1 muestra el detalle de los escenarios simulados.

Escenario con RCA vigentes		Extracciones	Recarga	Horizonte de Modelación
Escenario 1	Caso Base.	Salmuera: aprobadas por RCA al 2019 para los operadores de la cuenca SQM (2030), ALB (2042) Agua dulce: aprobados por RCA al 2019 para los operadores de la cuenca SQM (2030), ALB (2042), CMZ (2023)	Recarga promedio estimada hasta el 2019	2070
Escenario con RCA vigentes y situaciones adicionales hipotéticas de extracción y recarga		Extracciones	Recarga	Horizonte de Modelación
Escenario 3	Caso Base + Aprobación extracción agua dulce CMZ + Adicional a la misma tasa de SQM (100 % -salmuera y agua dulce- x 10 años adicionales)	Salmuera: aprobadas por RCA al 2019 + extensión 100% (1.700 l/s) de la tasa aprobada a SQM (2031-2040) Agua dulce: aprobados por RCA al 2019 + aprobación CMZ (2031) + extensión 100% de la tasa aprobada a SQM (2031-2040)	Recarga promedio estimada hasta el 2019	2070
Escenario 4	Caso Base + Aprobación extracción agua dulce CMZ + Modificación SQM del Plan de Desarrollo Sustentable 2020 (reducción gradual (*) al 50% al 2030)	Salmuera: aprobadas por RCA al 2019 + reducción gradual al 50% (822 l/s) de SQM (2021-2030) Agua dulce: aprobadas por RCA al 2019 + aprobación CMZ (2031) + reducción gradual al 50% SQM (2021-2030)	Recarga promedio estimada hasta el 2019	2070
Escenario 7	Caso Base + Aprobación extracción agua dulce CMZ + Cambio Climático.	Salmuera: aprobadas por RCA al 2019 para los operadores de la cuenca SQM (2030), ALB (2042) Agua dulce: aprobadas por RCA al 2019 + aprobación CMZ (2031)	Disminución de 15% y 18% de la recarga por cambio climático	2070

(\*) Se simula una reducción escalonada entre los años 2021-2030 hasta aproximadamente el 50% de la máxima extracción autorizada, es decir 822 l/s.

**Tabla 4-1: Escenarios predictivos simulados con los modelos de densidad variable 2D.**

Fuente: Elaboración propia

Al igual que para el modelo tridimensional de flujo, como condición inicial para cada uno de los perfiles se ha tomado la distribución de niveles y concentraciones obtenidas al final de la simulación de los modelos transitorios (31 diciembre de 2019). Para las funciones de recarga se han mantenido las zonas y se han repetido las series de recarga desde enero de 1989 a diciembre de 2019, a excepción del escenario 7 en el cual se han aplicado los factores de reducción explicados en la sección 2). Para la evaporación, se ha tomado la misma variabilidad que en los modelos transitorios para representar las fluctuaciones de verano e invierno. Para todos los perfiles se ha definido una discretización temporal mensual para el flujo con pasos de tiempo máximo para el transporte de 1 día.

Para las simulaciones de los perfiles SEAWAT, una vez obtenidos los niveles en los puntos definidos en el modelo 3D para imponer las condiciones de contorno en los bordes de los perfiles, se ha realizado la corrección de niveles equivalentes de salmuera para todo el periodo (obtenidos a partir del modelo tridimensional de flujo) a niveles piezométricos y se han transformado en descensos para aquellos puntos que se encuentran en la zona de mezcla o zona de agua dulce.

La discretización temporal para los perfiles de flujo con densidad variable es mensual para el flujo con un paso de tiempo máximo para el transporte de 1 día, para evitar inestabilidad numérica.

## 5 Resultados de los escenarios predictivos en el Modelo 2D de Flujo con densidad variable.

Para la cuantificación del efecto de cada uno de los escenarios, se ha analizado: (i) el descenso en los puntos de observación incluidos en los perfiles y (ii) el posible desplazamiento horizontal y vertical de la interfaz. Dicho desplazamiento se ha cuantificado a partir de las líneas de isoconcentración del 25% ( $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ ), 50% ( $C=165 \text{ kg/m}^3$ ) y 75% ( $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ).

A continuación, se describen los resultados obtenidos para cada perfil.

### 5.1 Perfil Quelana

Para los escenarios simulados en la zona de Quelana, cabe destacar la oscilación de nivel que se observa en los últimos tiempos del modelo transitorio para el punto de observación L3-2 definido para la condición de contorno del Borde Este del perfil (ver Figura 3-43). Esta oscilación de nivel se produce debido a la variación de extracción de agua industrial de SQM, en particular del pozo Camar-2, donde disminuyó considerablemente su caudal de extracción durante 2016, volvió a bombear durante 2017 y nuevamente disminuyó su caudal desde el 2018 en adelante. Para todos los escenarios de gestión desde 2020 se mantiene esta disminución del caudal de extracción de SQM a 180 l/s.

A continuación, se detallan los resultados obtenidos a partir de la simulación de los escenarios de gestión 1, 3, 4 y 7 para el perfil Quelana.

#### 5.1.1 Escenarios con RCA vigente

##### 5.1.1.1 Escenario 1

El escenario 1, denominado Caso Base, incluye las extracciones de salmuera y agua dulce/industrial aprobadas según las RCA vigentes al año 2019 (detalle extracciones por año en la Tabla 2-2) y que en términos generales corresponden a:

- 1) Las extracciones de salmuera y agua industrial de SQM hasta el año 2030.
- 2) Las extracciones de salmuera y agua industrial de Albemarle hasta el 2042.
- 3) La extracción de agua industrial de CMZ hasta el 2023.

4) Las extracciones de agua dulce en el sector norte por los APR.

Adicionalmente, para este y todos los demás escenarios, se considera el cese de la extracción de MEL.

La Tabla 5-1 muestra los descensos máximos calculados en los puntos de control para el perfil de Quelana a partir del escenario 1. La evolución de niveles para cada punto de control se muestra en la Figura 5-1

Los máximos descensos observados con respecto a la situación de diciembre de 2019 se producen principalmente por las oscilaciones naturales producto de la interacción entre las precipitaciones y la evaporación, lo que se observa en los pozos L3-5, L3-10, L3-11 y L3-15. Sin embargo, se observan descensos en otros pozos producidos por la extracción realizada por los distintos operadores. En el núcleo el descenso máximo se produce en el pozo SOPM-08 con 0,08 m, mientras que en la zona Marginal se produce en el pozo L3-16 con 0,05 m. A partir de 2031 se observa un ascenso generalizado de los niveles, tanto en el núcleo como en la zona Marginal producto del cese de la extracción de SQM.

Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)
SOPM-08	0,08
L3-14	0,06
L3-13	0,04
L3-12	0,04
L3-11	0,14
L3-10	0,14
L3-9	0,06
L3-8	0,04
L3-6	0,07
L3-5	0,18
L3-15	0,07
L3-16	0,05

Tabla 5-1: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de Quelana obtenido a partir del escenario 1.

Fuente: Elaboración propia

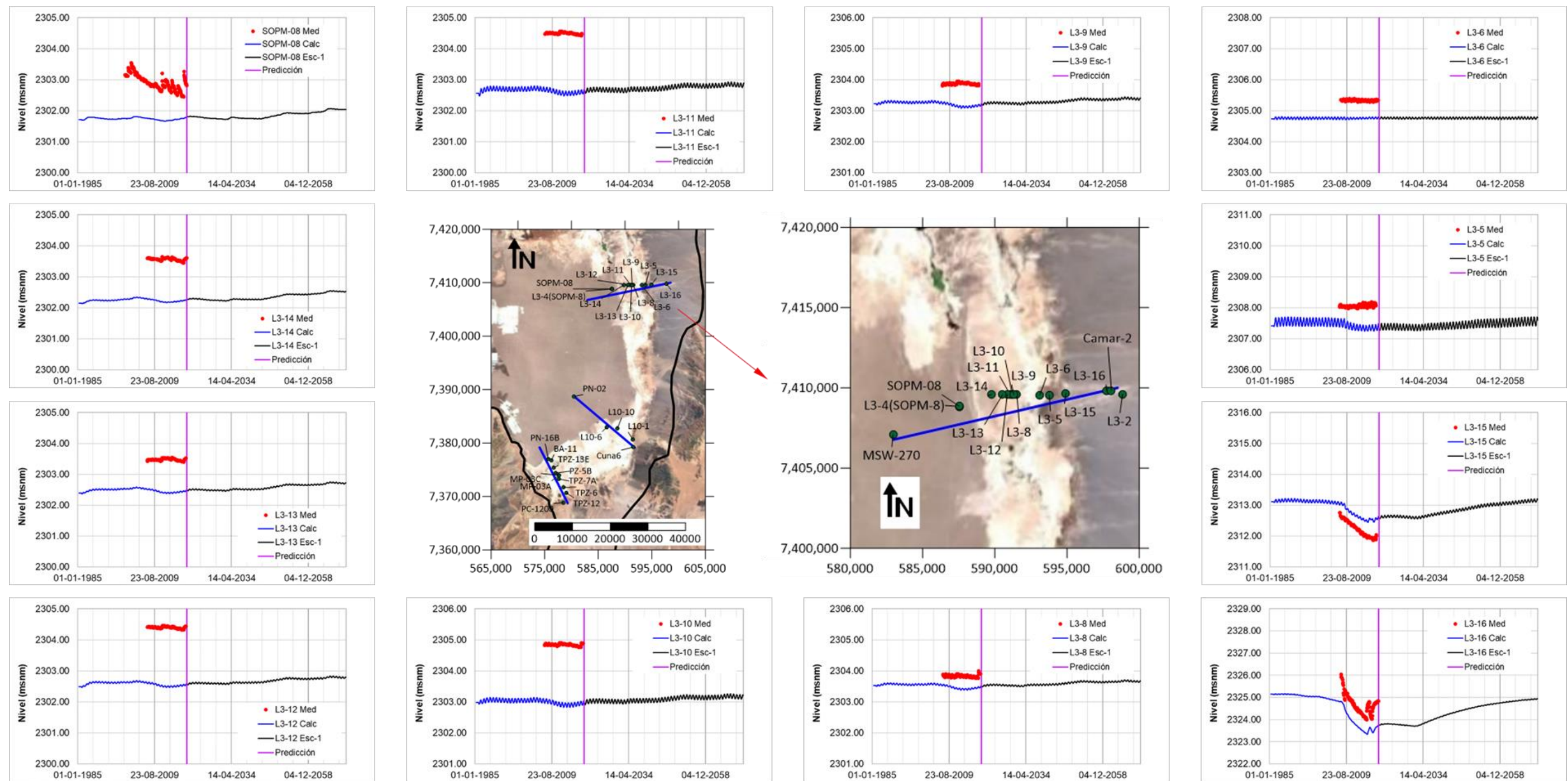


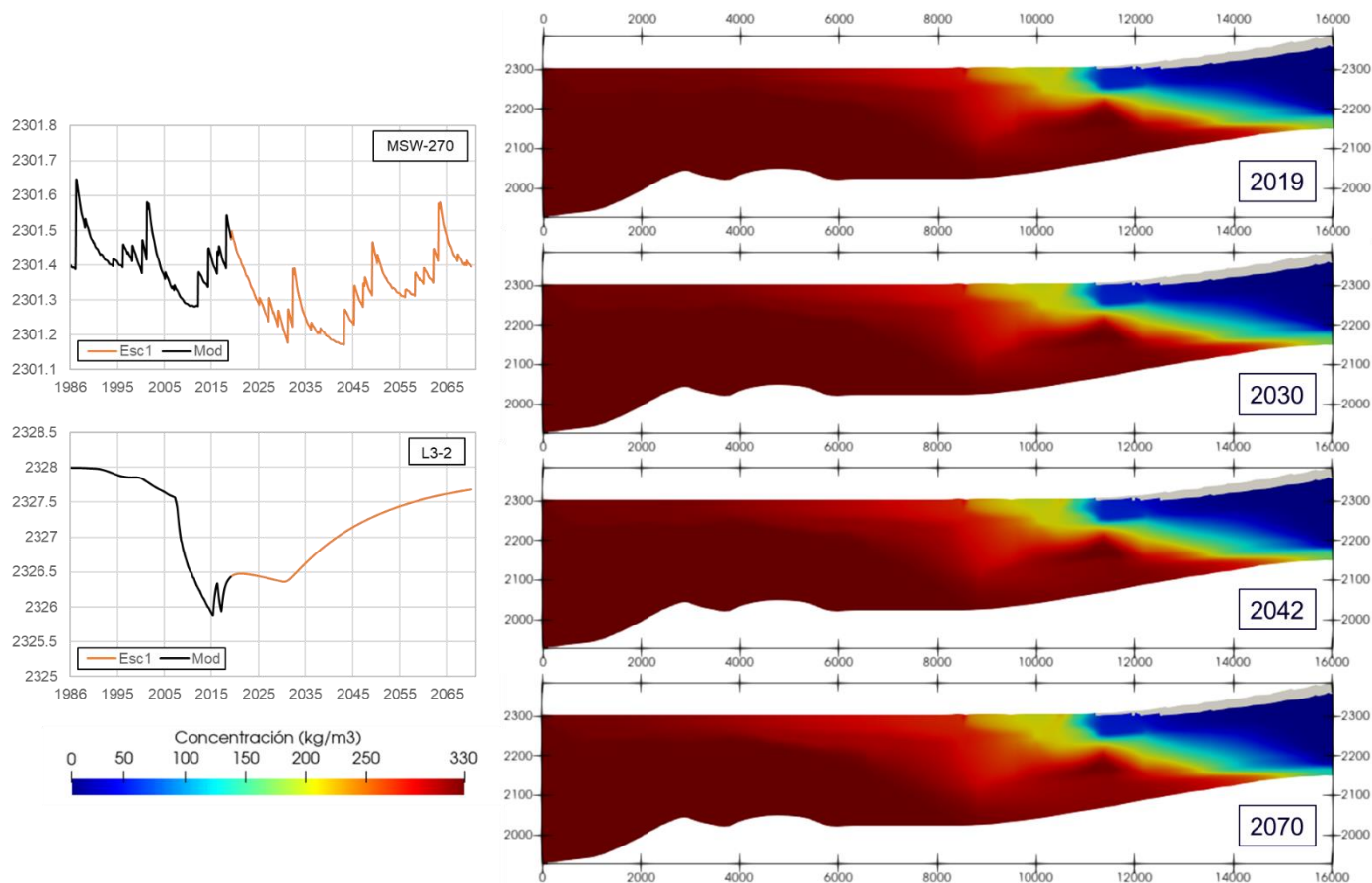
Figura 5-1: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil Quelana a partir del escenario 1.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5-2 se muestran los niveles impuestos como condición de contorno en los bordes del perfil de Quelana y los mapas de concentración para la condición inicial (diciembre de 2019), para diciembre de 2030, momento de cese de extracción de SQM, diciembre de 2042, momento de cese de extracción de Albemarle y la solución final para diciembre de 2070. La Figura 5-3 muestra los isocontornos de concentración del 25% ( $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ ), 50% ( $C=165 \text{ kg/m}^3$ ) y 75% ( $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para las mismas fechas.

Como se observa en las figuras, desde el inicio de la simulación y hasta el año 2070 se observa un leve movimiento horizontal de la interfaz en los primeros metros de profundidad, principalmente para la isoconcentración del 75%. A mayor profundidad si se observa un desplazamiento, horizontal y vertical de la interfaz salina, la que va aumentando hasta el año 2070, en el cual la interfaz se mueve hacia el núcleo y se profundiza en la parte más salina. El mayor desplazamiento horizontal es el que ocurre en la isoconcentración del 25%, desde el inicio al fin de la simulación es de aproximadamente 700 m hacia el oeste (en profundidad, entre los 2.180 y 2.220 m.s.n.m.), y el mayor desplazamiento vertical en la misma isoconcentración en profundidad es de 29 m (Figura 5-4). El mayor desplazamiento horizontal en superficie (primeros 10 m de profundidad) se produce en la isoconcentración del 75% y es de aproximadamente 25 m (Figura 5-4).

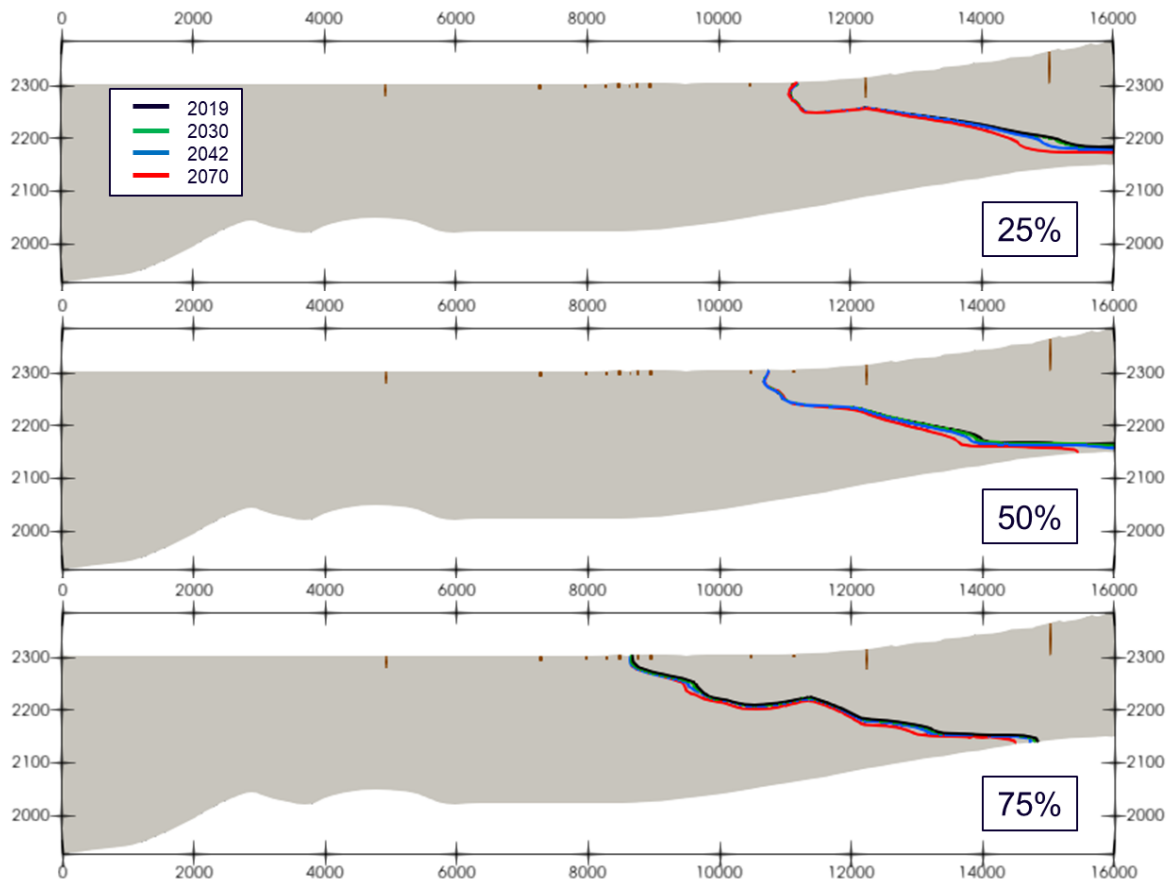
La Figura 5-5 muestra la distribución vertical de la concentración para una posición  $x$  igual a 14.025 m para la condición inicial, diciembre de 2030, diciembre de 2042, y la solución final para diciembre de 2070. En dicha figura se observa el desplazamiento horizontal y vertical de la interfaz, que ocurre en profundidad.



**Figura 5-2: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de Quelana para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 1.**

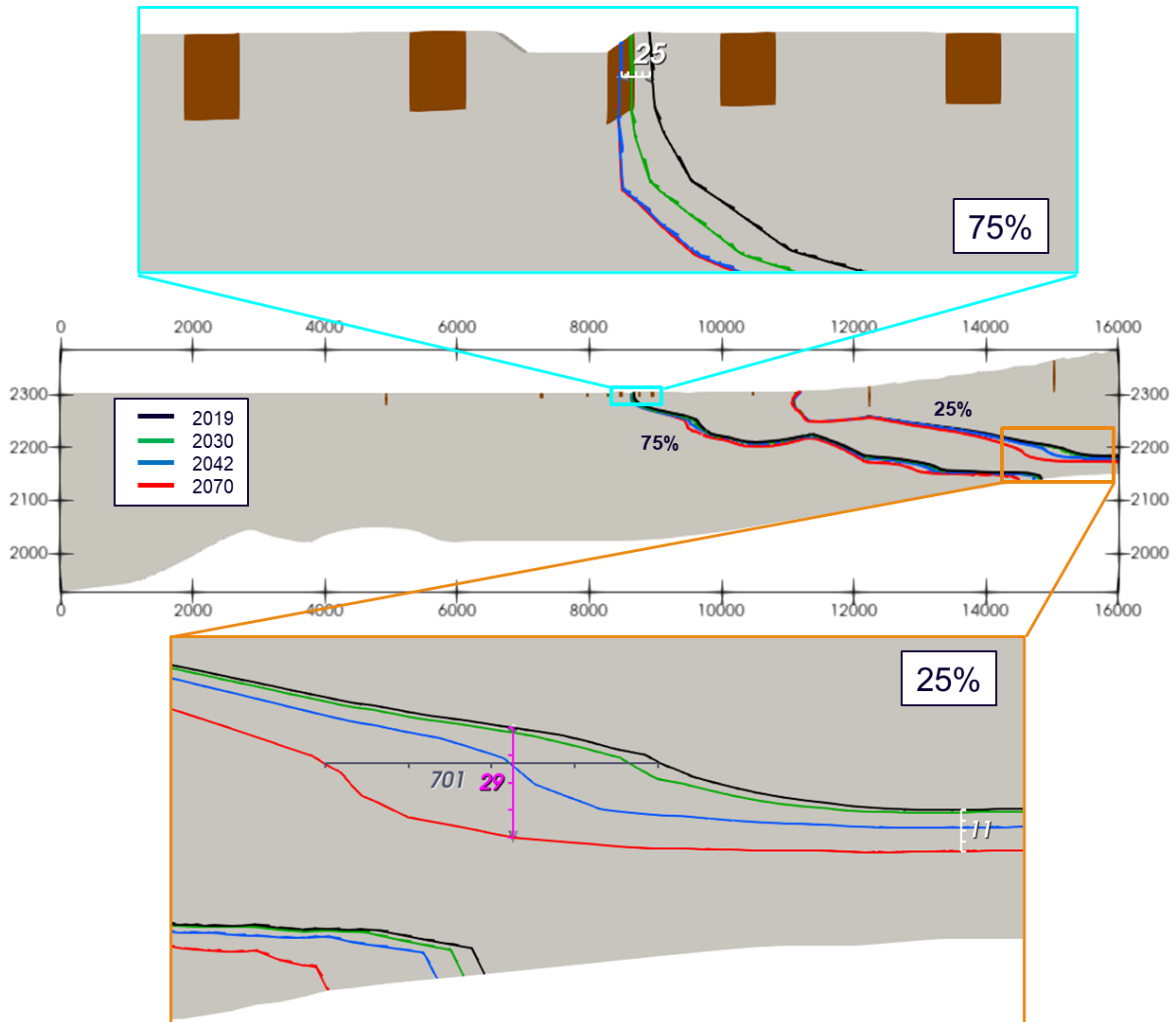
Fuente: Elaboración propia





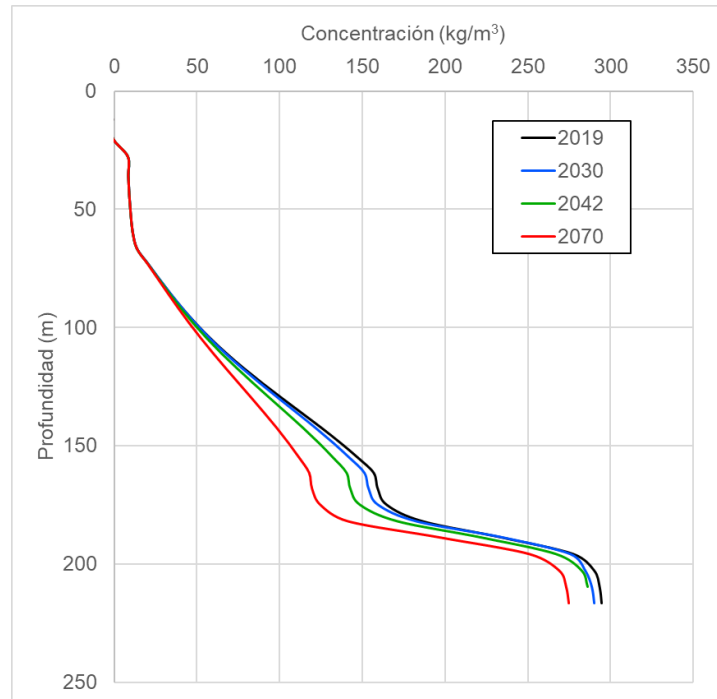
**Figura 5-3: Mapas de isoconcentración (25%  $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ , 50%  $C=165 \text{ kg/m}^3$  y 75%  $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para el perfil de Quelana para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 1.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-4: Zoom a los desplazamientos horizontales (superficial y profundo) y verticales de las isoconcentraciones del 25% y 75% para el escenario 1 del perfil de Quelana.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-5: Distribución vertical de la concentración para  $x=14.025$  m para el perfil de Quelana para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 1.**

Fuente: Elaboración propia

## 5.1.2 Escenarios con RCA vigentes y situaciones adicionales hipotéticas de extracción y recarga

### 5.1.2.1 Escenario 3

El escenario 3 corresponde al Caso Base (extracciones de salmuera y agua dulce/industrial aprobadas según las RCA vigentes al año 2019) más las siguientes situaciones hipotéticas (detalle de las extracciones por año en la Tabla 2-2):

- 1) Extensión de la extracción de agua industrial de CMZ hasta 2031.
- 2) Extensión por 10 años de la extracción de agua industrial y salmuera a las tasas aprobadas por RCA 226/2006 a SQM, hasta el 2040 (1.700 l/s para salmuera y 240 l/s para agua dulce/industrial).

La Tabla 5-2 muestra los descensos máximos calculados en los puntos de control para el perfil de Quelana a partir del escenario 3. La evolución de niveles para cada punto de control se muestra en la Figura 5-6.

Los resultados obtenidos a partir del escenario 3 evidencian un aumento en los descensos con respecto al caso base (escenario 1), donde los descensos máximos se producían principalmente por las oscilaciones naturales producto de la interacción entre las precipitaciones y la evaporación. El aumento de los descensos se produce principalmente en la zona del Núcleo y en la zona Marginal. El mayor descenso en la zona del Núcleo se observa en el pozo SOPM-08 con 0,23 m, mientras que en la zona Marginal se observa en el pozo L3-16 con 0,17 m.

Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)
SOPM-08	0,23
L3-14	0,17
L3-13	0,14
L3-12	0,12
L3-11	0,21
L3-10	0,19
L3-9	0,13
L3-8	0,11
L3-6	0,07
L3-5	0,19
L3-15	0,15
L3-16	0,17

Tabla 5-2: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de Quelana obtenido a partir del escenario 3.

Fuente: Elaboración propia

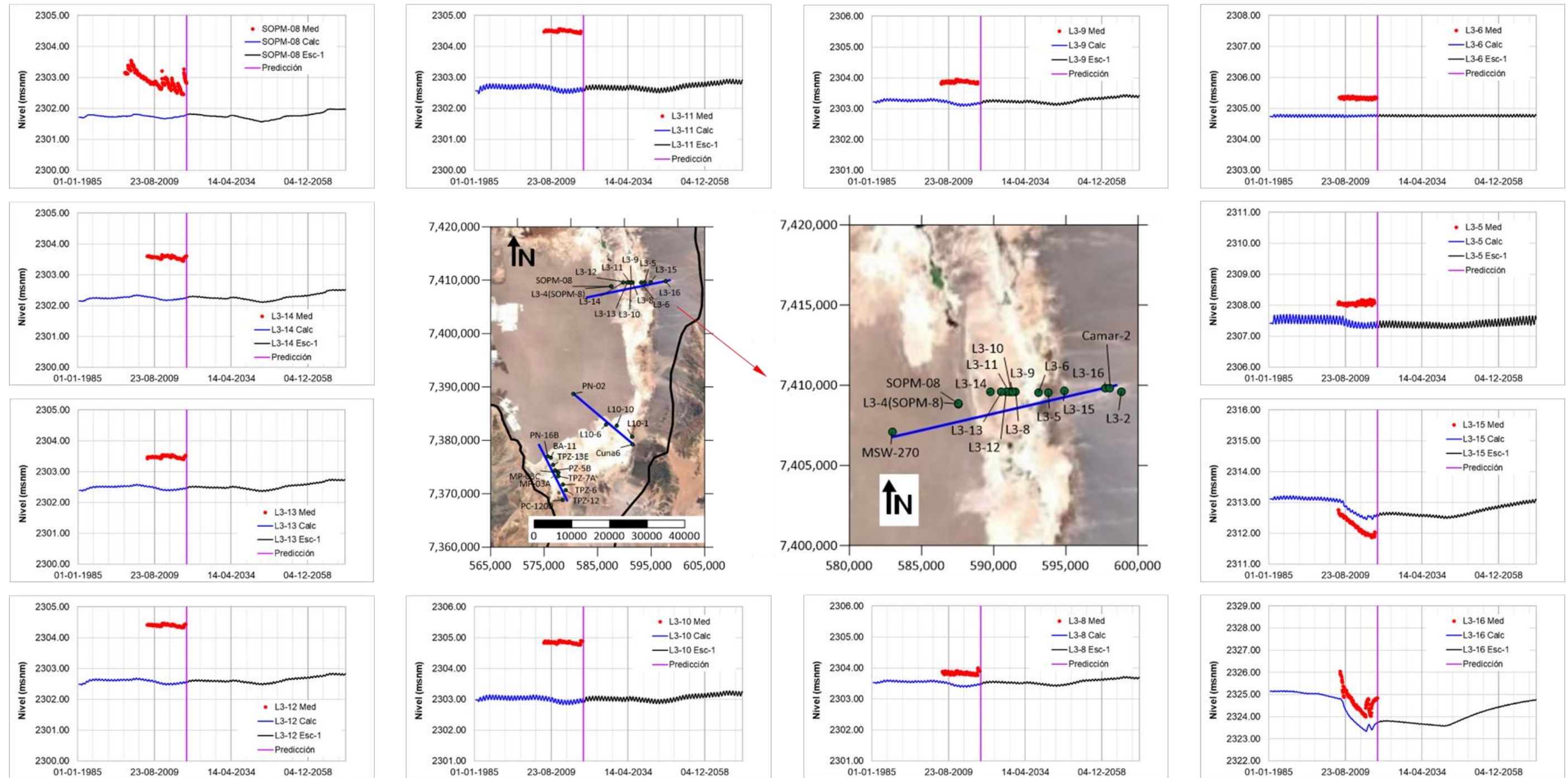


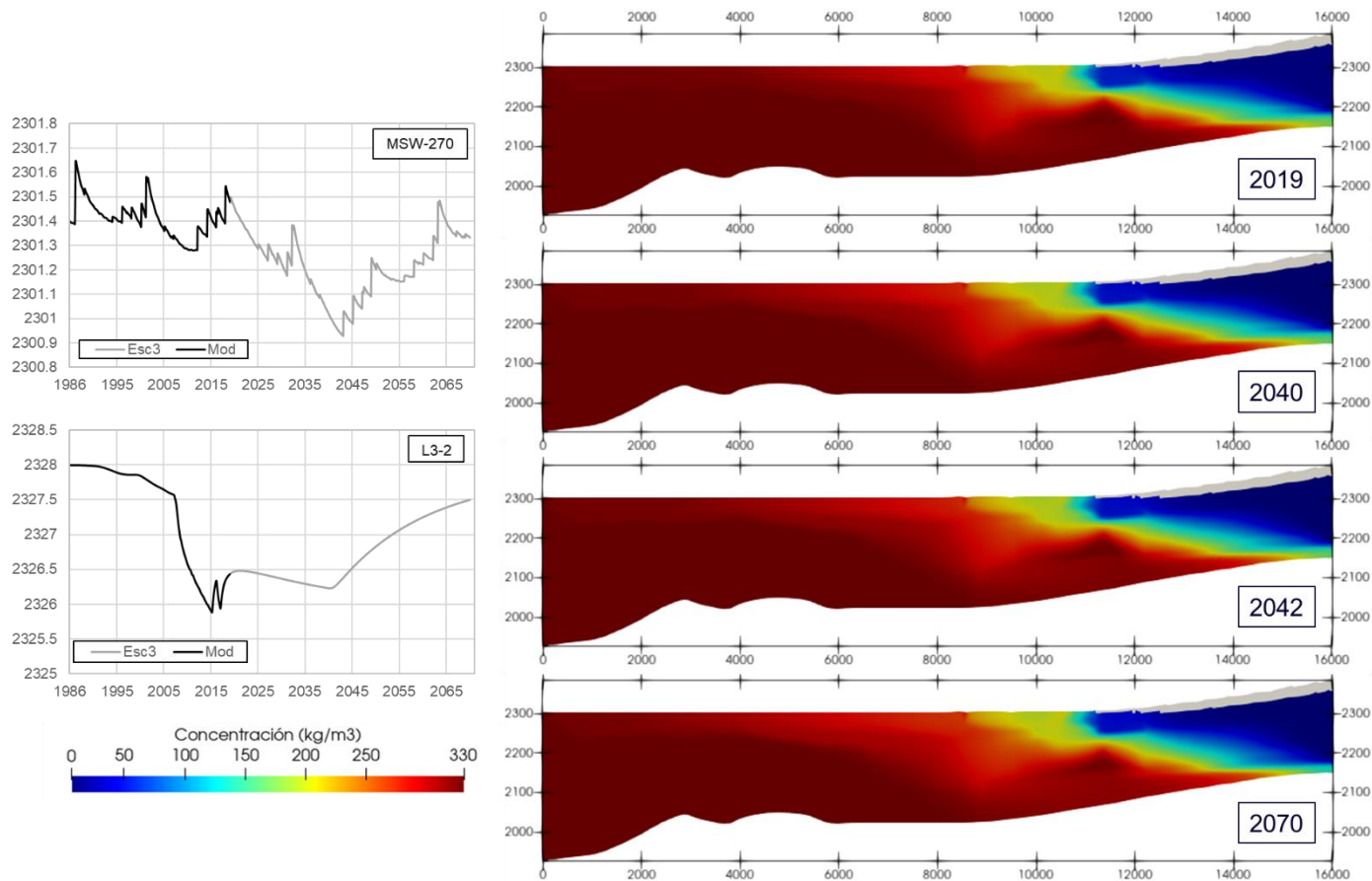
Figura 5-6: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil Quelana a partir del escenario 3.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5-7 se muestran los niveles impuestos como condición de contorno en los bordes del perfil de Quelana y los mapas de concentración para la condición inicial (diciembre de 2019), para diciembre de 2040, momento de cese de extracción de SQM u otro operador, para diciembre de 2042, momento de cese de extracción de Albemarle y la solución final para diciembre de 2070. La Figura 5-8 muestra los isocontornos de concentración del 25% ( $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ ), 50% ( $C=165 \text{ kg/m}^3$ ) y 75% ( $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para las mismas fechas.

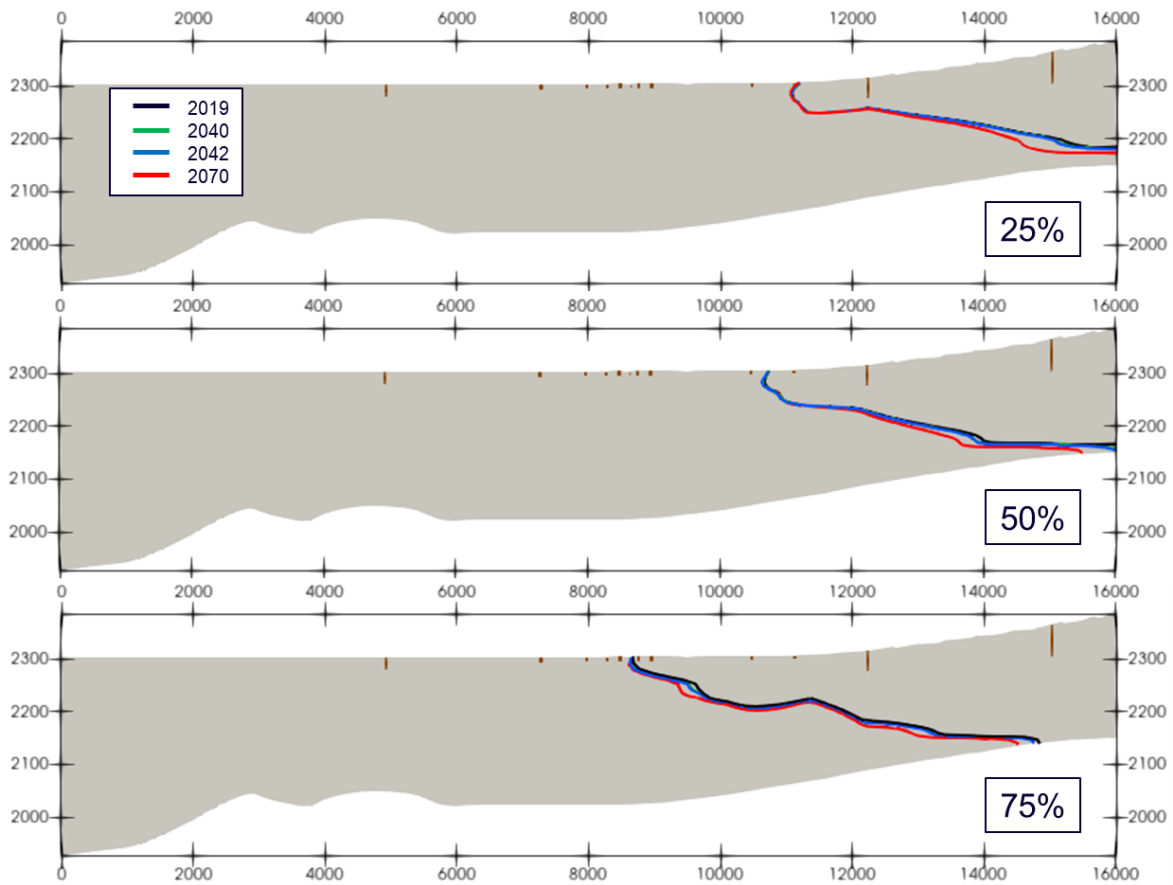
Como se observa en las figuras, desde el inicio de la simulación y hasta el año 2070 se observa un leve aumento del movimiento horizontal de la interfaz en superficie en comparación al caso base, aumentado de 25 m (escenario 1) a 39 m. A mayor profundidad se observa un comportamiento similar al caso base (escenario 1), pero con menores desplazamientos en profundidad, el mayor desplazamiento horizontal que ocurre en la isoconcentración del 25% es de aproximadamente 690, y el mayor desplazamiento vertical en la misma isoconcentración es de 28 m.

La Figura 5-9 muestra la distribución vertical de la concentración para una posición  $x$  igual a 14.025 m para la condición inicial, diciembre de 2040, diciembre de 2042, y la solución final para diciembre de 2070. En dicha figura se observa el desplazamiento horizontal y vertical de la interfaz, que ocurre en profundidad.



**Figura 5-7: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de Quelana para los años 2019, 2040, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 3.**

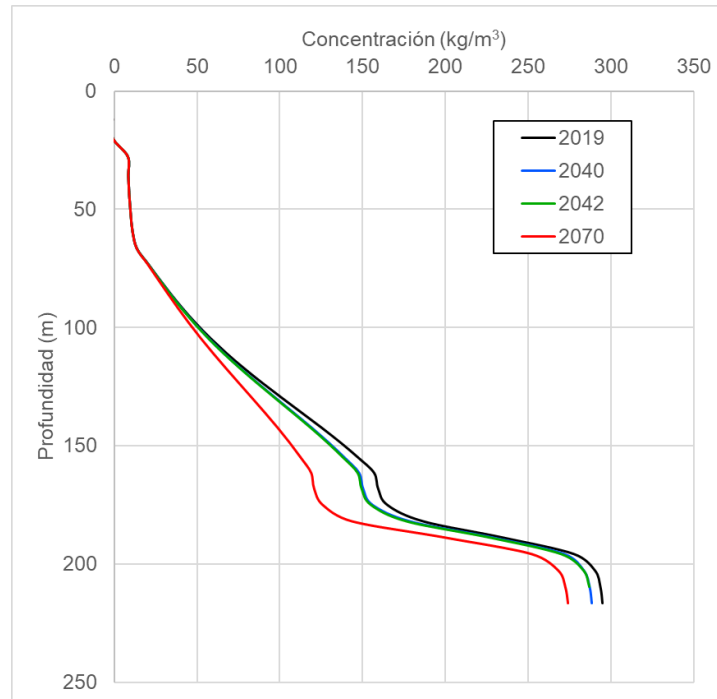
Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-8: Mapas de isoconcentración (25%  $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ , 50%  $C=165 \text{ kg/m}^3$  y 75%  $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para el perfil de Quelana para los años 2019, 2040, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 3.**

Fuente: Elaboración propia





**Figura 5-9: Distribución vertical de la concentración para  $x=14.025$  m para el perfil de Quelana para los años 2019, 2040, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 3.**

Fuente: Elaboración propia

#### 5.1.2.2 Escenario 4

El escenario 4 corresponde al Caso Base (extracciones de salmuera y agua dulce/industrial aprobadas según las RCA vigentes al año 2019), más las siguientes situaciones hipotéticas (detalle de las extracciones por año en la Tabla 2-2):

- 1) Extensión de la extracción de agua industrial de CMZ hasta 2031.
- 2) Reducción gradual hasta el 50% de la extracción de agua industrial y de salmuera de SQM desde 2021 hasta el año 2030. Esto es, al final del periodo, a 120 l/s para agua dulce y a 822 l/s para salmuera. Esta reducción gradual corresponde a las extracciones definidas en el Plan de Sustentabilidad de SQM en octubre de 2020.

La Tabla 5-3 muestra los descensos máximos calculados en los puntos de control para el perfil de Quelana a partir del escenario 4. En los puntos en los que el descenso es nulo en todo el periodo de simulación con respecto a los niveles obtenidos para diciembre de 2019

se marcan con 'x'. La evolución de niveles para cada punto de control se muestra en la Figura 5-10.

En comparación al caso base (escenario 1), se observan descensos menores en algunos pozos producto de la reducción de la extracción de SQM. En particular se observan menores descensos en el núcleo en los pozos SOPM-08 (0,05 m), L3-14 (0,04 m) y L3-13 (0,03 m), mientras que en la zona Marginal no se observan descensos en el pozo L3-16.

Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)
SOPM-08	0,05
L3-14	0,04
L3-13	0,03
L3-12	0,04
L3-11	0,14
L3-10	0,14
L3-9	0,06
L3-8	0,04
L3-6	0,07
L3-5	0,17
L3-15	0,06
L3-16	x

Tabla 5-3: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de Quelana obtenido a partir del escenario 4.

Fuente: Elaboración propia

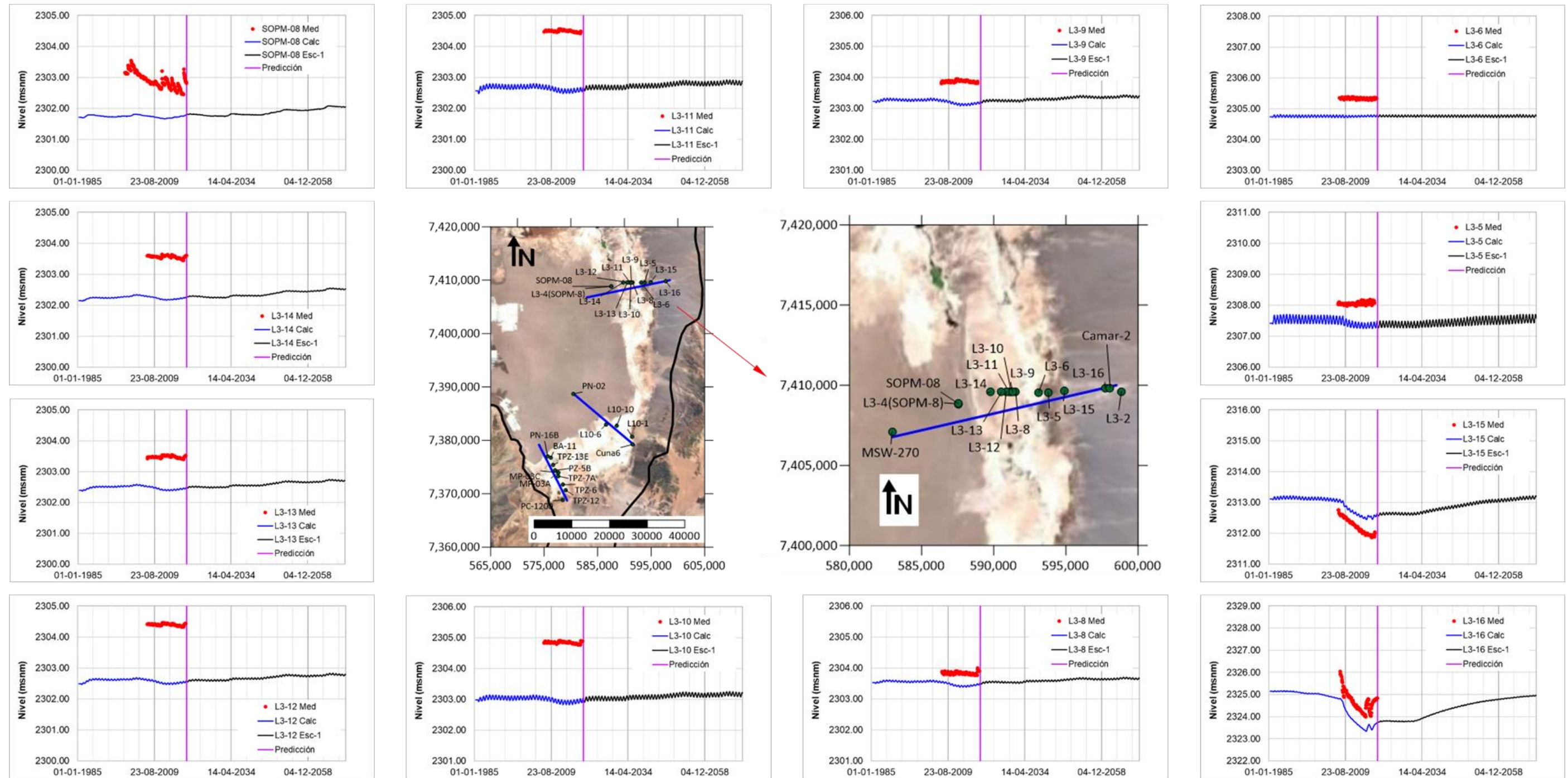


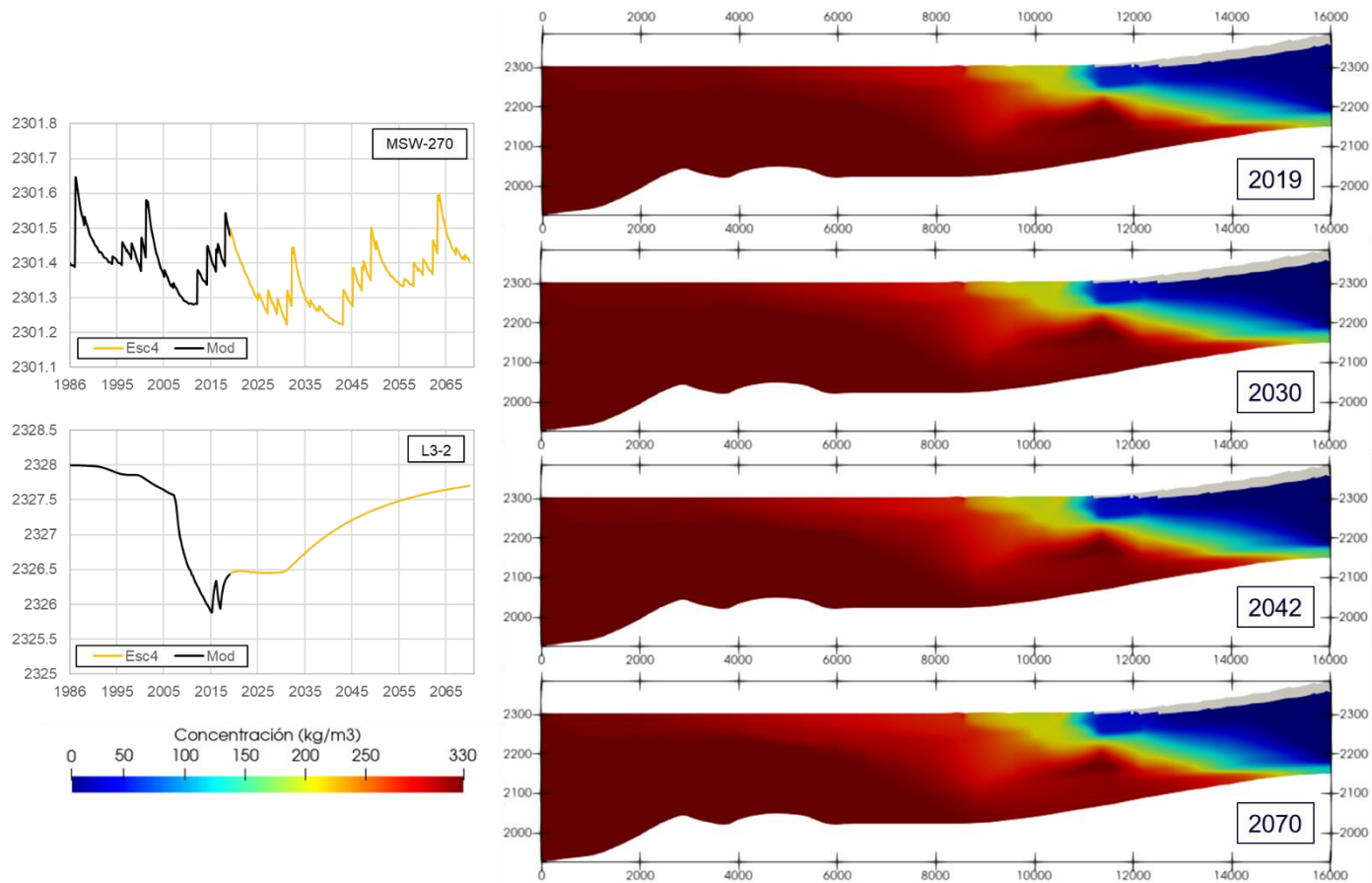
Figura 5-10: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil Quelana a partir del escenario 4.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5-11 se muestran los niveles impuestos como condición de contorno en los bordes del perfil de Quelana y los mapas de concentración para la condición inicial (diciembre de 2019), para diciembre de 2030, momento de cese de extracción de SQM, diciembre de 2042, momento de cese de extracción de Albemarle y la solución final para diciembre de 2070. La Figura 5-12 muestra los isocontornos de concentración del 25% ( $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ ), 50% ( $C=165 \text{ kg/m}^3$ ) y 75% ( $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para las mismas fechas.

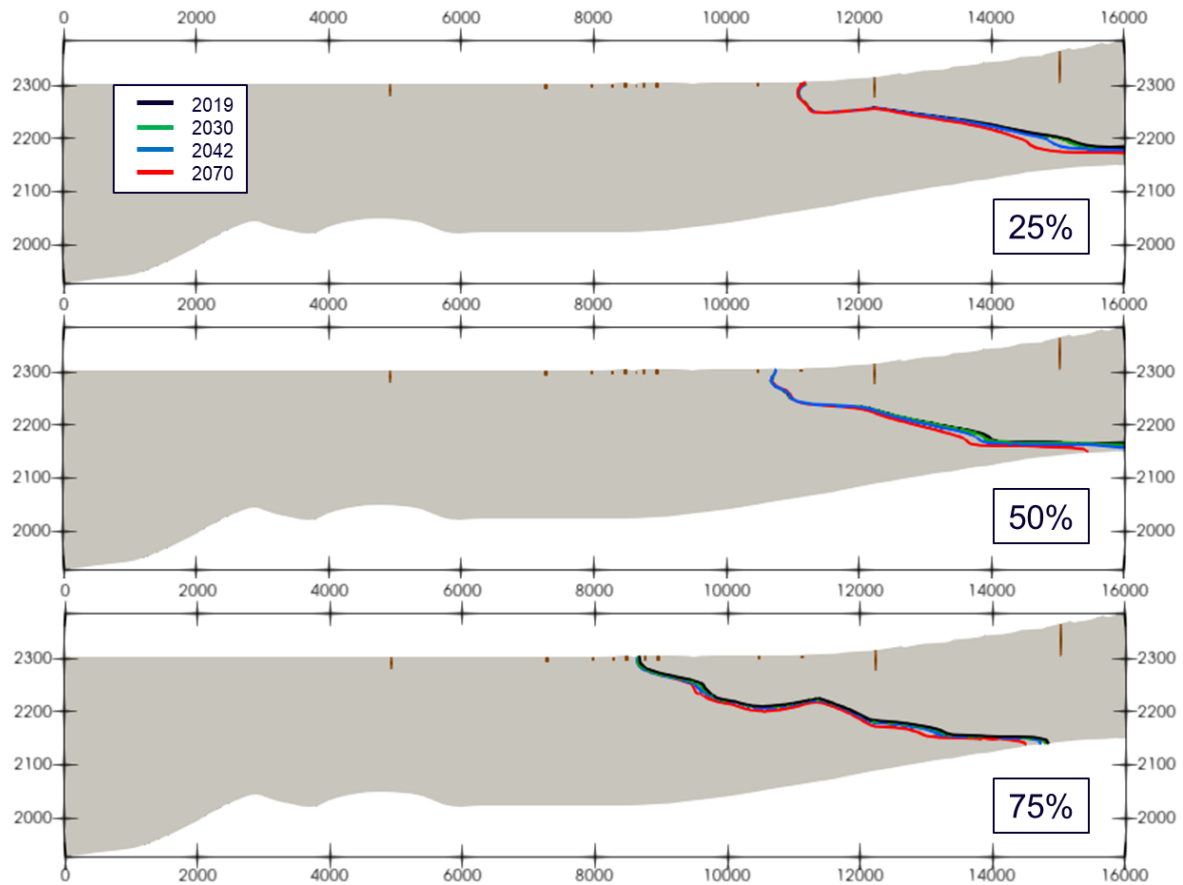
Los resultados en cuanto a movimiento de la interfaz, son muy similares a los del caso base (escenario 1). Como se observa en las figuras, desde el inicio de la simulación y hasta el año 2070 se observa un leve movimiento horizontal de la interfaz en los primeros metros de profundidad, principalmente para la isoconcentración del 75%. A mayor profundidad si se observa un desplazamiento, horizontal y vertical de la interfaz salina, la que va aumentando hasta el año 2070, en el cual la interfaz se mueve hacia el núcleo y se profundiza en la parte más salina. El mayor desplazamiento horizontal es el que ocurre en la isoconcentración del 25%, desde el inicio al fin de la simulación es de aproximadamente 700 m hacia el oeste (en profundidad), y el mayor desplazamiento vertical en la misma isoconcentración en profundidad es de 29 m. El mayor desplazamiento horizontal en superficie se produce en la isoconcentración del 75% y es de aproximadamente 25 m.

La Figura 5-13 muestra la distribución vertical de la concentración para  $x$  igual a 14.025 m para la condición inicial, diciembre de 2030, diciembre de 2042, y la solución final para diciembre de 2070. En dicha figura se observa el desplazamiento horizontal y vertical de la interfaz, que ocurre en profundidad.



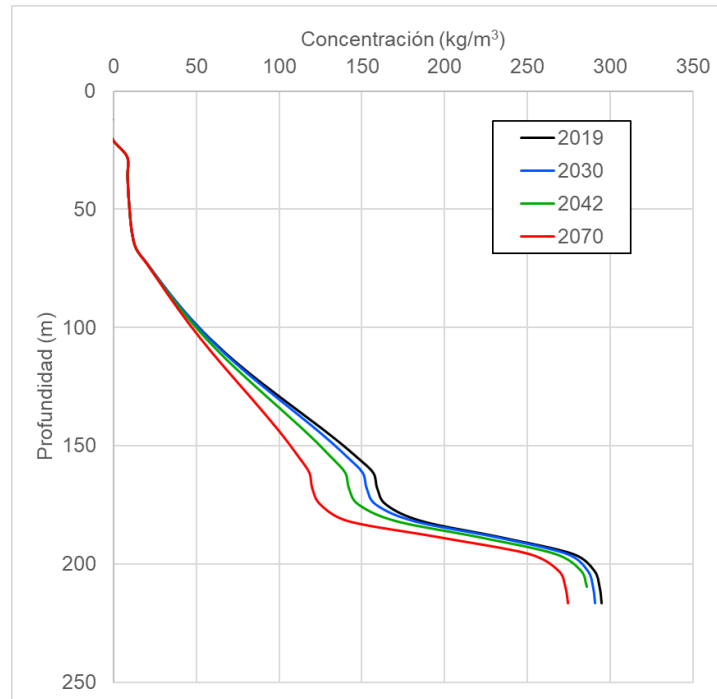
**Figura 5-11: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de Quelana para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 4.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-12: Mapas de isoconcentración (25%  $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ , 50%  $C=165 \text{ kg/m}^3$  y 75%  $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para el perfil de Quelana para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 4.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-13: Distribución vertical de la concentración para  $x=14.025$  m para el perfil de Quelana para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 4.**

Fuente: Elaboración propia

### 5.1.2.3 Escenario 7

El escenario 7 corresponde al Caso Base (extracciones de salmuera y agua dulce/industrial aprobadas según las RCA vigentes al año 2019) más las siguientes situaciones hipotéticas (detalle de las extracciones por año en la Tabla 2-2):

- 1) Extensión de la extracción de agua industrial de CMZ hasta 2031.
- 2) Reducción de la recarga producto del cambio climático en 15% entre los años 2020 y 2044, y en 18% entre 2045 a 2070, de acuerdo con el análisis presentado en el capítulo 2.2.

La Tabla 5-4 muestra los descensos máximos calculados en los puntos de control para el perfil de Quelana a partir del escenario 7. La evolución de niveles para cada punto de control se muestra en la Figura 5-14.

Los descensos obtenidos a partir del escenario 7 son mayores a los obtenidos a partir de los escenarios 1 y 4, pero menores a los del escenario 3, con excepción de la zona Marginal, donde los descensos son mayores a los obtenidos en el resto de los escenarios, debido a la disminución de la recarga. Los mayores descensos en la zona del Núcleo se observan en el pozo SOPM-08 (0,11 m) y L3-14 (0,1 m), mientras que en la zona Marginal se producen en el pozo L3-16 (0,48 m) y L3-15 (0,26 m).

Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)
SOPM-08	0,11
L3-14	0,10
L3-13	0,09
L3-12	0,09
L3-11	0,18
L3-10	0,17
L3-9	0,11
L3-8	0,09
L3-6	0,06
L3-5	0,21
L3-15	0,26
L3-16	0,48

Tabla 5-4: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de Quelana obtenido a partir del escenario 7.

Fuente: Elaboración propia



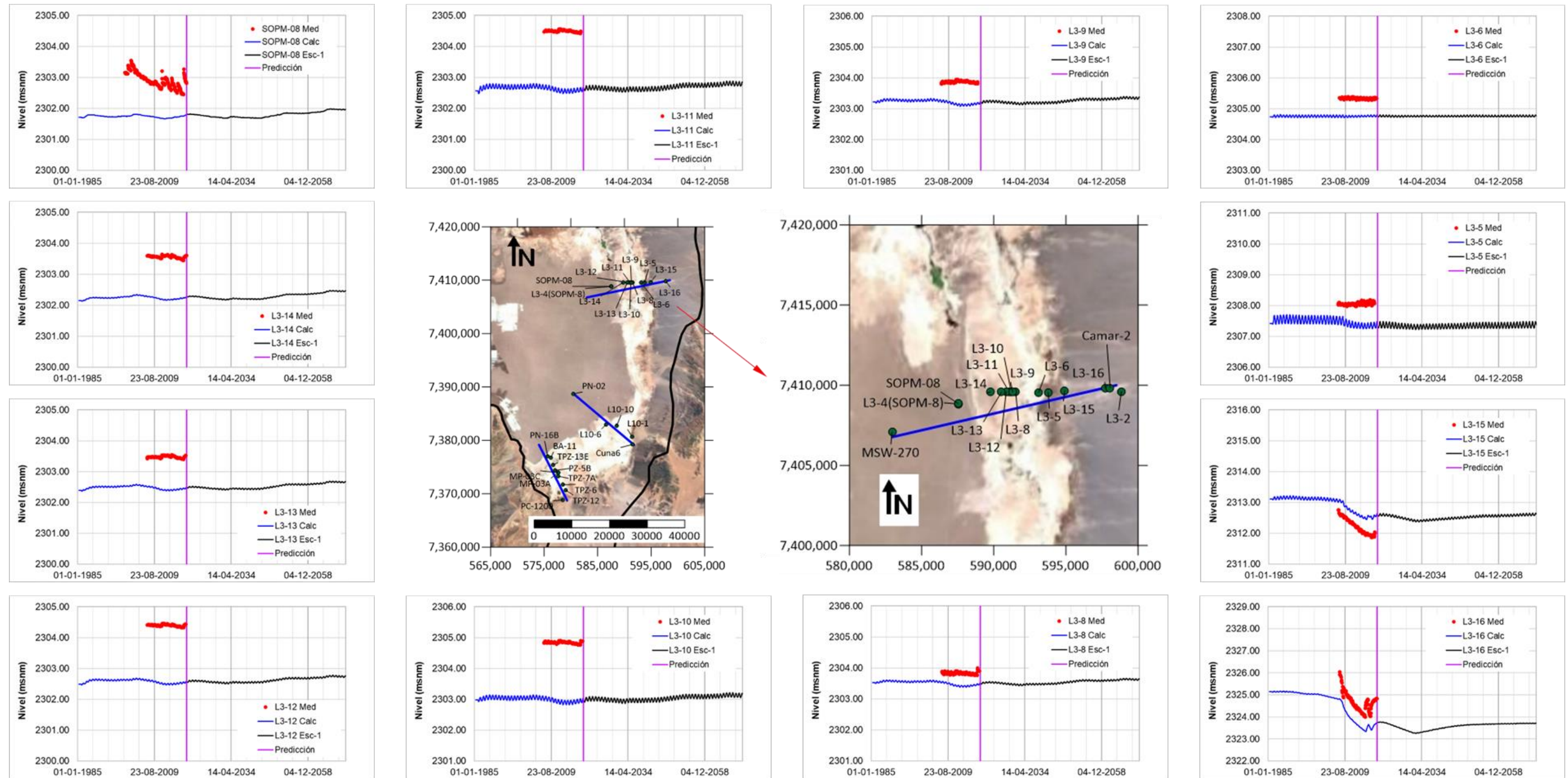


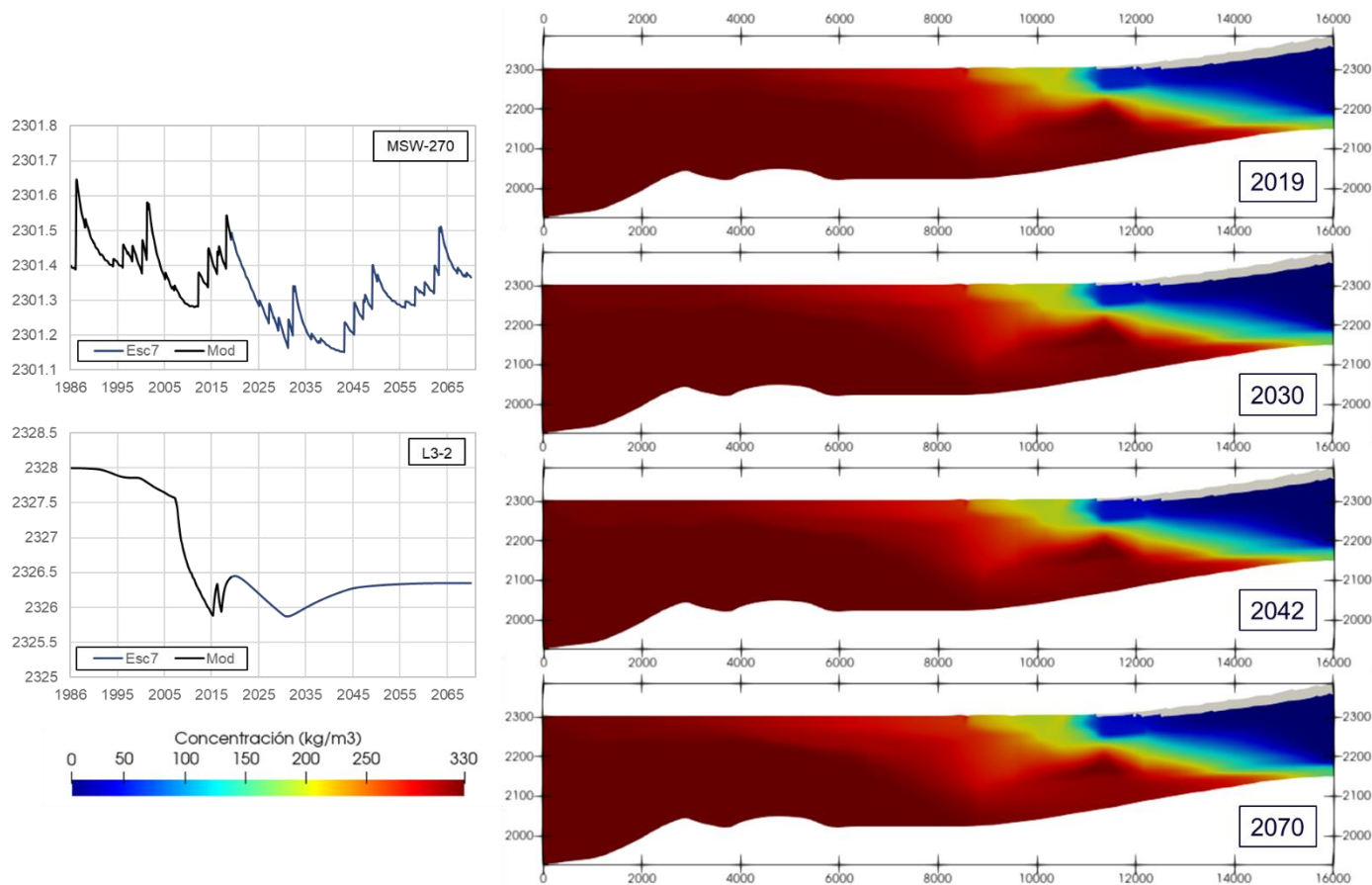
Figura 5-14: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil Quelana a partir del escenario 7.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5-15 se muestran los niveles impuestos como condición de contorno en los bordes del perfil de Quelana y los mapas de concentración para la condición inicial (diciembre de 2019), para diciembre de 2030, momento de cese de extracción de SQM, diciembre de 2042, momento de cese de extracción de Albemarle y la solución final para diciembre de 2070. La Figura 5-16 muestra los isocontornos de concentración del 25% ( $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ ), 50% ( $C=165 \text{ kg/m}^3$ ) y 75% ( $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para las mismas fechas.

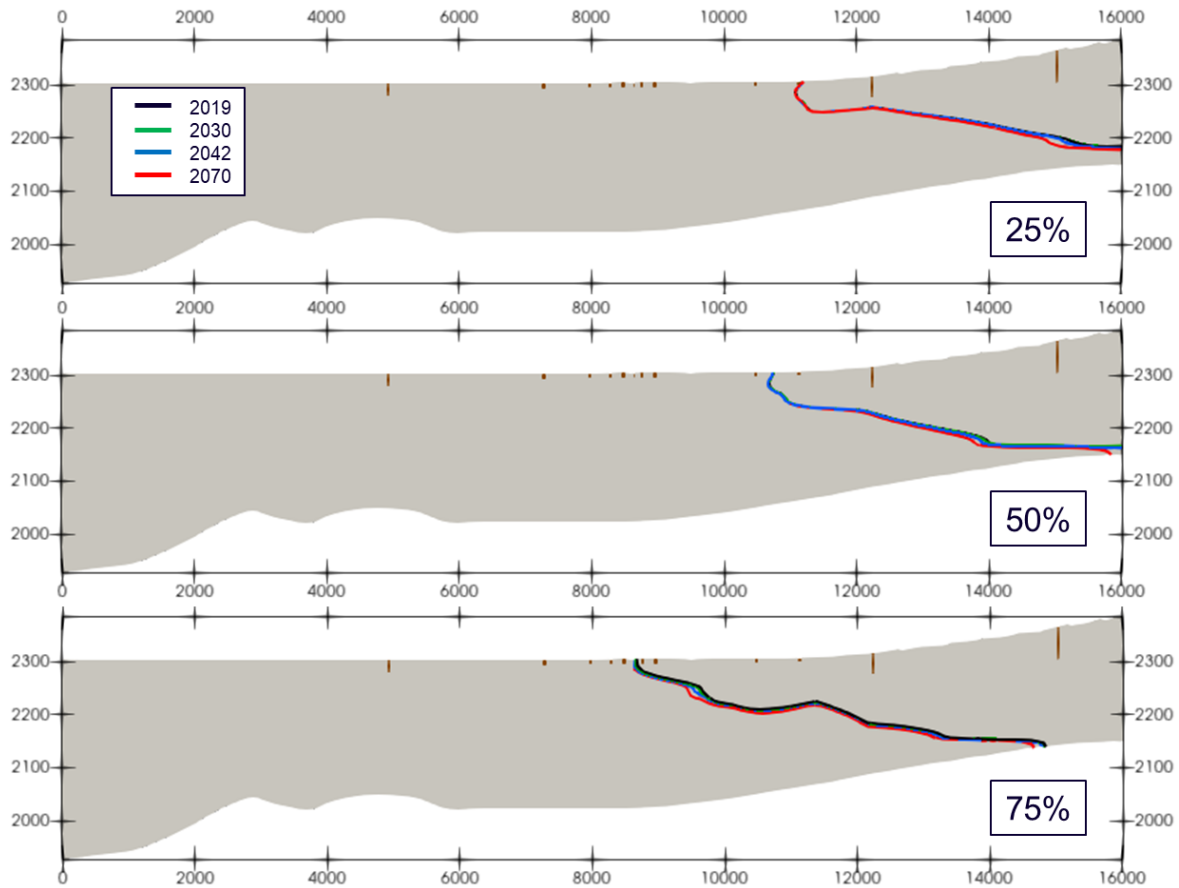
En términos del movimiento de la interfaz, los resultados son similares al caso base (escenario 1), pero en este caso el movimiento horizontal y vertical de la interfaz en las zonas más profundas del perfil es mucho menor, de forma que el máximo desplazamiento horizontal ocurre en la isoconcentración del 25% y es de aproximadamente 335 m y el mayor desplazamiento vertical ocurre en la isoconcentración del 75% y es de aproximadamente 24 m. Mientras que el mayor desplazamiento horizontal en superficie aumenta con respecto al caso base (escenario 1) de 25 m a 35 m aproximadamente para la isoconcentración del 75%.

La Figura 5-17 muestra la distribución vertical de la concentración para  $x$  igual a 14.025 m para la condición inicial, diciembre de 2030, diciembre de 2042, y la solución final para diciembre de 2070. En dicha figura se observa el desplazamiento horizontal y vertical de la interfaz, que ocurre en profundidad.



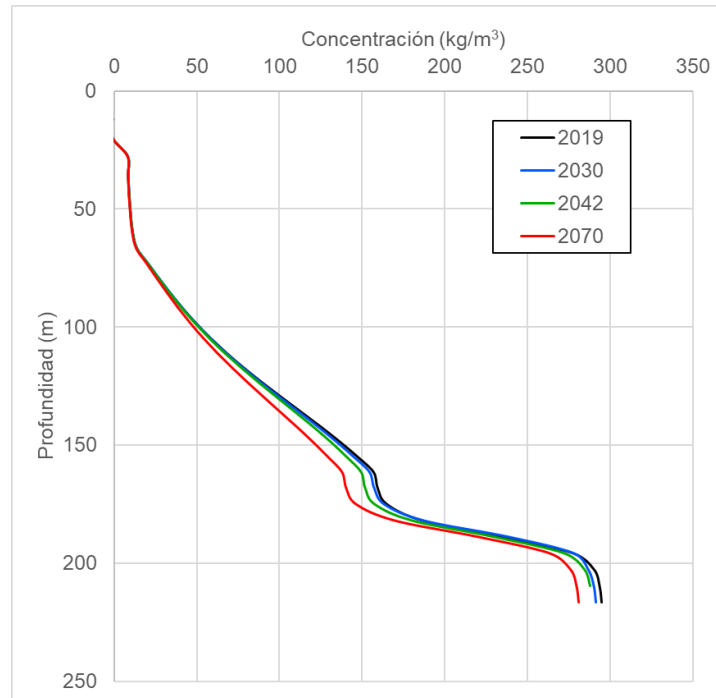
**Figura 5-15: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de Quelana para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 7.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-16: Mapas de isoconcentración (25%  $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ , 50%  $C=165 \text{ kg/m}^3$  y 75%  $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para el perfil de Quelana para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 7.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-17:** Distribución vertical de la concentración para  $x=14.025$  m para el perfil de Quelana para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 7.

Fuente: Elaboración propia

## 5.2 Perfil Peine

Al igual que para el perfil de Quelana, en el perfil de Peine se han simulado el caso base (escenario 1, equivalente al escenario 2), el escenario 3, el escenario 4 y el escenario 7. A continuación, se detallan los resultados obtenidos a partir de los escenarios de gestión simulados para el perfil Peine.

### 5.2.1 Escenarios con RCA vigente

#### 5.2.1.1 Escenario 1

El escenario 1, denominado Caso Base, incluye las extracciones de salmuera y agua dulce/industrial aprobadas según las RCA vigentes al año 2019 (detalle extracciones por año en la Tabla 2-2) y que en términos generales corresponden a:

- 1) Las extracciones de salmuera y agua industrial de SQM hasta el año 2030.
- 2) Las extracciones de salmuera y agua industrial de Albemarle hasta el 2042.
- 3) La extracción de agua industrial de CMZ hasta el 2023.
- 4) Las extracciones de agua dulce en el sector norte por los APR.

Adicionalmente, para este y todos los demás escenarios, se considera el cese de la extracción de MEL.

La Tabla 5-5 muestra los descensos máximos calculados en los puntos de control para el perfil de Peine a partir del escenario 1. La evolución de niveles para cada punto de control se muestra en la Figura 5-18.

El máximo descenso con respecto a la situación de diciembre de 2019 se obtiene en el punto de observación PN-02, con un descenso de 0,47 m. En los puntos de observación L10-6 y L10-10 se obtienen descensos máximos de 0,1 m y 5 cm respectivamente. Finalmente, en los puntos de observación L10-1 y Cuña 6 se obtienen descensos de 4 cm. Por tanto, el máximo efecto se localiza en los puntos cercanos al Núcleo y dicho efecto disminuye hacia el Sureste de la cuenca.

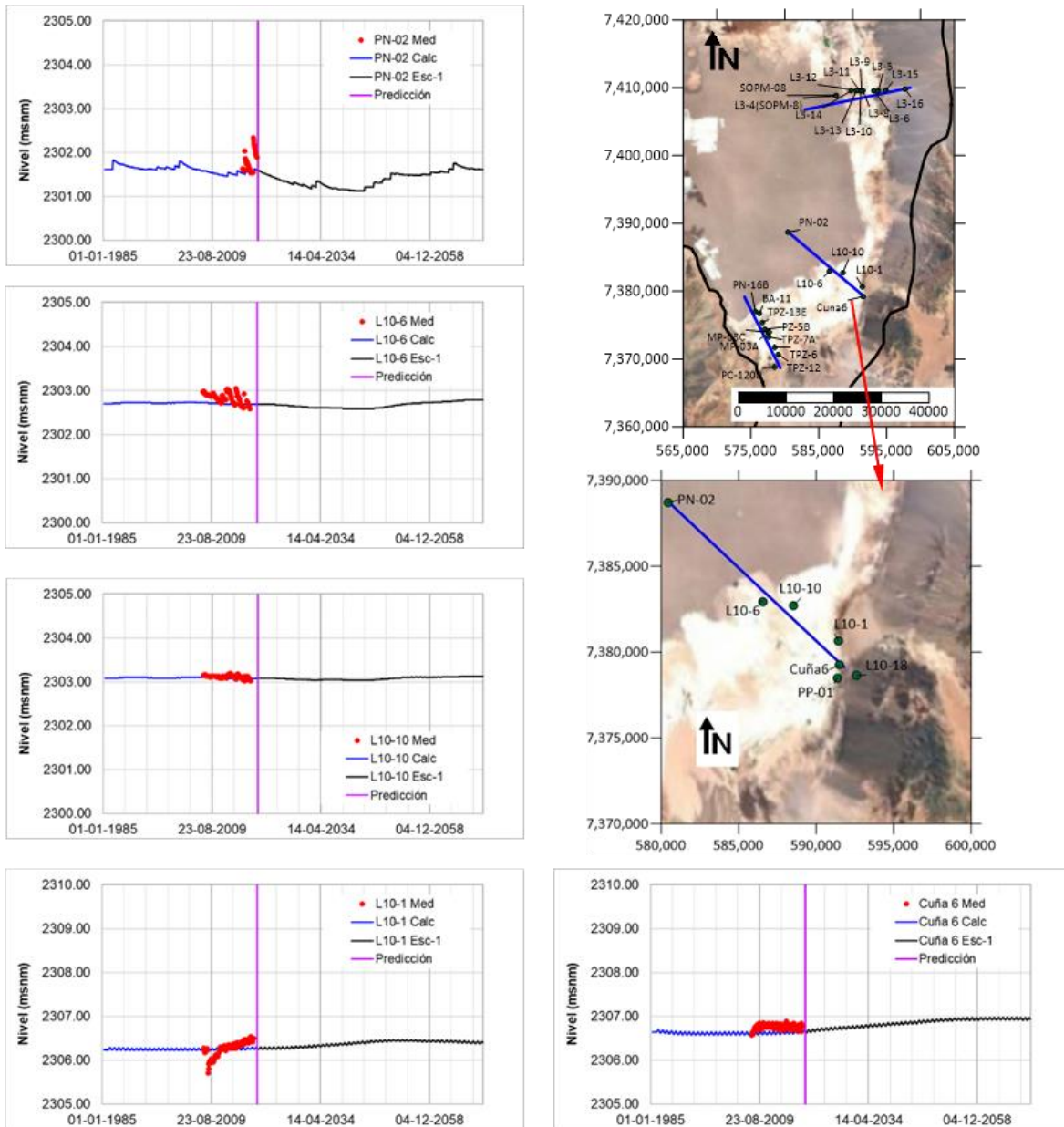
Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)
PN-02	0,47
L10-6	0,10
L10-10	0,05
L10-1	0,04
Cuña 6	0,04

Tabla 5-5: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de Peine obtenido a partir del escenario 1.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5-19 se muestran los niveles impuestos como condición de contorno en los bordes del perfil de Peine y los mapas de concentración para la condición inicial (diciembre de 2019), para diciembre de 2030, momento de cese de extracción de SQM, diciembre de 2042, momento de cese de extracción de Albemarle y la solución final para diciembre de 2070. La Figura 5-20 muestra los isocontornos de concentración del 25% ( $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ ), 50% ( $C=165 \text{ kg/m}^3$ ) y 75% ( $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para las mismas fechas.

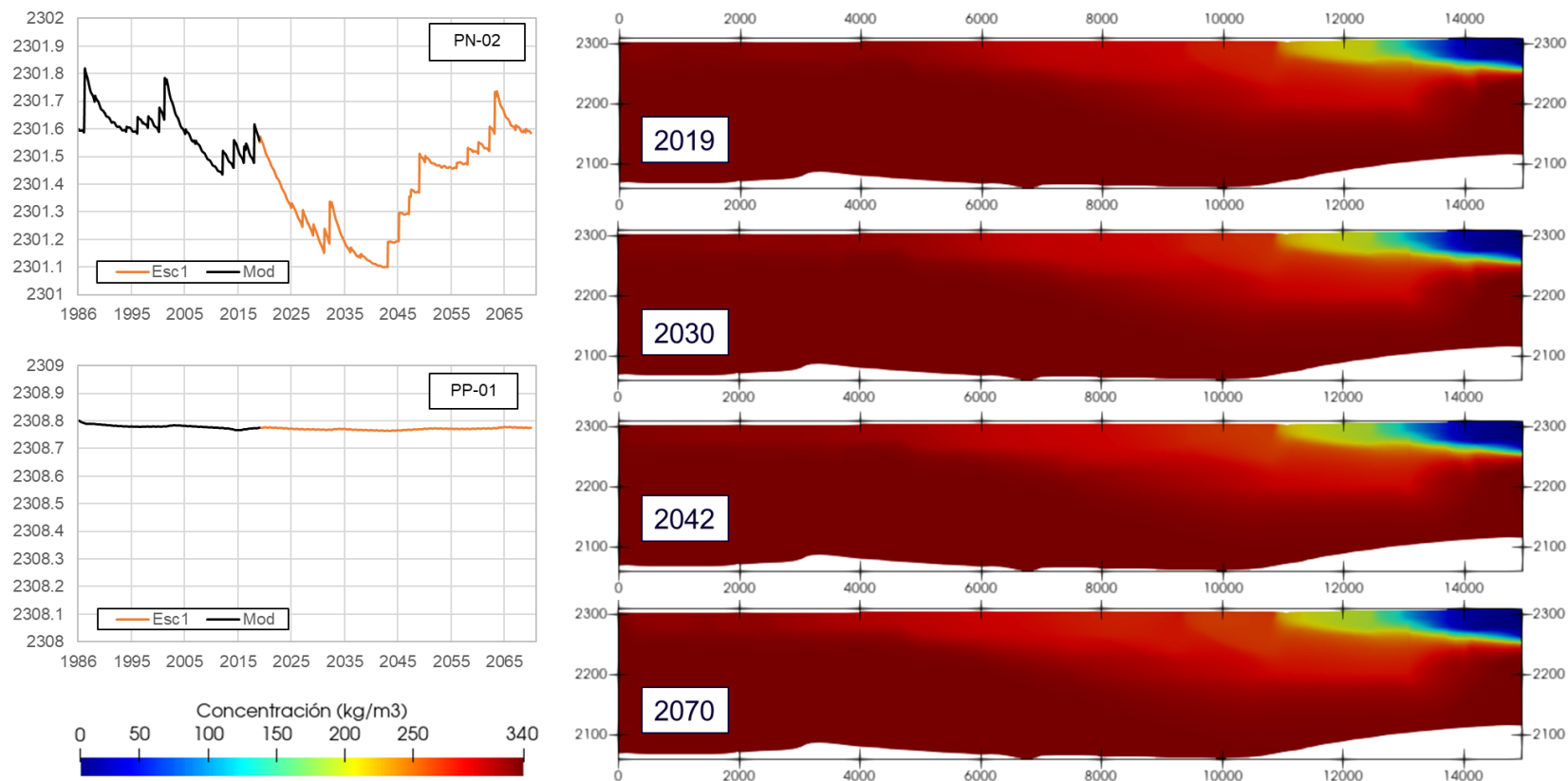
Como se observa en las figuras para este escenario, la interfaz salina presenta desplazamientos horizontales y verticales muy pequeños, salvo en la curva de isoconcentración del 25% de concentración, del año 2019 al año 2070, donde se observa un desplazamiento en horizontal de la interfaz en la superficie de 125 m aproximadamente (Figura 5-21). Respecto a desplazamientos verticales, se observa una profundización de la interfaz en las 3 isoconcentraciones, pero no superan los 5 m (Figura 5-21).



**Figura 5-18: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil Peine a partir del escenario 1.**

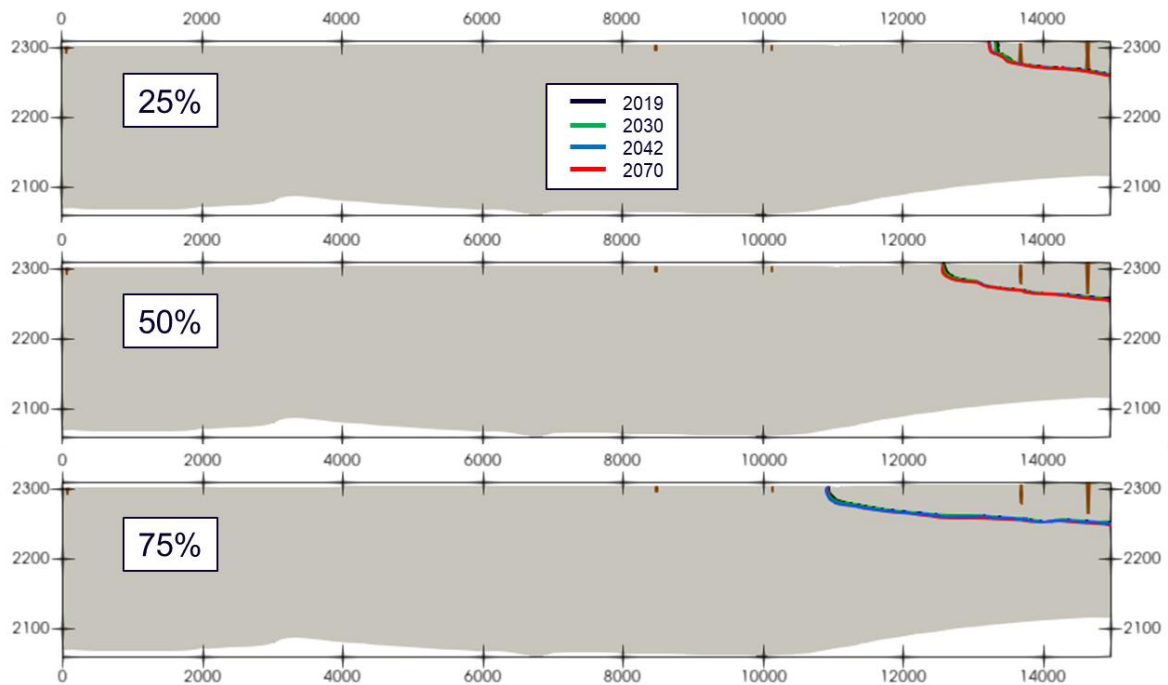
Fuente: Elaboración propia





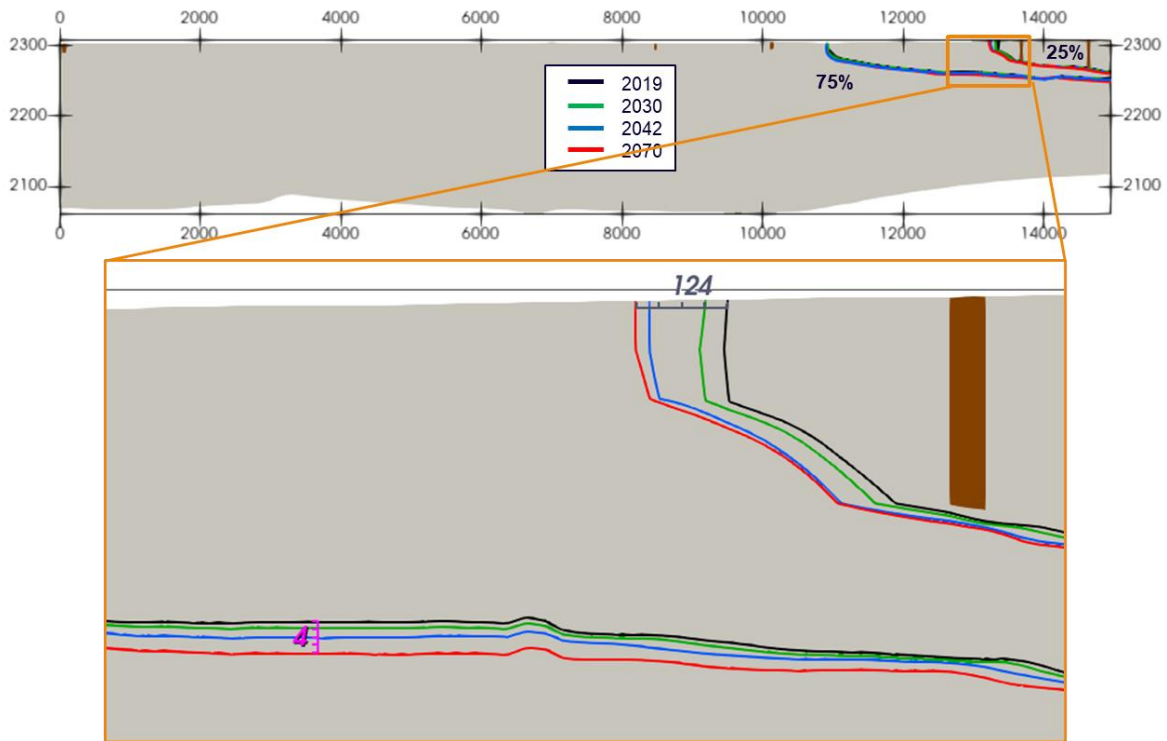
**Figura 5-19: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de Peine para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 1.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-20: Mapas de isoconcentración (25%  $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ , 50%  $C=165 \text{ kg/m}^3$  y 75%  $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para el perfil de Peine para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 1.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-21: Zoom al desplazamiento horizontal superficial y vertical de las isoconcentraciones del 25% y 75% para el escenario 1 del perfil de Peine.**

Fuente: Elaboración propia

## 5.2.2 Escenarios con RCA vigentes y situaciones adicionales hipotéticas de extracción y recarga

### 5.2.2.1 Escenario 3

El escenario 3 corresponde al Caso Base (extracciones de salmuera y agua dulce/industrial aprobadas según las RCA vigentes al año 2019) más las siguientes situaciones hipotéticas (detalle de las extracciones por año en la Tabla 2-2):

- 1) Extensión de la extracción de agua industrial de CMZ hasta 2031.
- 2) Extensión por 10 años de la extracción de agua industrial y salmuera a las tasas aprobadas por RCA 226/2006 a SQM, hasta el 2040 (1.700 l/s para salmuera y 240 l/s para agua dulce/industrial).

La Tabla 5-6 muestra los descensos máximos calculados en los puntos de control para el perfil de Peine a partir del escenario 3. La evolución de niveles para cada punto de control se muestra en la Figura 5-22.

En comparación al caso base, se observan mayores descensos en la zona del Núcleo, mientras que en la zona Marginal no se observan diferencias. El máximo descenso con respecto a la situación de diciembre de 2019 se obtiene en el punto de observación PN-02, con un descenso de 0,73 m. En los puntos de observación L10-6 y L10-10 se obtienen descensos máximos de 0,16 m y 8 cm respectivamente. Finalmente, en los puntos de observación L10-1 y Cuña 6 se obtienen descensos de 4 cm. Por tanto, el máximo efecto se localiza en los puntos cercanos al Núcleo y dicho efecto disminuye hacia el Sureste de la cuenca.

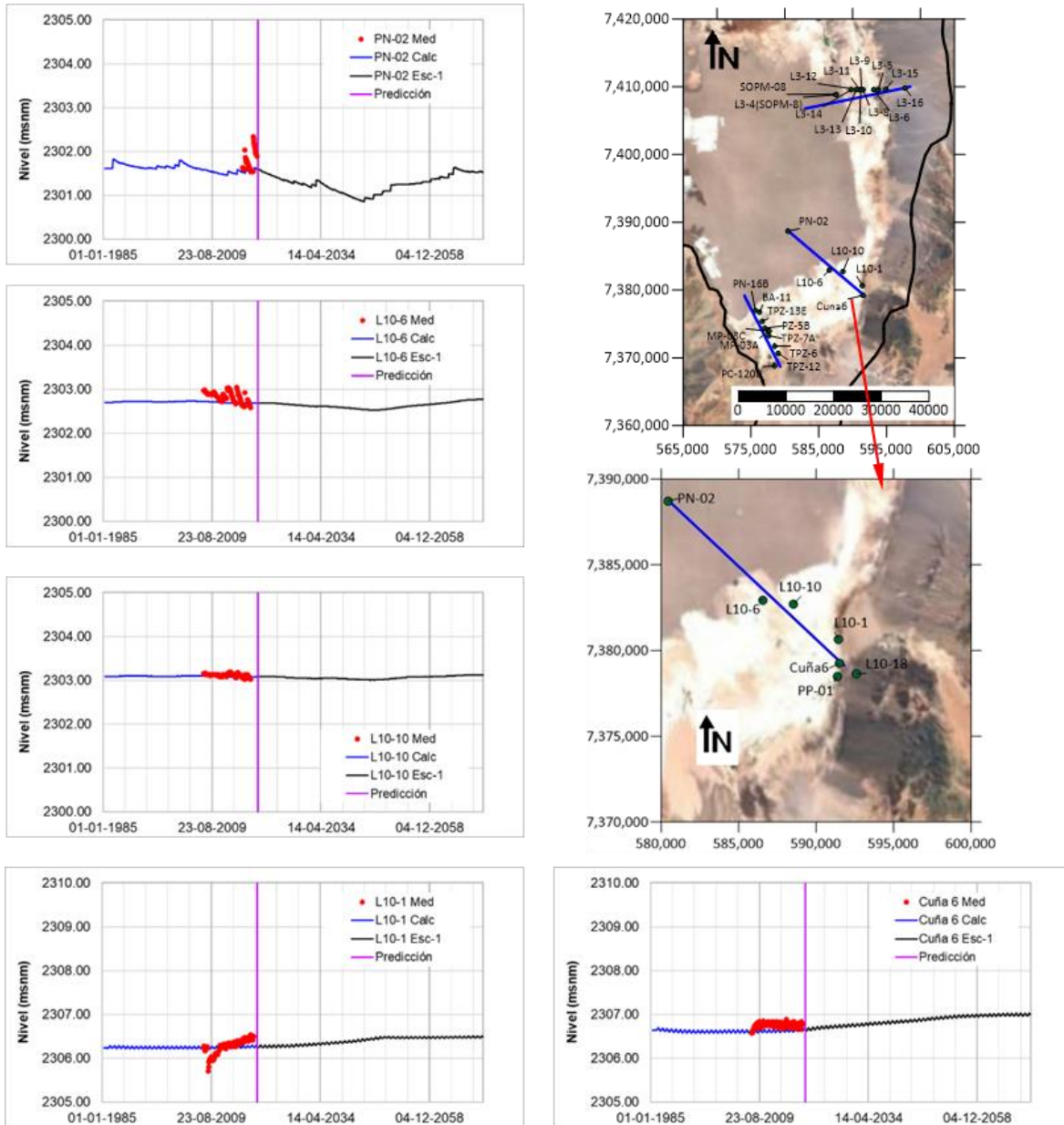
Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)
PN-02	0,73
L10-6	0,16
L10-10	0,08
L10-1	0,04
Cuña 6	0,04

Tabla 5-6: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de Peine obtenido a partir del escenario 3.

Fuente: Elaboración propia

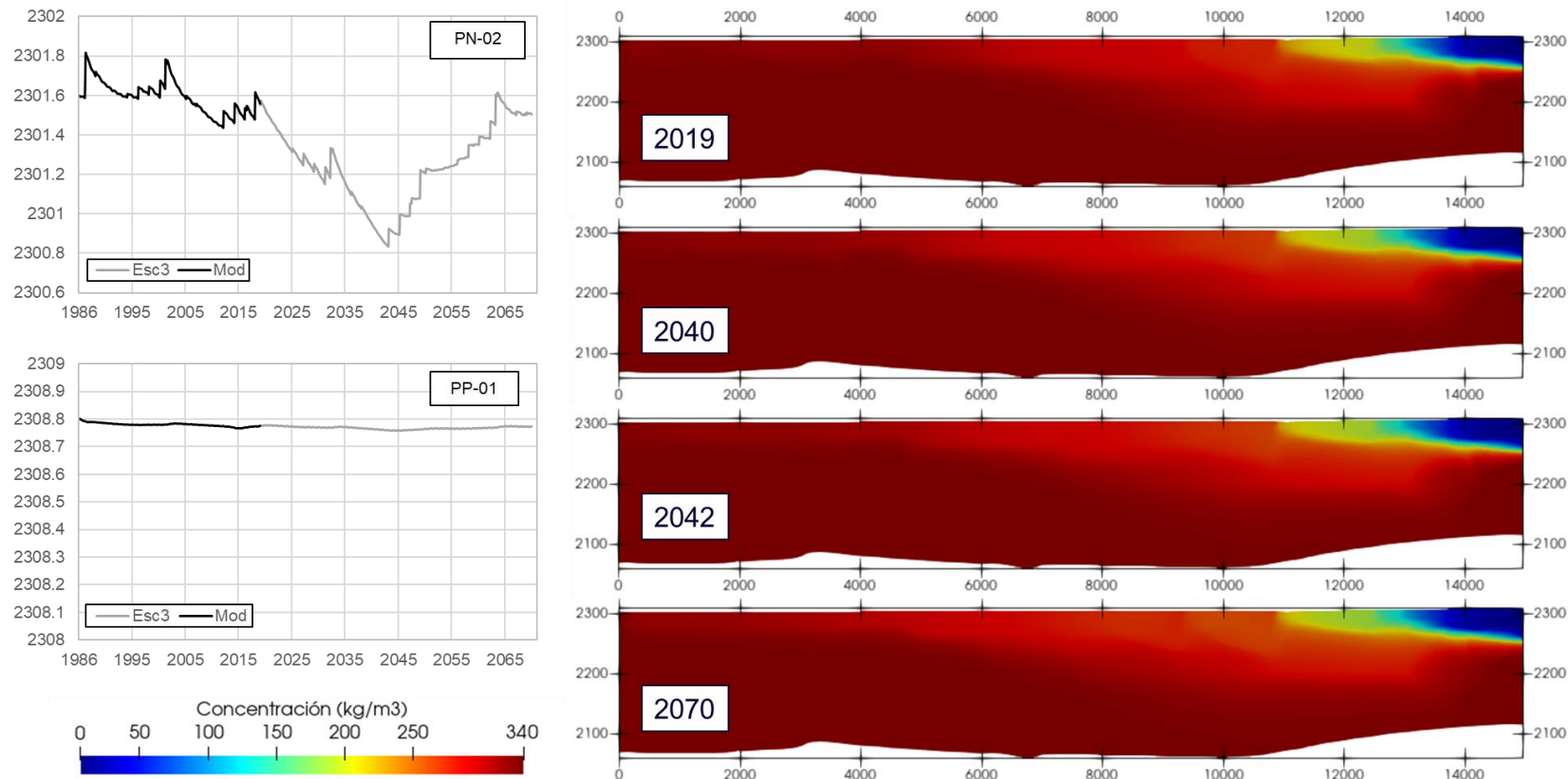
En la Figura 5-23 se muestran los niveles impuestos como condición de contorno en los bordes del perfil de Peine y los mapas de concentración para la condición inicial (diciembre de 2019), para diciembre de 2040, momento de cese de extracción de SQM u otro operador, diciembre de 2042, momento de cese de extracción de Albemarle y la solución final para diciembre de 2070. La Figura 5-24 muestra los isocontornos de concentración del 25% ( $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ ), 50% ( $C=165 \text{ kg/m}^3$ ) y 75% ( $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para las mismas fechas.

Los resultados en términos de la interfaz son muy similares al caso base (escenario 1), salvo un aumento en el desplazamiento horizontal en superficie. El desplazamiento en horizontal de la interfaz en la superficie aumenta de 125 m (escenario 1) a 165 m aproximadamente. Mientras que los desplazamientos verticales poseen el mismo comportamiento, pero no superan los 5 m.



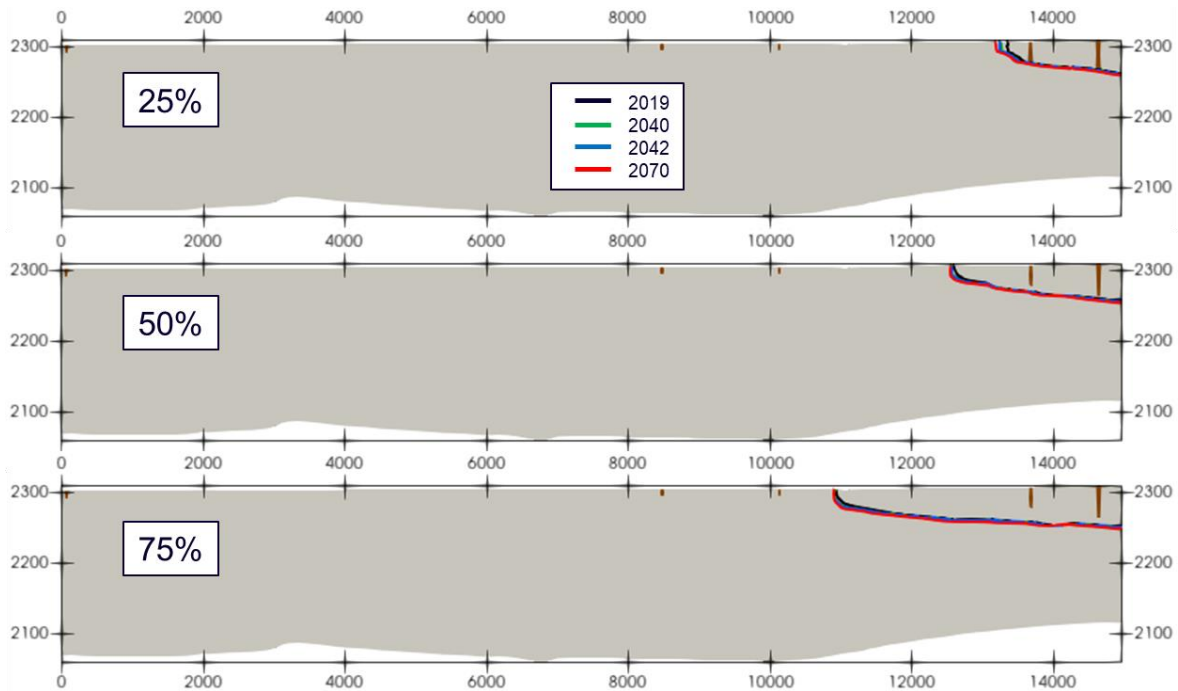
**Figura 5-22: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil Peine a partir del escenario 3.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-23: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de Peine para los años 2019, 2040, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 3.**

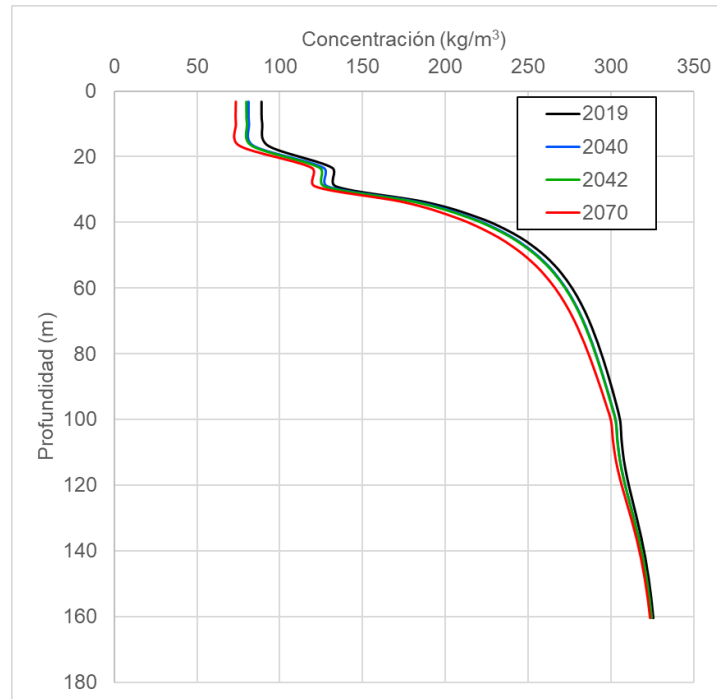
Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-24: Mapas de isoconcentración (25%  $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ , 50%  $C=165 \text{ kg/m}^3$  y 75%  $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para el perfil de Peine para los años 2019, 2040, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 3.**

*Fuente: Elaboración propia*

La Figura 5-25 muestra la distribución vertical de la concentración para  $x$  igual a 13.263 m para la condición inicial, diciembre de 2040, diciembre de 2042, y la solución final para diciembre de 2070. En dicha figura se observa el desplazamiento horizontal y vertical de la interfaz, que ocurre principalmente en los primeros metros de profundidad.



**Figura 5-25: Distribución vertical de la concentración para  $x=13.263$  m para el perfil de Peine para los años 2019, 2040, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 3.**

Fuente: Elaboración propia

#### 5.2.2.2 Escenario 4

El escenario 4 corresponde al Caso Base (extracciones de salmuera y agua dulce/industrial aprobadas según las RCA vigentes al año 2019), más las siguientes situaciones hipotéticas (detalle de las extracciones por año en la Tabla 2-2):

- 1) Extensión de la extracción de agua industrial de CMZ hasta 2031.
- 2) Reducción gradual hasta el 50% de la extracción de agua industrial y de salmuera de SQM desde 2021 hasta el año 2030. Esto es, al final del periodo, a 120 l/s para agua dulce y a 822 l/s para salmuera. Esta reducción gradual corresponde a las extracciones definidas en el Plan de Sustentabilidad de SQM en octubre de 2020.

La Tabla 5-7 muestra los descensos máximos calculados en los puntos de control para el perfil de Peine a partir del escenario 4. La evolución de niveles para cada punto de control se muestra en la Figura 5-26.



En comparación al caso base, se observan menores descensos en la zona del Núcleo, mientras que en la zona Marginal no se observan diferencias. El máximo descenso con respecto a la situación de diciembre de 2019 se obtiene en el punto de observación PN-02, con un descenso de 0,39 m. En los puntos de observación L10-6 y L10-10 se obtienen descensos máximos de 8 cm y 4 cm respectivamente. Finalmente, en los puntos de observación L10-1 y Cuña 6 se obtienen descensos de 4 cm. Por tanto, el máximo efecto se localiza en los puntos cercanos al Núcleo y dicho efecto disminuye hacia el Sureste de la cuenca.

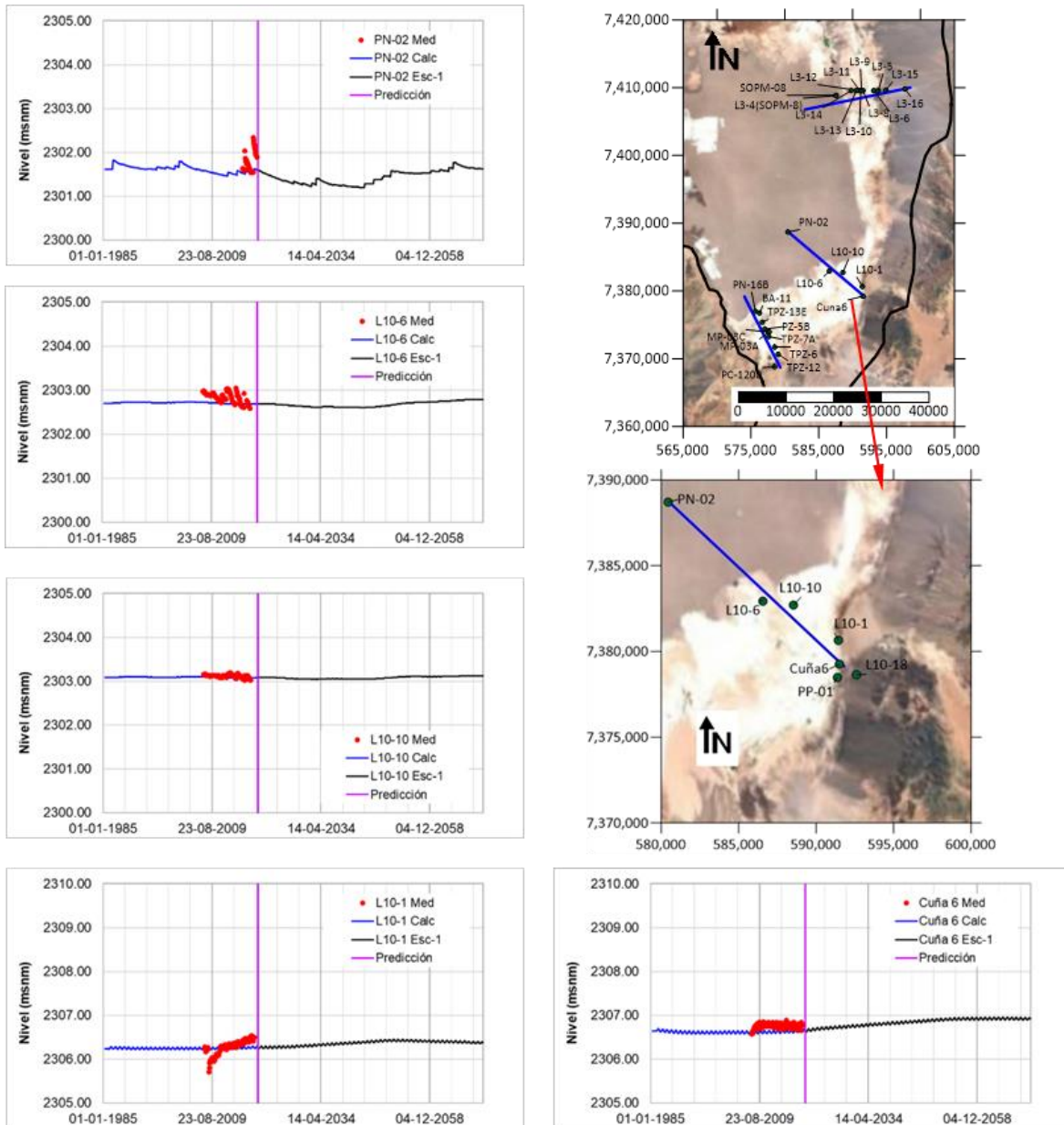
Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)
PN-02	0,39
L10-6	0,08
L10-10	0,04
L10-1	0,04
Cuña 6	0,04

Tabla 5-7: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de Peine obtenido a partir del escenario 4.

Fuente: Elaboración propia

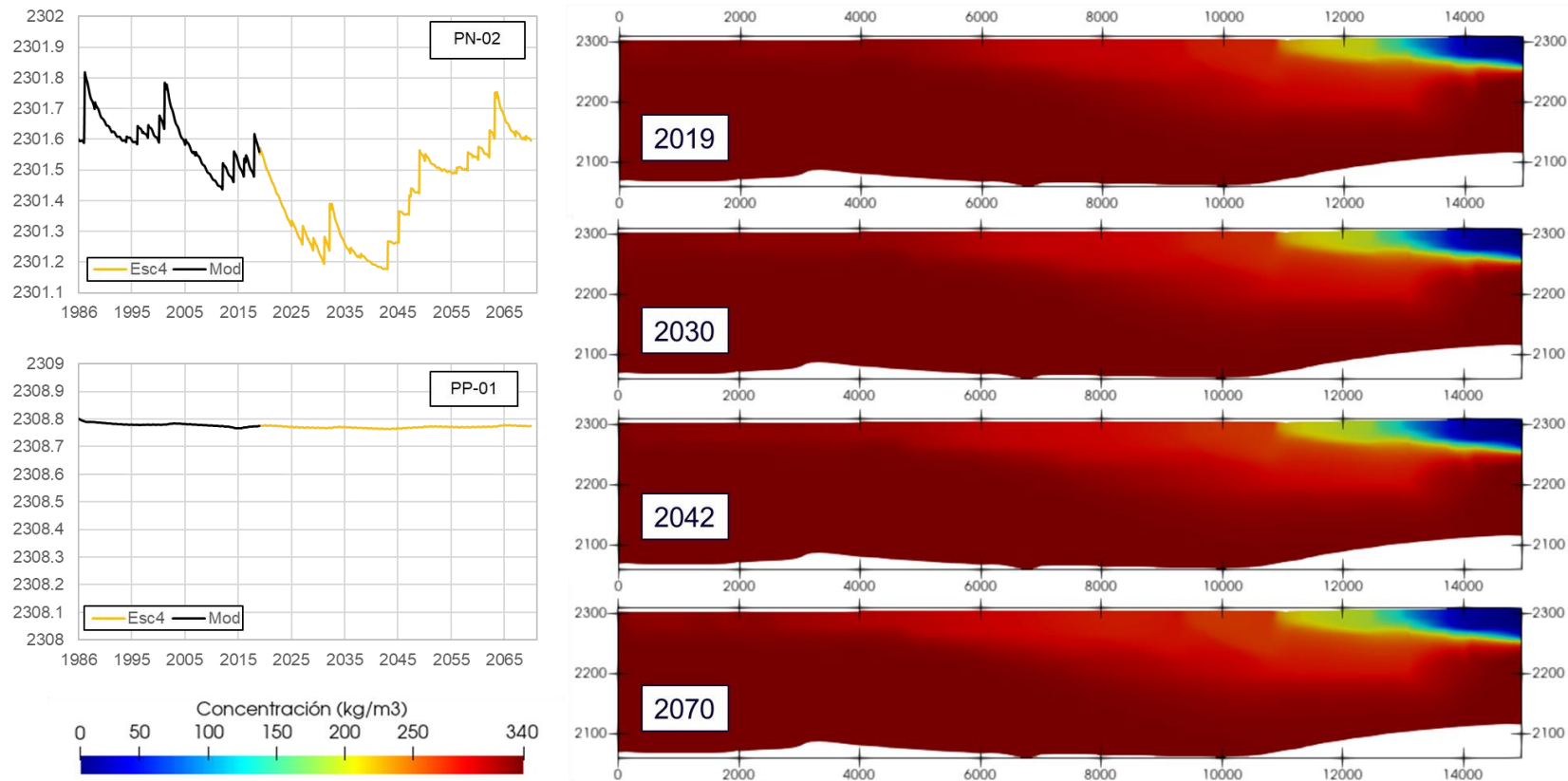
En la Figura 5-27 se muestran los niveles impuestos como condición de contorno en los bordes del perfil de Peine y los mapas de concentración para la condición inicial (diciembre de 2019), para diciembre de 2030, momento de cese de extracción de SQM, diciembre de 2042, momento de cese de extracción de Albemarle y la solución final para diciembre de 2070. La Figura 5-28 muestra los isocontornos de concentración del 25% ( $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ ), 50% ( $C=165 \text{ kg/m}^3$ ) y 75% ( $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para las mismas fechas.

Como se observa en las figuras, los resultados son muy similares al caso base (escenario 1), sin embargo, se observa una pequeña disminución en el desplazamiento horizontal en superficie para la isoconcentración del 25%, pasando de 125 m (escenario 1) a 112 m aproximadamente. salvo en la curva de isoconcentración del 25% de concentración, del año 2019 al año 2070, existe un desplazamiento en horizontal de la interfaz en la superficie de 125 m aproximadamente. Respecto a desplazamientos verticales, se observa una profundización de la interfaz en las 3 isoconcentraciones, pero no superan los 5 m.



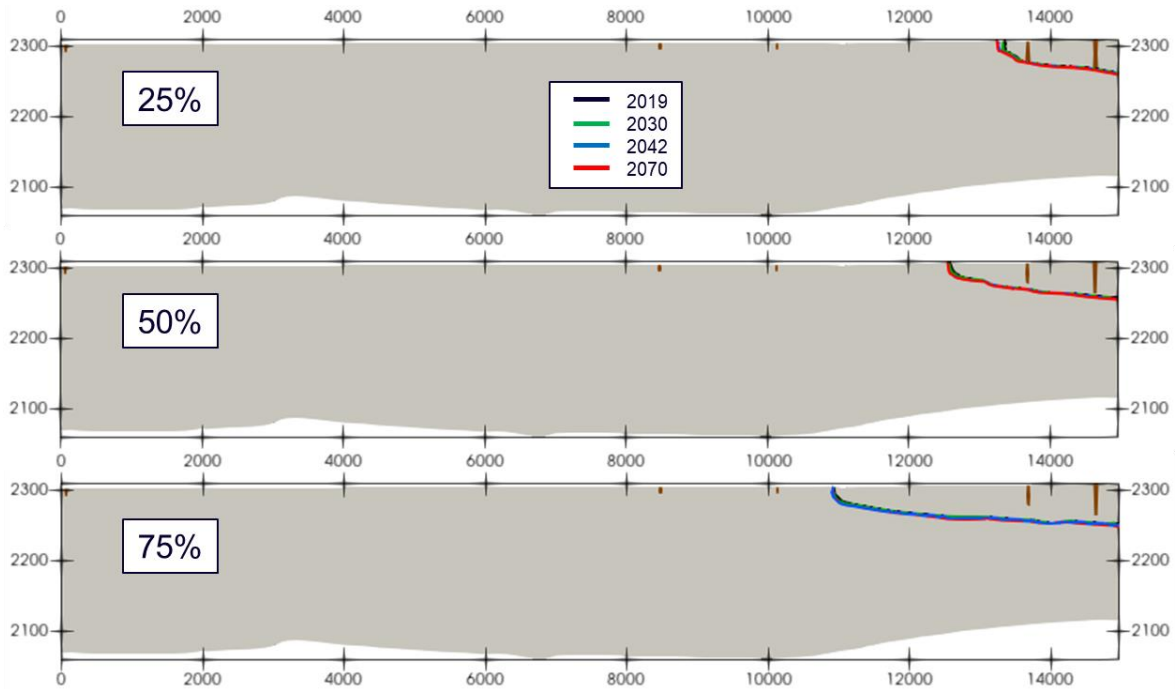
**Figura 5-26: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil Peine a partir del escenario 4.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-27: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de Peine para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 4.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-28: Mapas de isoconcentración (25%  $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ , 50%  $C=165 \text{ kg/m}^3$  y 75%  $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para el perfil de Peine para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 4.**

Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2.3 Escenario 7

El escenario 7 corresponde al Caso Base (extracciones de salmuera y agua dulce/industrial aprobadas según las RCA vigentes al año 2019) más las siguientes situaciones hipotéticas (detalle de las extracciones por año en la Tabla 2-2):

- 1) Extensión de la extracción de agua industrial de CMZ hasta 2031.
- 2) Reducción de la recarga producto del cambio climático en 15% entre los años 2020 y 2044, y en 18% entre 2045 a 2070, de acuerdo con el análisis presentado en el capítulo 2.2.

La Tabla 5-8 muestra los descensos máximos calculados en los puntos de control para el perfil de Peine a partir del escenario 7. La evolución de niveles para cada punto de control se muestra en la Figura 5-29.

En comparación al caso base, se observan leves aumentos en los descensos en la zona del Núcleo, mientras que en la zona Marginal no se observan diferencias. El máximo descenso con respecto a la situación de diciembre de 2019 se obtiene en el punto de observación PN-02, con un descenso de 0,49 m. En los puntos de observación L10-6 y L10-10 se obtienen descensos máximos de 0,12 m y 6 cm respectivamente. Finalmente, en los puntos de observación L10-1 y Cuña 6 se obtienen descensos de 4 cm. Por tanto, el máximo efecto se localiza en los puntos cercanos al Núcleo y dicho efecto disminuye hacia el Sureste de la cuenca.

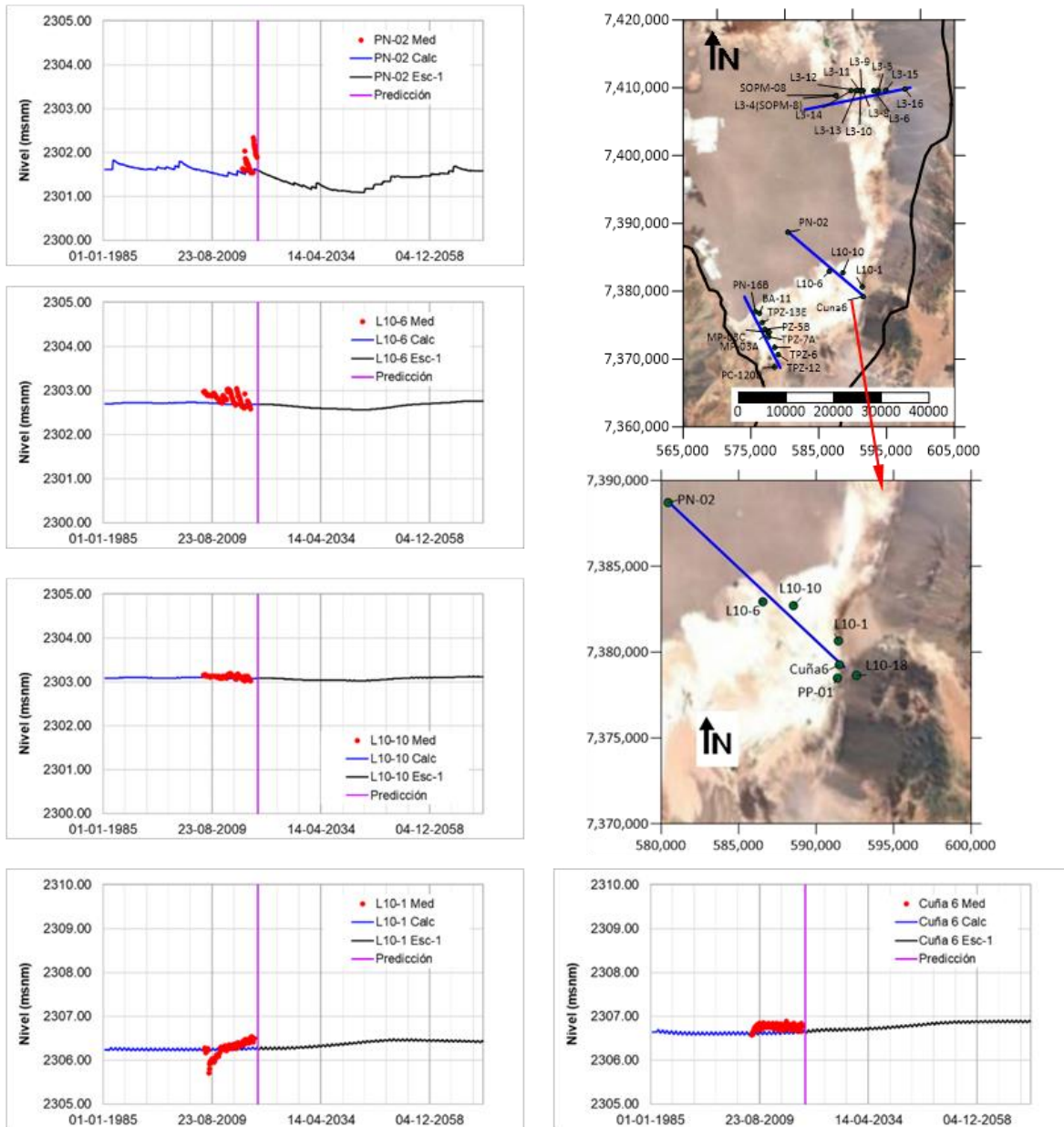
Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)
PN-02	0,49
L10-6	0,12
L10-10	0,06
L10-1	0,04
Cuña 6	0,04

Tabla 5-8: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de Peine obtenido a partir del escenario 7.

Fuente: Elaboración propia

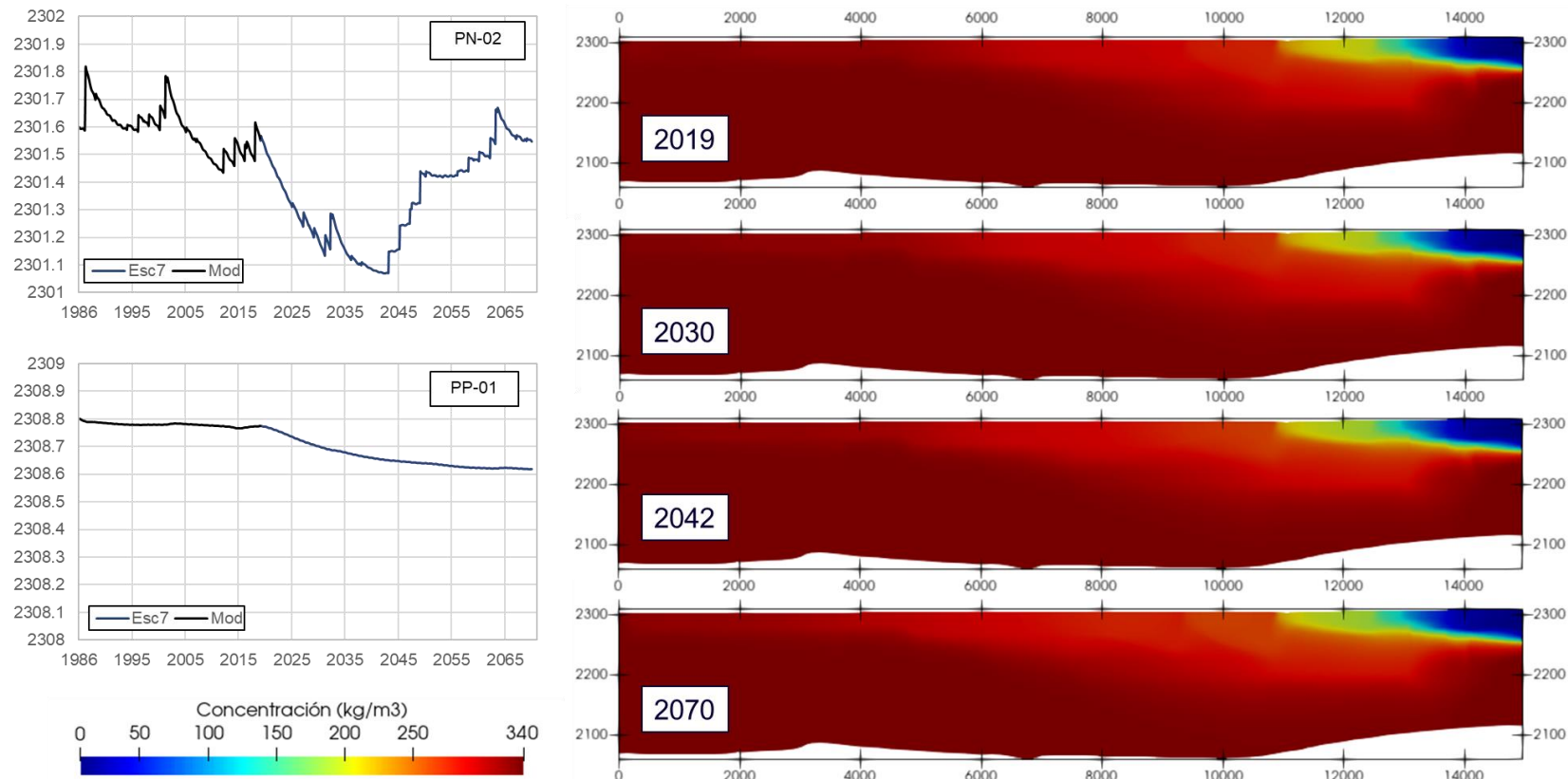
En la Figura 5-30 se muestran los niveles impuestos como condición de contorno en los bordes del perfil de Peine y los mapas de concentración para la condición inicial (diciembre de 2019), para diciembre de 2030, momento de cese de extracción de SQM, diciembre de 2042, momento de cese de extracción de Albemarle y la solución final para diciembre de 2070. La Figura 5-31 muestra los isocontornos de concentración del 25% ( $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ ), 50% ( $C=165 \text{ kg/m}^3$ ) y 75% ( $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para las mismas fechas.

Los resultados en términos de la interfaz son muy similares al caso base (escenario 1), salvo un aumento en el desplazamiento horizontal en superficie. El desplazamiento en horizontal de la interfaz en la superficie aumenta de 125 m (escenario 1) a 155 m aproximadamente. Mientras que los desplazamientos verticales poseen el mismo comportamiento, pero no superan los 5 m.



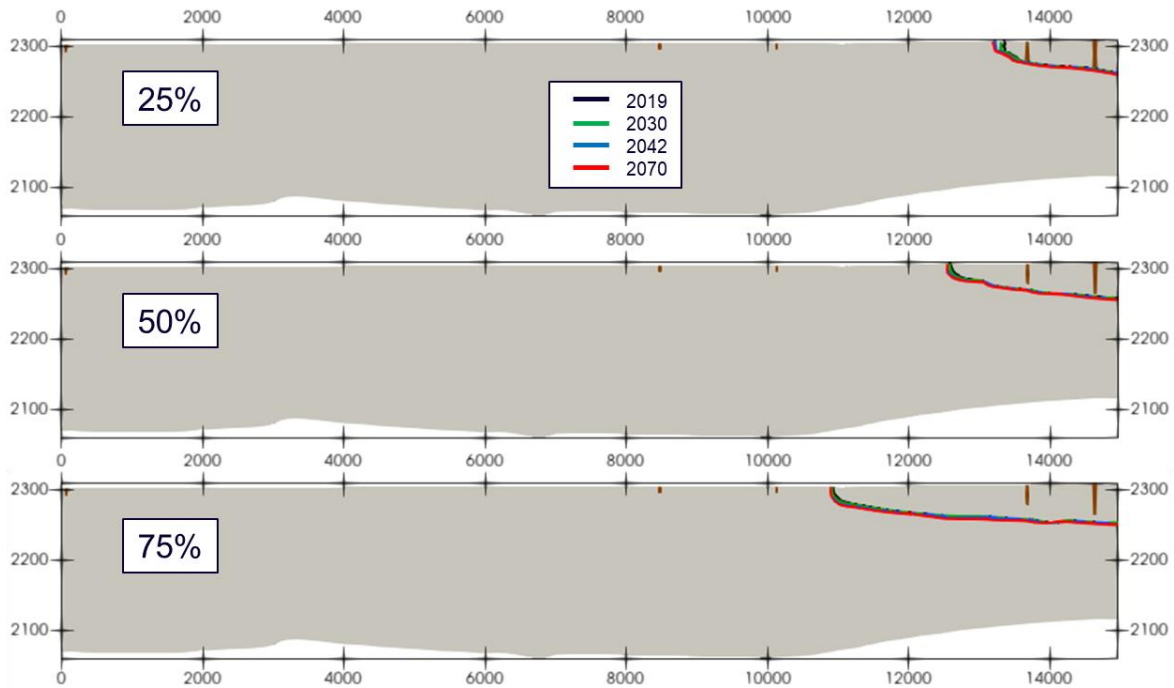
**Figura 5-29: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil Peine a partir del escenario 7.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-30: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de Peine para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 7.**

Fuente: Elaboración propia

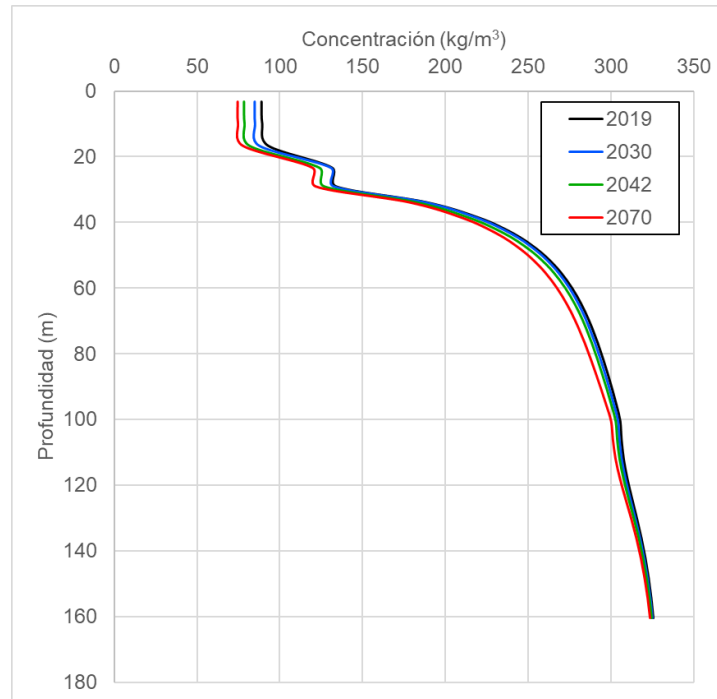


**Figura 5-31: Mapas de isoconcentración (25%  $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ , 50%  $C=165 \text{ kg/m}^3$  y 75%  $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para el perfil de Peine para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 7.**

Fuente: Elaboración propia

La Figura 5-32 muestra la distribución vertical de la concentración para  $x$  igual a 13.263 m (indicado en la Figura 5-31 con líneas discontinuas) para la condición inicial, diciembre de 2030, diciembre de 2042, y la solución final para diciembre de 2070. En dicha figura se observa el desplazamiento horizontal y vertical de la interfaz, que ocurre principalmente en los primeros metros de profundidad.





**Figura 5-32: Distribución vertical de la concentración para  $x=13.263$  m para el perfil de Peine para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 7.**

Fuente: Elaboración propia

### 5.3 Perfil La Punta-La Brava

Al igual que para los perfiles de Quelana y Peine, en el perfil de La Punta-La Brava se han simulado el caso base (escenario 1, equivalente al escenario 2), el escenario 3, el escenario 4 y el escenario 7. A continuación, se detallan los resultados obtenidos a partir de los escenarios de gestión simulados para el perfil La Punta-La Brava.

#### 5.3.1 Escenarios con RCA vigente

##### 5.3.1.1 Escenario 1

El escenario 1, denominado Caso Base, incluye las extracciones de salmuera y agua dulce/industrial aprobadas según las RCA vigentes al año 2019 (detalle extracciones por año en la Tabla 2-2) y que en términos generales corresponden a:

- 1) Las extracciones de salmuera y agua industrial de SQM hasta el año 2030.
- 2) Las extracciones de salmuera y agua industrial de Albemarle hasta el 2042.
- 3) La extracción de agua industrial de CMZ hasta el 2023.
- 4) Las extracciones de agua dulce en el sector norte por los APR.

Adicionalmente, para este y todos los demás escenarios, se considera el cese de la extracción de MEL.

La Tabla 5-9 muestra los descensos máximos calculados en los puntos de control para el perfil de La Punta-La Brava a partir del escenario 1. La evolución de niveles para cada punto de control se muestra en la Figura 5-33.

El máximo descenso con respecto a la situación de diciembre de 2019 se obtiene en los puntos de observación más cercanos a la zona del Núcleo, mientras que hacia la zona Marginal los descensos presentados son principalmente por oscilaciones naturales producto de las precipitaciones y la evaporación. Así, el descenso en los puntos de observación PN-16B y BA-11 es de 0,52 m y 0,49 m, respectivamente. En los puntos de observación TPZ-13E, PZ-5B, MP-03A/C, TPZ-7A Y TPZ-6 se obtienen descensos máximos de entre 6 y 8 cm. Finalmente, en los puntos TPZ-12 y PC-1200 los descensos son de 0,14 m y 0,12 m respectivamente.

Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)
PN-16B	0,52
BA-11	0,49
TPZ-13E	0,08
PZ-5B	0,07
MP-03A	0,07
MP-03C	0,07
TPZ-7A	0,08
TPZ-6	0,06
TPZ-12	0,14
PC-1200	0,12

Tabla 5-9: Descensos máximos en ptos. de control del perfil de La Punta-La Brava según escenario 1.

Fuente: Elaboración propia

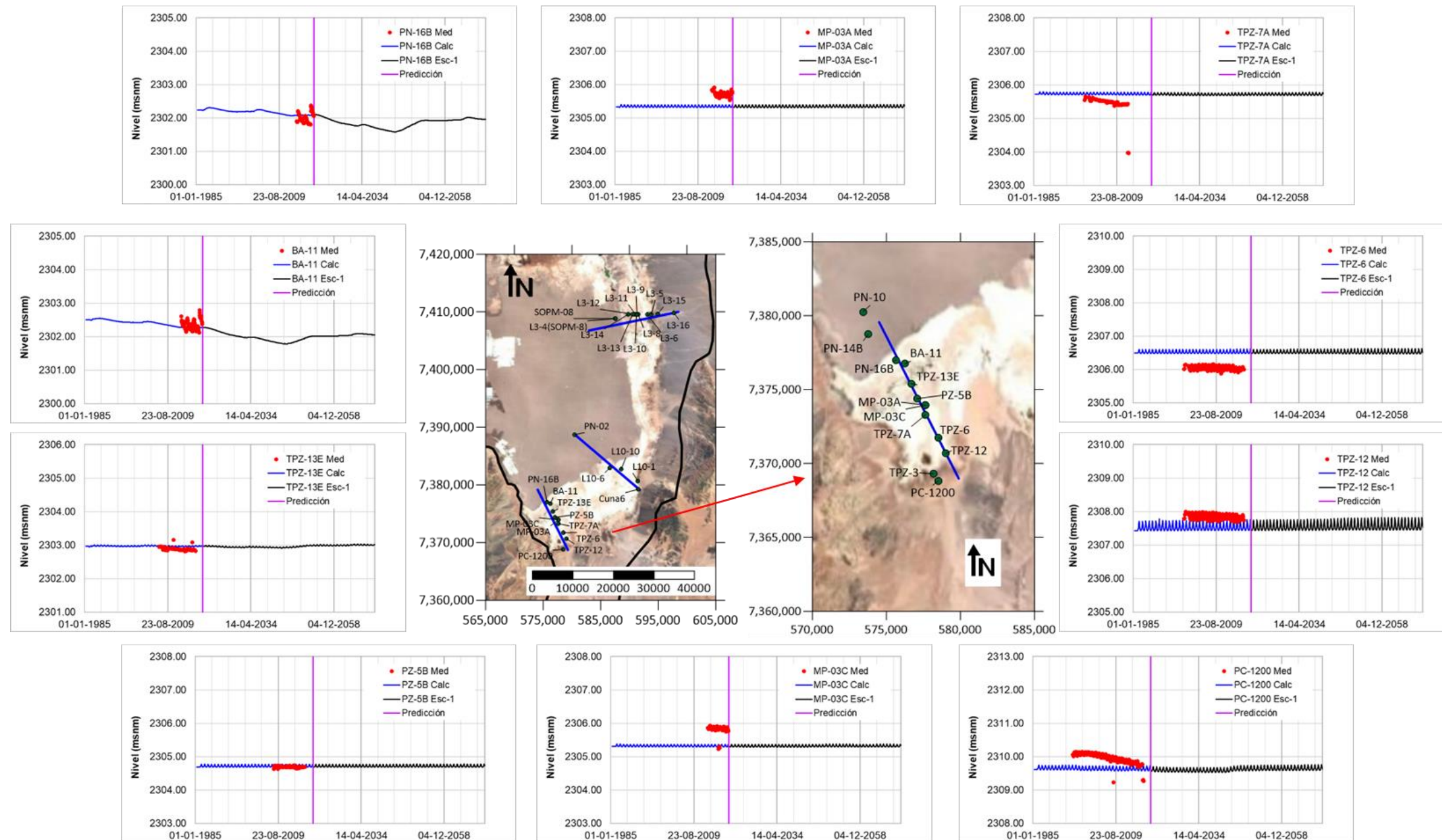
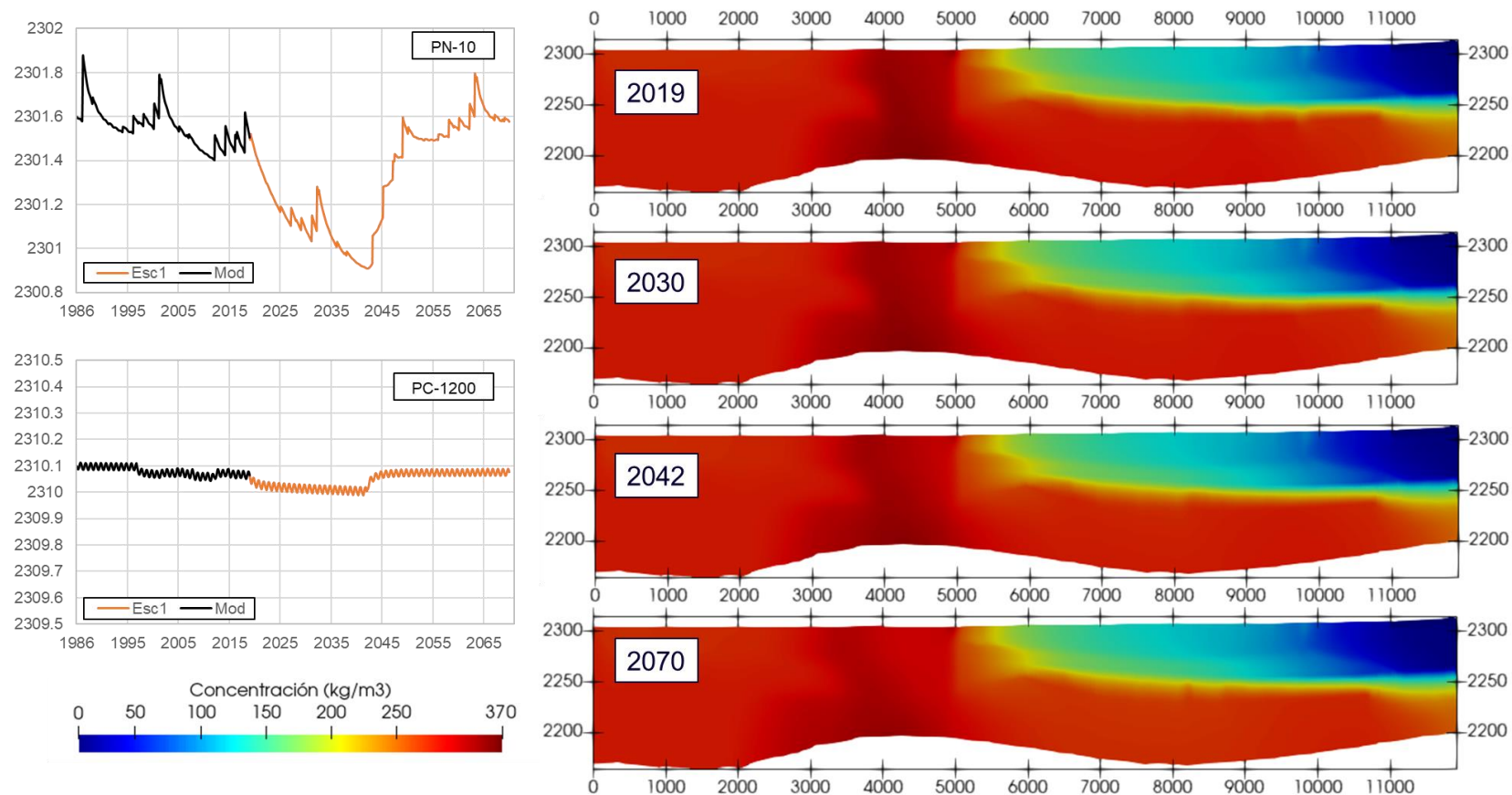


Figura 5-33: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil La Punta-La Brava a partir del escenario 1.

Fuente: Elaboración propia

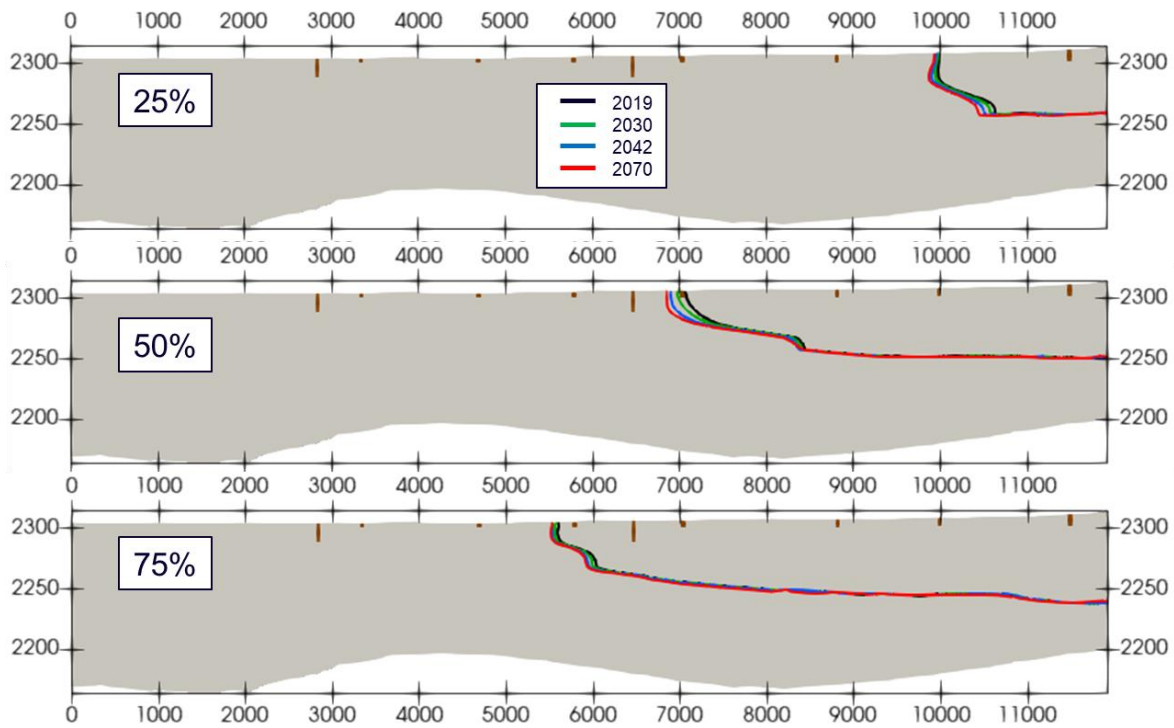
En la Figura 5-34 se muestran los niveles impuestos como condición de contorno en los bordes del perfil de La Punta-La Brava y los mapas de concentración para la condición inicial (diciembre de 2019), para diciembre de 2030, momento de cese de extracción de SQM, diciembre de 2042, momento de cese de extracción de Albemarle y la solución final para diciembre de 2070. La Figura 5-35 muestra los isocontornos de concentración del 25% ( $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ ), 50% ( $C=165 \text{ kg/m}^3$ ) y 75% ( $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para las mismas fechas.

Como se observa en las figuras, existe un desplazamiento horizontal de la interfaz para las 3 isolíneas de concentración en superficie, siendo más importante para la del 50%. Se observan pequeñas profundizaciones de la interfaz. El máximo desplazamiento horizontal desde el inicio al fin de la simulación en superficie para la isoconcentración del 50% es de aproximadamente 225 m (Figura 5-36), mientras que los desplazamientos verticales no superan los 2 m.



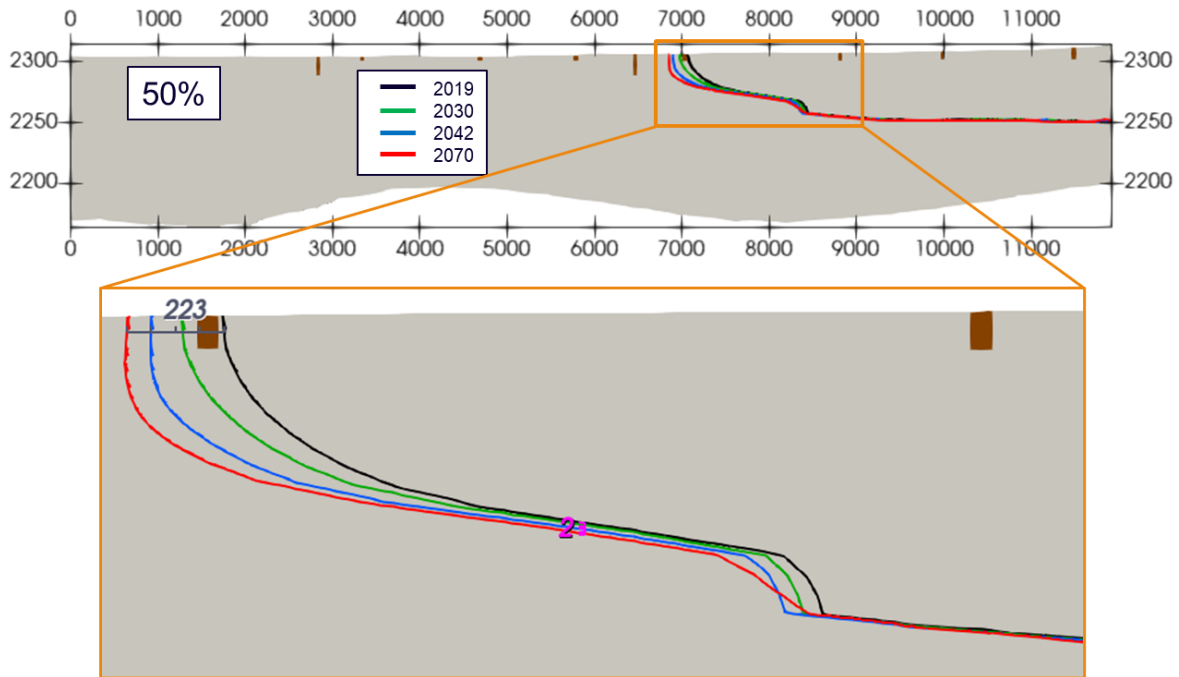
**Figura 5-34: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 1.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-35: Mapas de isoconcentración (25%  $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ , 50%  $C=165 \text{ kg/m}^3$  y 75%  $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 1.**

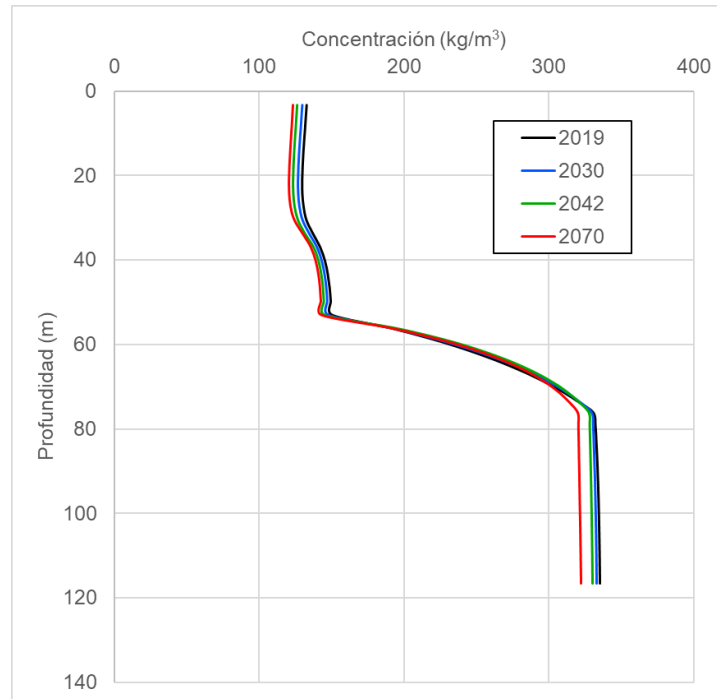
Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-36: Zoom al desplazamiento horizontal superficial de la isoconcentración del 50% para el escenario 1 del perfil de La Punta-La Brava.**

*Fuente: Elaboración propia*

La Figura 5-37 muestra la distribución vertical de la concentración para  $x$  igual a 9.022 m para la condición inicial, diciembre de 2030, diciembre de 2042, y la solución final para diciembre de 2070. En dicha figura se observa el desplazamiento horizontal y vertical de la interfaz.



**Figura 5-37: Distribución vertical de la concentración para  $x=9.022$  m para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 1.**

Fuente: Elaboración propia

### 5.3.2 Escenarios con RCA vigentes y situaciones adicionales hipotéticas de extracción y recarga

#### 5.3.2.1 Escenario 3

El escenario 3 corresponde al Caso Base (extracciones de salmuera y agua dulce/industrial aprobadas según las RCA vigentes al año 2019) más las siguientes situaciones hipotéticas (detalle de las extracciones por año en la Tabla 2-2):

- 1) Extensión de la extracción de agua industrial de CMZ hasta 2031.
- 2) Extensión por 10 años de la extracción de agua industrial y salmuera a las tasas aprobadas por RCA 226/2006 a SQM, hasta el 2040 (1.700 l/s para salmuera y 240 l/s para agua dulce/industrial).



La Tabla 5-10 muestra los descensos máximos calculados en los puntos de control para el perfil de La Punta-La Brava a partir del escenario 3. La evolución de niveles para cada punto de control se muestra en la Figura 5-38.

En comparación al caso base, los descensos son levemente mayores en la zona del Núcleo (pozos PN-16B y BA-11), mientras que en el resto no existen diferencias. Así, el descenso en los puntos de observación PN-16B y BA-11 es de 0,59 m y 0,54 m, respectivamente. En los puntos de observación TPZ-13E, PZ-5B, MP-03A/C, TPZ-7A Y TPZ-6 se obtienen descensos máximos de entre 6 y 8 cm. Finalmente, en los puntos TPZ-12 y PC-1200 los descensos son de 0,14 m y 0,12 m respectivamente.

Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)
PN-16B	0,59
BA-11	0,54
TPZ-13E	0,09
PZ-5B	0,07
MP-03A	0,07
MP-03C	0,07
TPZ-7A	0,08
TPZ-6	0,06
TPZ-12	0,14
PC-1200	0,12

Tabla 5-10: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de La Punta-La Brava obtenido a partir del escenario 3.

Fuente: Elaboración propia

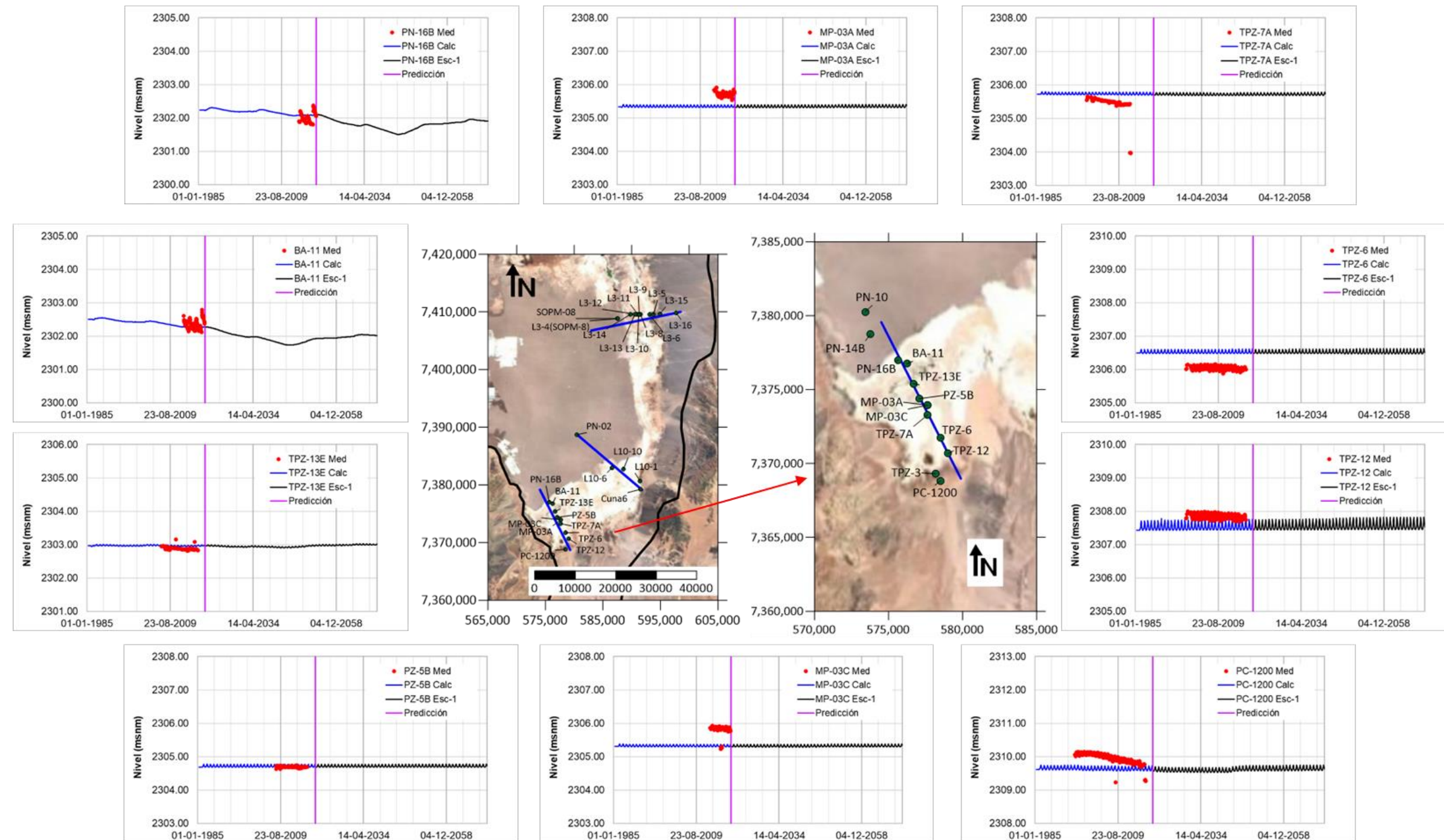
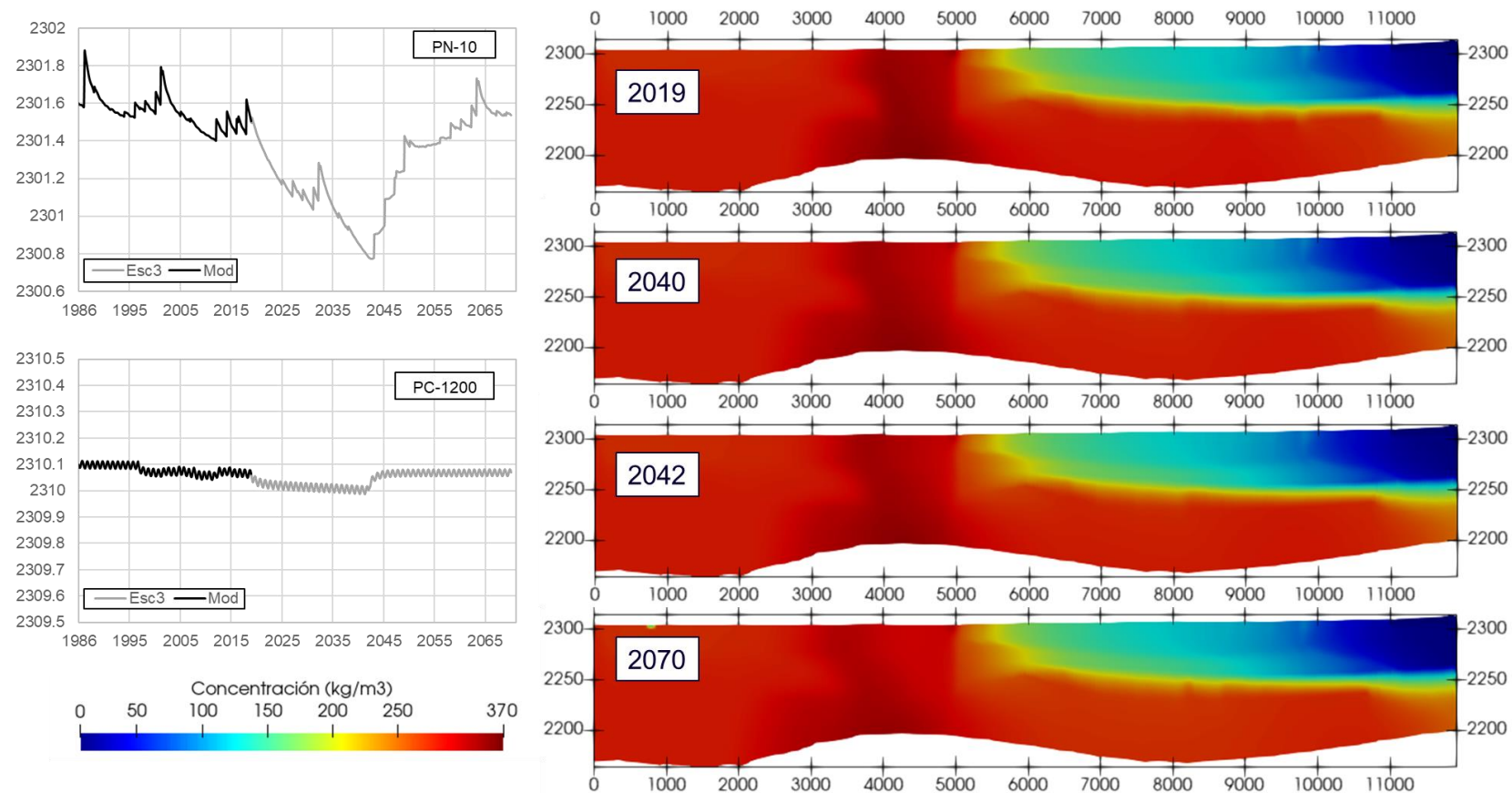


Figura 5-38: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil La Punta-La Brava a partir del escenario 3.

Fuente: Elaboración propia

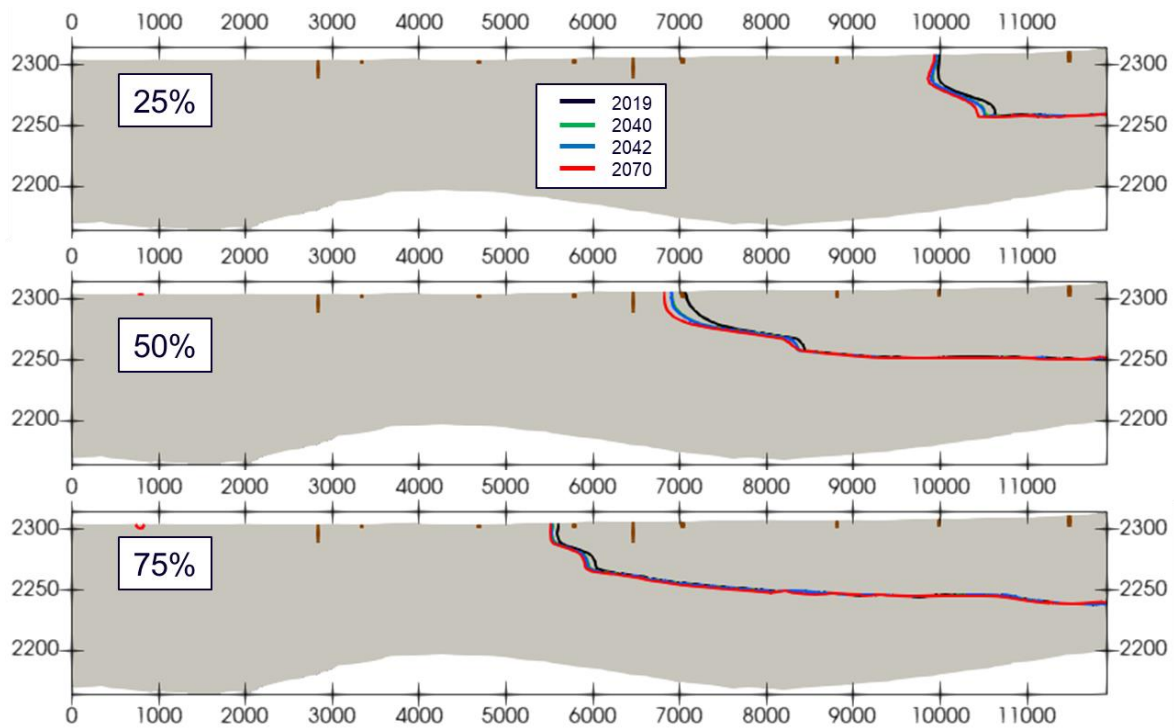
En la Figura 5-39 se muestran los niveles impuestos como condición de contorno en los bordes del perfil de La Punta-La Brava y los mapas de concentración para la condición inicial (diciembre de 2019), para diciembre de 2040, momento de cese de extracción de SQM u otro operador, diciembre de 2042, momento de cese de extracción de Albemarle y la solución final para diciembre de 2070. La Figura 5-40 muestra los isocontornos de concentración del 25% ( $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ ), 50% ( $C=165 \text{ kg/m}^3$ ) y 75% ( $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para las mismas fechas.

Como se observa en las figuras, los resultados son similares al caso base (escenario 1), pero se observa un aumento en el desplazamiento vertical superficial. El máximo desplazamiento horizontal desde el inicio al fin de la simulación en superficie para la isoconcentración del 50% aumenta de 225 m (escenario 1) a 255 m aproximadamente, mientras que los desplazamientos verticales no superan los 2 m.



**Figura 5-39: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2040, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 3.**

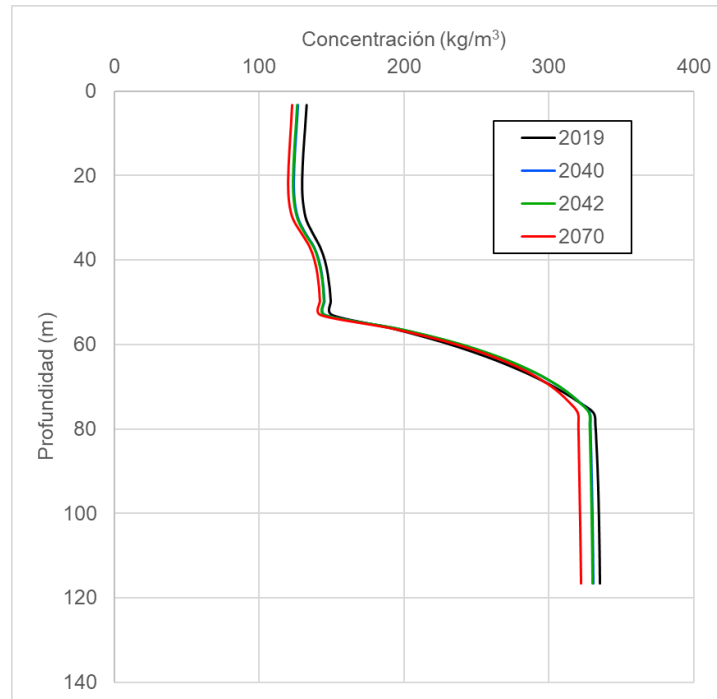
Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-40: Mapas de isoconcentración (25%  $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ , 50%  $C=165 \text{ kg/m}^3$  y 75%  $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 3.**

Fuente: Elaboración propia

La Figura 5-41 muestra la distribución vertical de la concentración para  $x$  igual a 9.022 m (indicado en la Figura 5-40 con líneas discontinuas) para la condición inicial, diciembre de 2040, diciembre de 2042, y la solución final para diciembre de 2070. En dicha figura se observa el desplazamiento horizontal y vertical de la interfaz.



**Figura 5-41: Distribución vertical de la concentración para  $x=9.022$  m para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2040, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 3.**

Fuente: Elaboración propia

### 5.3.2.2 Escenario 4

El escenario 4 corresponde al Caso Base (extracciones de salmuera y agua dulce/industrial aprobadas según las RCA vigentes al año 2019), más las siguientes situaciones hipotéticas (detalle de las extracciones por año en la Tabla 2-2):

- 1) Extensión de la extracción de agua industrial de CMZ hasta 2031.
- 2) Reducción gradual hasta el 50% de la extracción de agua industrial y de salmuera de SQM desde 2021 hasta el año 2030. Esto es, al final del periodo, a 120 l/s para agua dulce y a 822 l/s para salmuera. Esta reducción gradual corresponde a las extracciones definidas en el Plan de Sustentabilidad de SQM en octubre de 2020.

La Tabla 5-11 muestra los descensos máximos calculados en los puntos de control para el perfil de La Punta-La Brava a partir del escenario 4. La evolución de niveles para cada punto de control se muestra en la Figura 5-43.

En comparación al caso base, los descensos son levemente inferiores en la zona del Núcleo (pozos PN-16B y BA-11), mientras que en el resto no existen diferencias. Así, el descenso en los puntos de observación PN-16B y BA-11 es de 0,47 m y 0,45 m, respectivamente. En los puntos de observación TPZ-13E, PZ-5B, MP-03A/C, TPZ-7A Y TPZ-6 se obtienen descensos máximos de entre 6 y 8 cm. Finalmente, en los puntos TPZ-12 y PC-1200 los descensos son de 0,14 m y 0,12 m respectivamente.

Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)
PN-16B	0,47
BA-11	0,45
TPZ-13E	0,08
PZ-5B	0,07
MP-03A	0,07
MP-03C	0,07
TPZ-7A	0,08
TPZ-6	0,06
TPZ-12	0,14
PC-1200	0,12

Tabla 5-11: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de La Punta-La Brava obtenido a partir del escenario 4.

Fuente: Elaboración propia

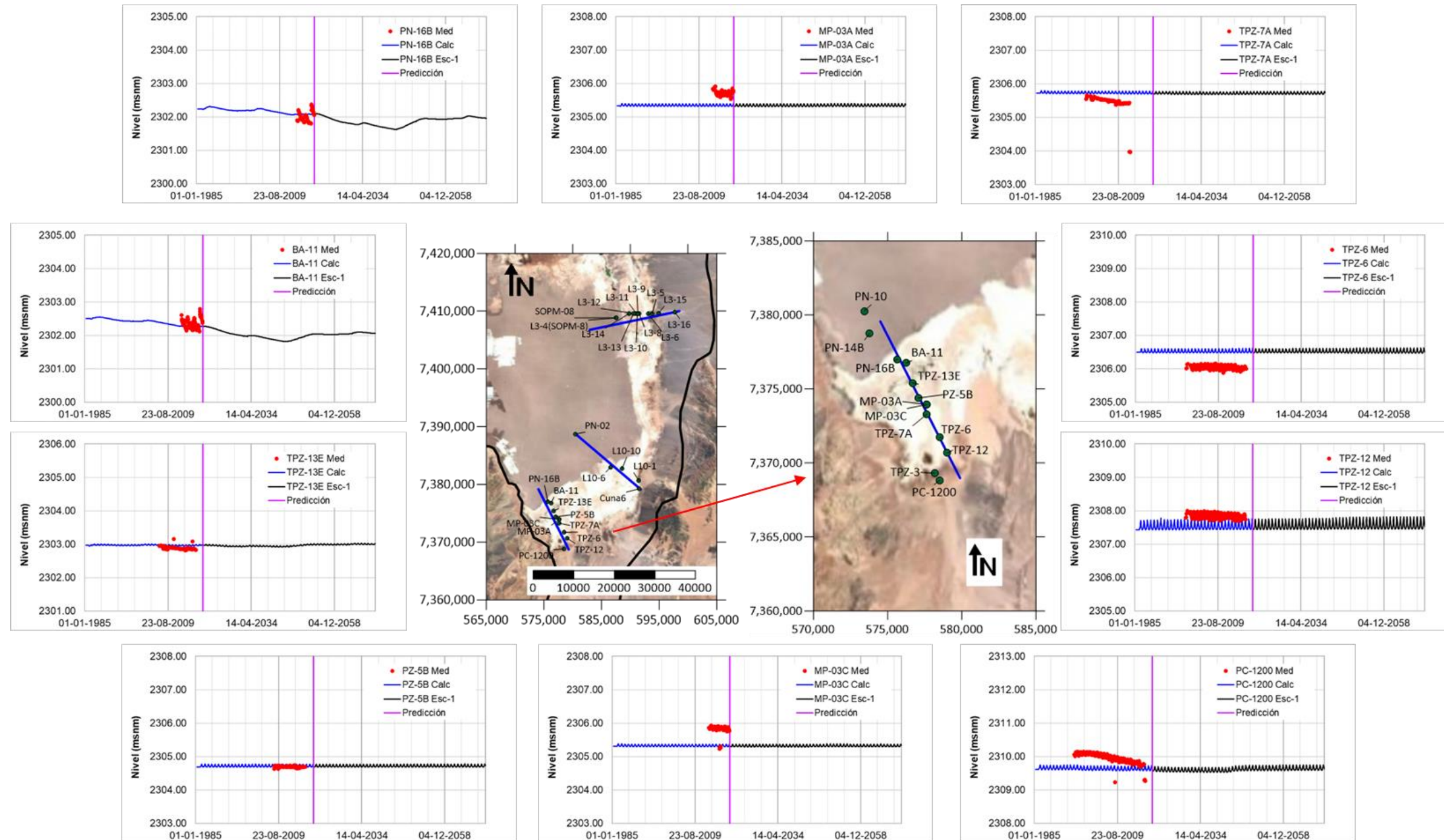


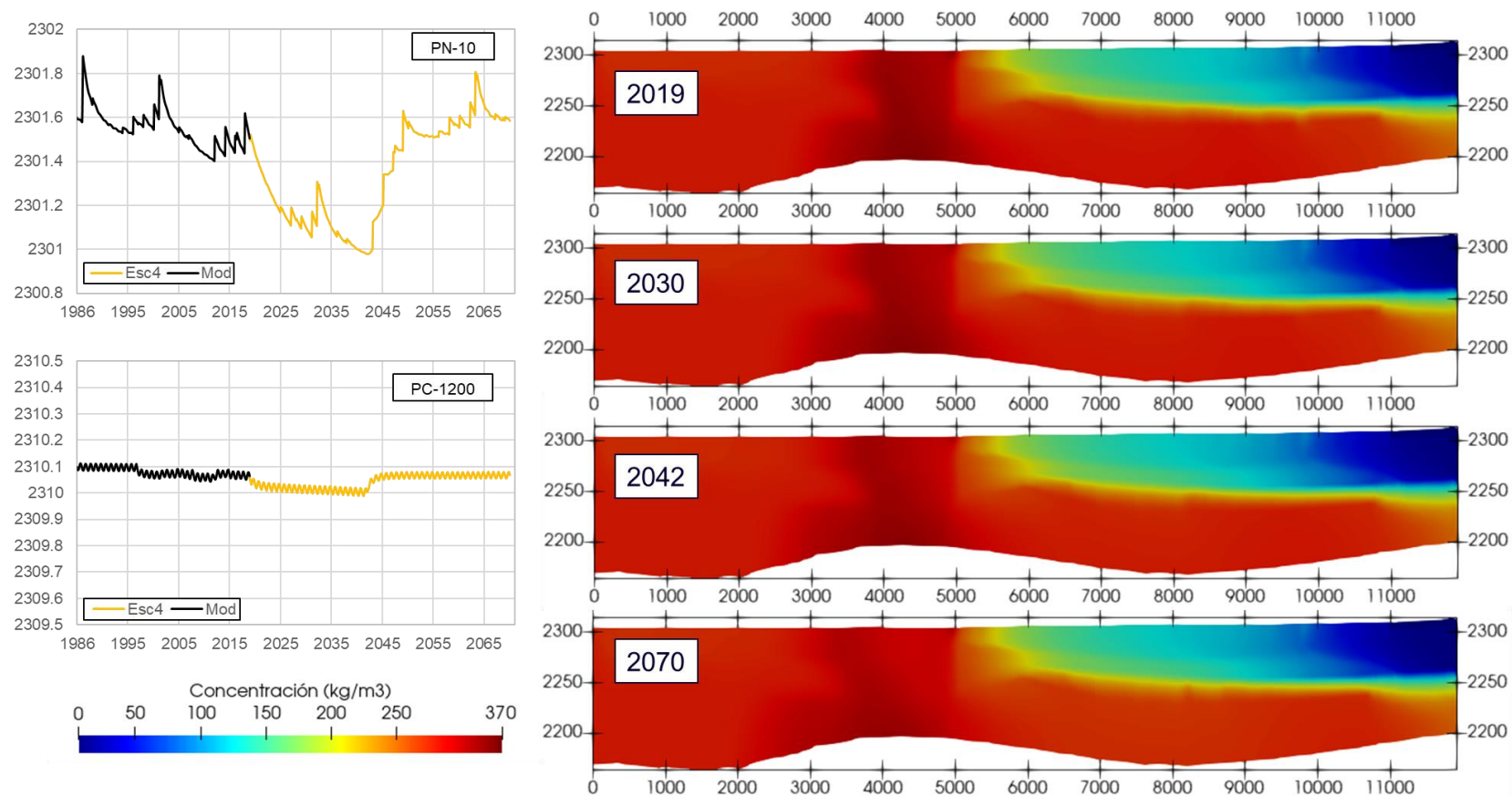
Figura 5-42: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil La Punta-La Brava a partir del escenario 4.

Fuente: Elaboración propia



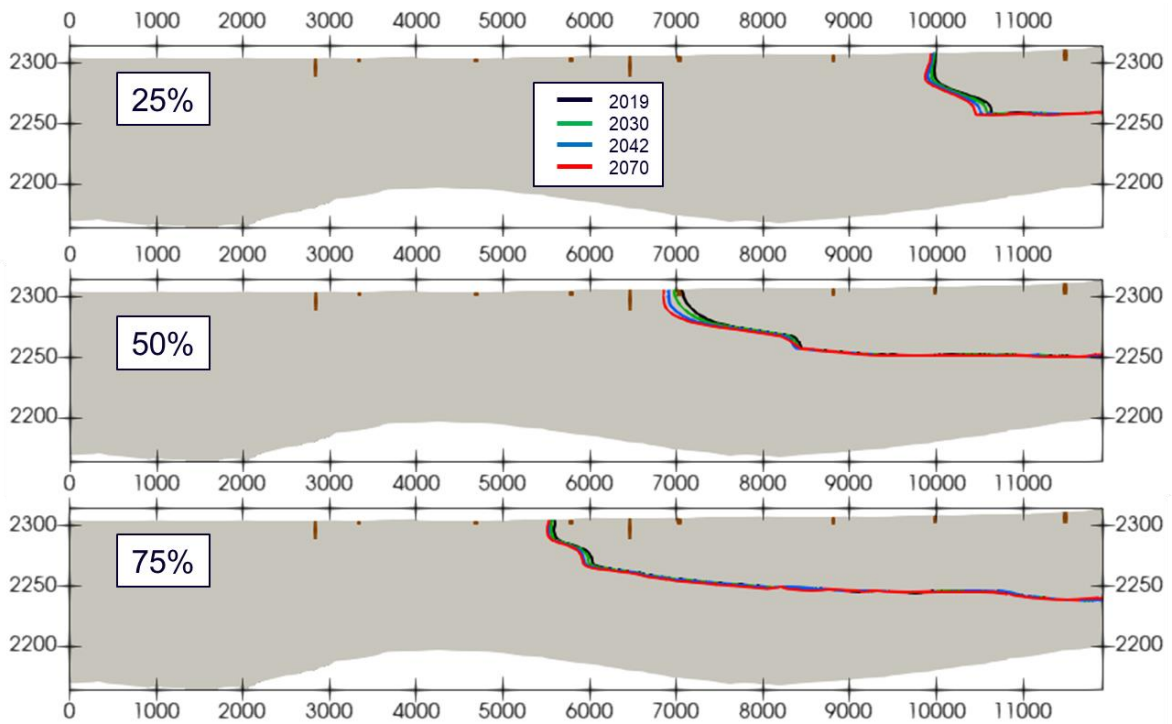
En la Figura 5-43 se muestran los niveles impuestos como condición de contorno en los bordes del perfil de La Punta-La Brava y los mapas de concentración para la condición inicial (diciembre de 2019), para diciembre de 2030, momento de cese de extracción de SQM, diciembre de 2042, momento de cese de extracción de Albemarle y la solución final para diciembre de 2070. La Figura 5-44 muestra los isocontornos de concentración del 25% ( $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ ), 50% ( $C=165 \text{ kg/m}^3$ ) y 75% ( $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para las mismas fechas.

Como se observa en las figuras, los resultados son similares al caso base (escenario 1), pero se observa una leve disminución en el desplazamiento vertical superficial. El máximo desplazamiento horizontal desde el inicio al fin de la simulación en superficie para la isoconcentración del 50% disminuye de 225 m (escenario 1) a 220 m aproximadamente, mientras que los desplazamientos verticales no superan los 2 m.



**Figura 5-43: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 4.**

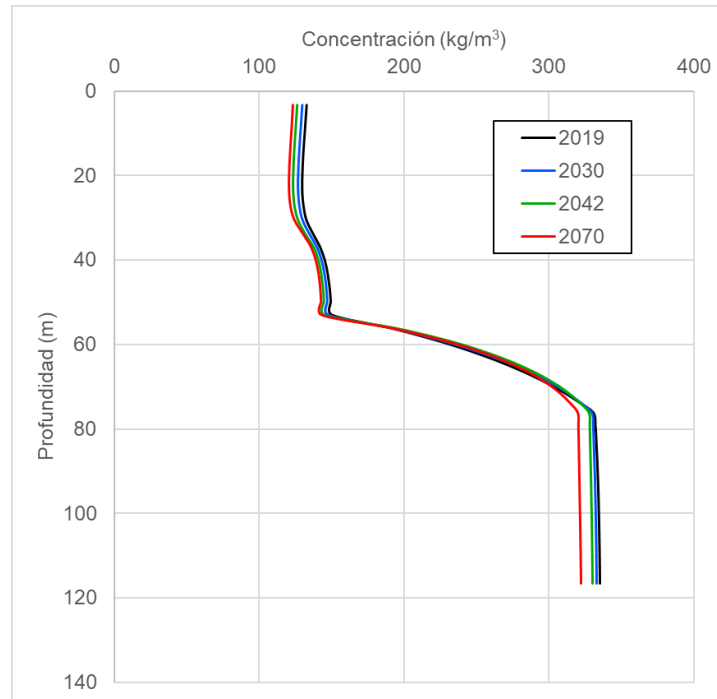
Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-44: Mapas de isoconcentración (25%  $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ , 50%  $C=165 \text{ kg/m}^3$  y 75%  $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 4.**

Fuente: Elaboración propia

La Figura 5-45 muestra la distribución vertical de la concentración para  $x$  igual a 9.022 m para la condición inicial, diciembre de 2030, diciembre de 2042, y la solución final para diciembre de 2070. En dicha figura se observa el desplazamiento horizontal y vertical de la interfaz.



**Figura 5-45: Distribución vertical de la concentración para  $x=9.022$  m para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 4.**

Fuente: Elaboración propia

### 5.3.2.3 Escenario 7

El escenario 7 corresponde al Caso Base (extracciones de salmuera y agua dulce/industrial aprobadas según las RCA vigentes al año 2019) más las siguientes situaciones hipotéticas (detalle de las extracciones por año en la Tabla 2-2):

- 1) Extensión de la extracción de agua industrial de CMZ hasta 2031.
- 2) Reducción de la recarga producto del cambio climático en 15% entre los años 2020 y 2044, y en 18% entre 2045 a 2070, de acuerdo con el análisis presentado en el capítulo 2.2.

La Tabla 5-12 muestra los descensos máximos calculados en los puntos de control para el perfil de La Punta-La Brava a partir del escenario 7. La evolución de niveles para cada punto de control se muestra en la Figura 5-46.

En comparación al caso base, los descensos son levemente mayores en la zona del Núcleo (pozos PN-16B y BA-11), y aumentan de manera importante en el pozo PC-1200, producto de la disminución de la recarga por cambio climático. Así, el descenso en los puntos de observación PN-16B y BA-11 es de 0,54 m y 0,51 m, respectivamente. En los puntos de observación TPZ-13E, PZ-5B, MP-03A/C, TPZ-7A Y TPZ-6 se obtienen descensos máximos de entre 5 y 9 cm. Finalmente, en los puntos TPZ-12 y PC-1200 los descensos son de 0,14 m y 0,22 m respectivamente.

Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)
PN-16B	0,54
BA-11	0,51
TPZ-13E	0,09
PZ-5B	0,07
MP-03A	0,08
MP-03C	0,07
TPZ-7A	0,09
TPZ-6	0,05
TPZ-12	0,14
PC-1200	0,22

Tabla 5-12: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de La Punta-La Brava obtenido a partir del escenario 7.

Fuente: Elaboración propia

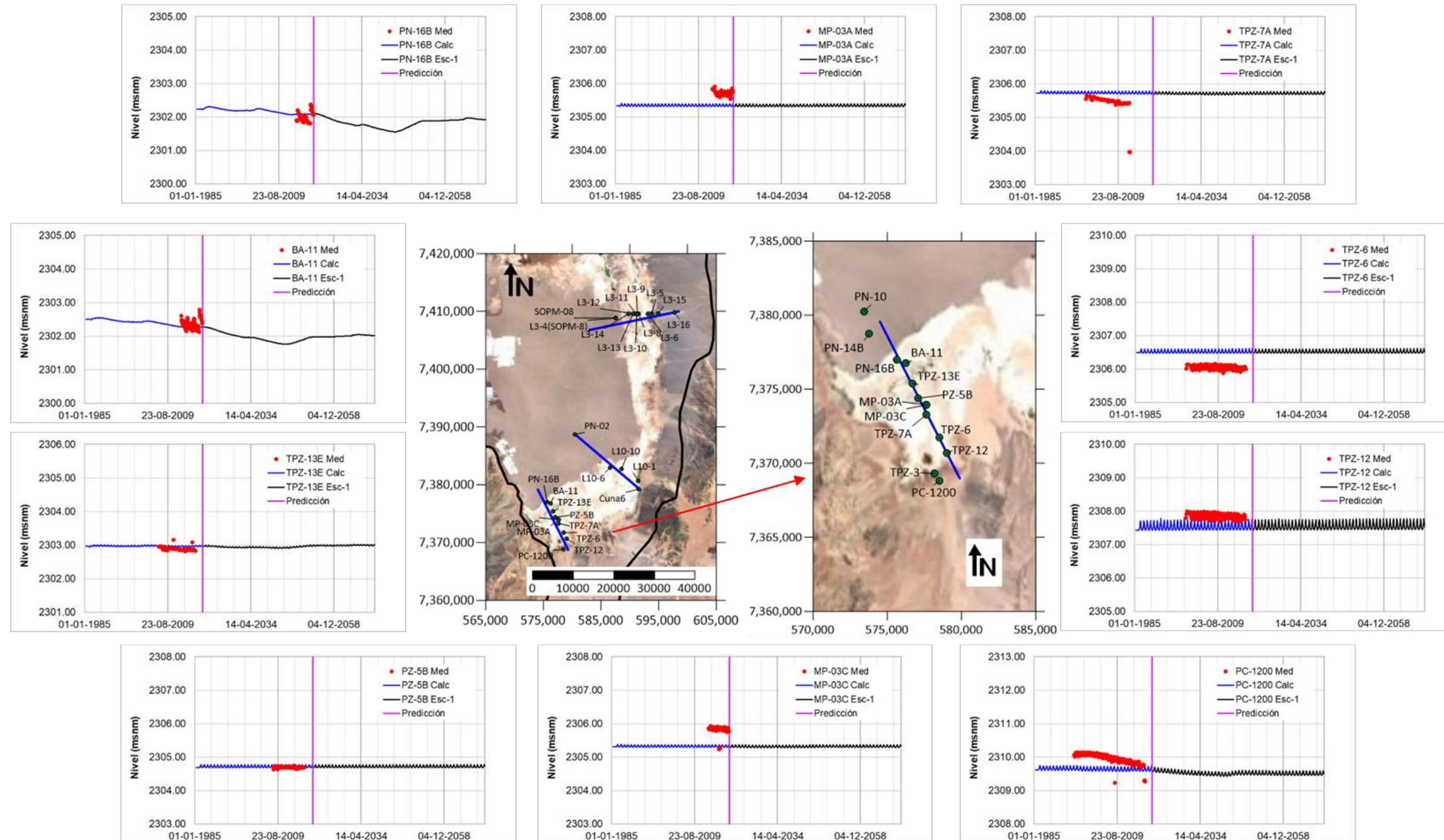
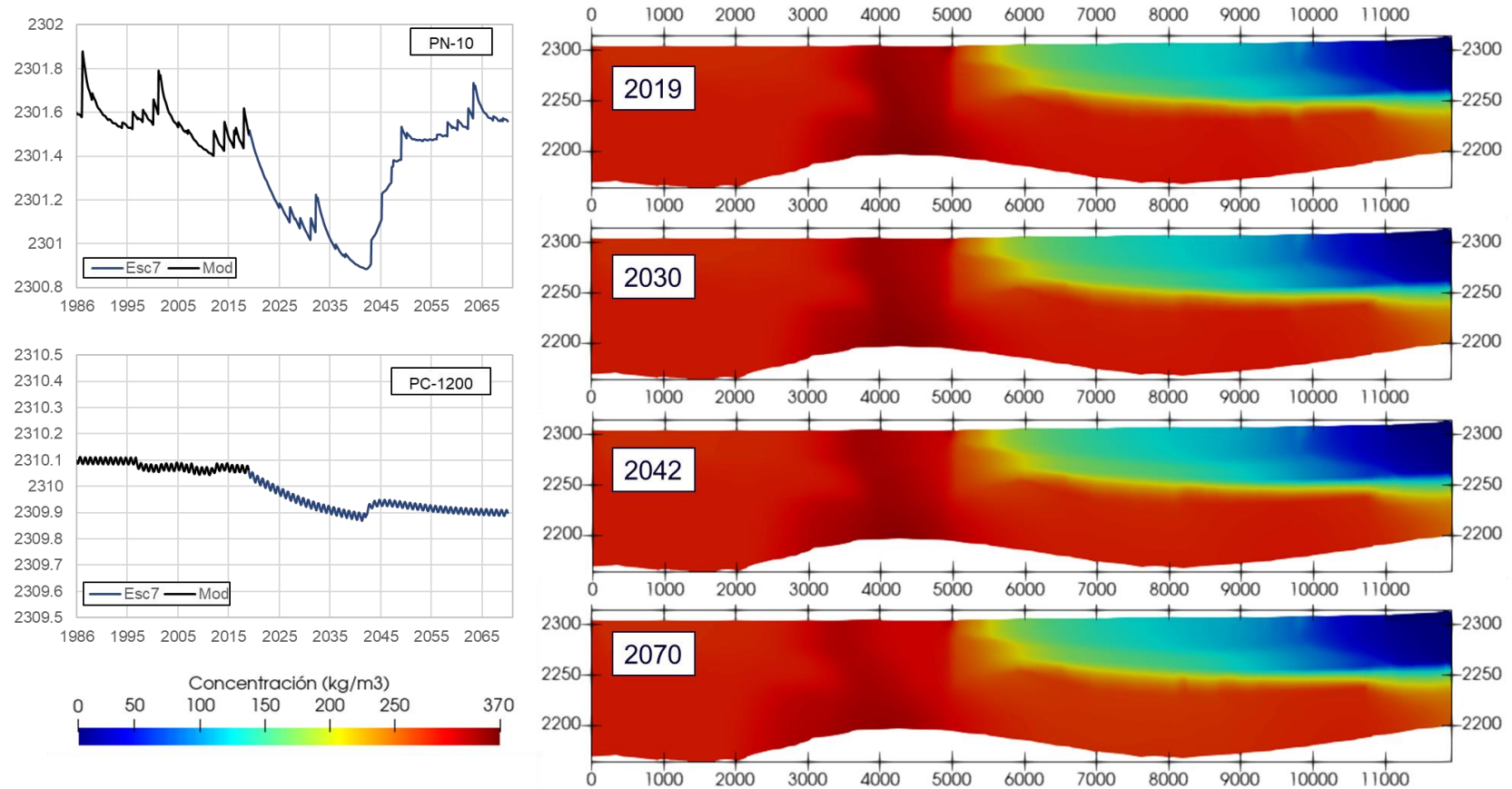


Figura 5-46: Serie temporal de niveles piezométricos en los puntos de control definidos para el perfil La Punta-La Brava a partir del escenario 7.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5-47 se muestran los niveles impuestos como condición de contorno en los bordes del perfil de La Punta-La Brava y los mapas de concentración para la condición inicial (diciembre de 2019), para diciembre de 2030, momento de cese de extracción de SQM, diciembre de 2042, momento de cese de extracción de Albemarle y la solución final para diciembre de 2070. La Figura 5-48 muestra los isocontornos de concentración del 25% ( $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ ), 50% ( $C=165 \text{ kg/m}^3$ ) y 75% ( $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para las mismas fechas.

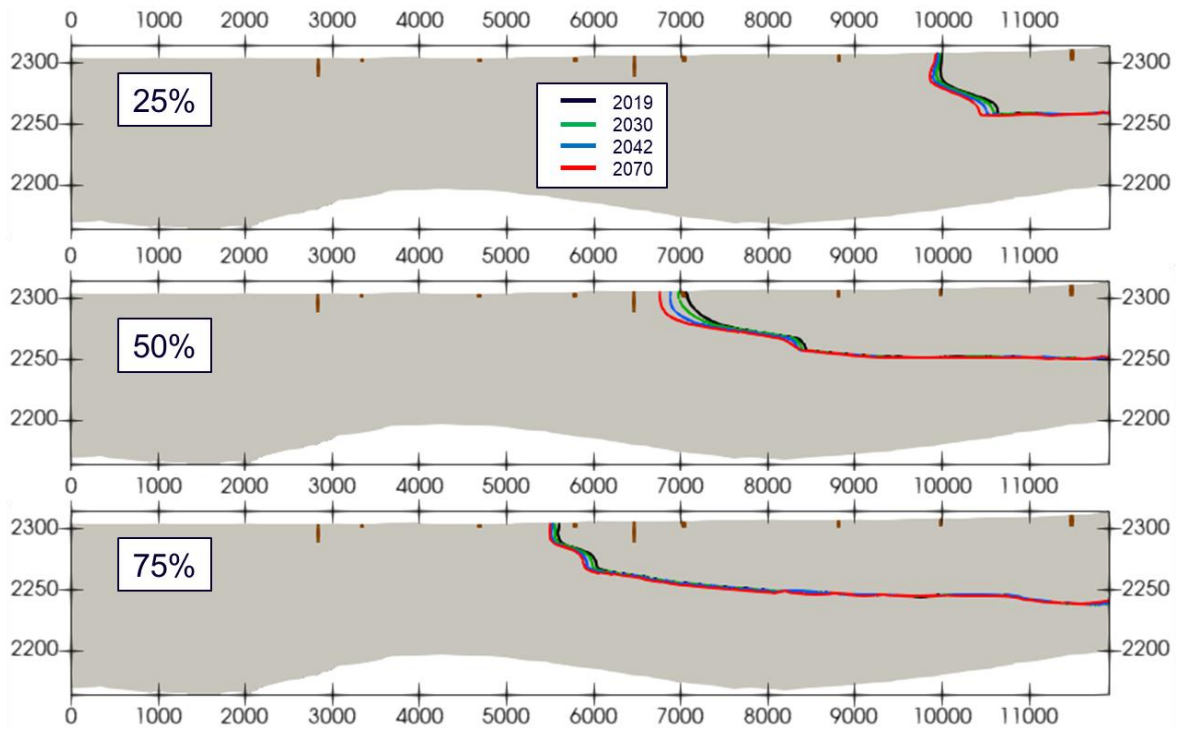
Como se observa en las figuras, los resultados son similares al caso base (escenario 1), pero se observa un aumento en el desplazamiento vertical superficial. El máximo desplazamiento horizontal desde el inicio al fin de la simulación en superficie para la isoconcentración del 50% aumenta de 225 m (escenario 1) a 305 m aproximadamente, mientras que los desplazamientos verticales no superan los 2 m.



**Figura 5-47: Condición de contorno de niveles prescritos y distribución de concentración para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 7.**

Fuente: Elaboración propia

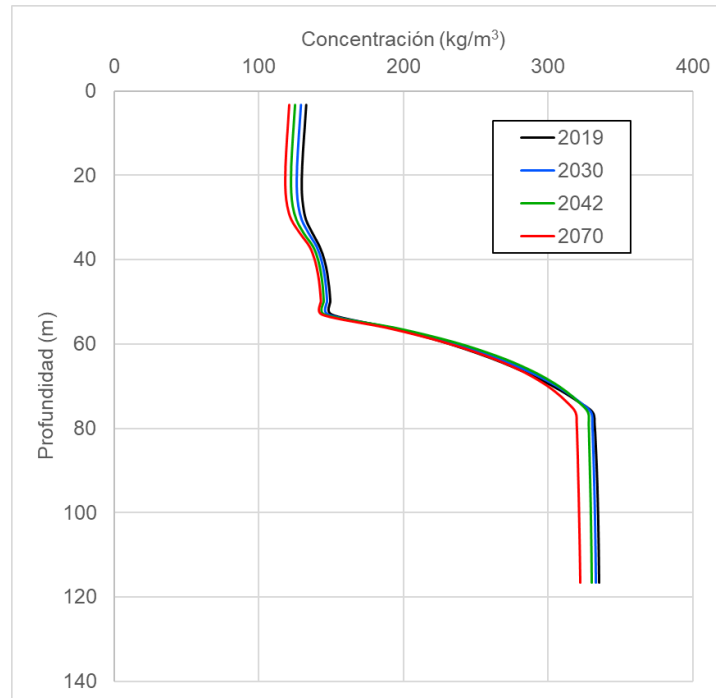




**Figura 5-48: Mapas de isoconcentración (25%  $C=82,5 \text{ kg/m}^3$ , 50%  $C=165 \text{ kg/m}^3$  y 75%  $C=247,5 \text{ kg/m}^3$ ) para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 7.**

*Fuente: Elaboración propia*

La Figura 5-49 muestra la distribución vertical de la concentración para  $x$  igual a 9.022 m para la condición inicial, diciembre de 2030, diciembre de 2042, y la solución final para diciembre de 2070. En dicha figura se observa el desplazamiento horizontal y vertical de la interfaz.



**Figura 5-49: Distribución vertical de la concentración para  $x=9.022$  m para el perfil de La Punta-La Brava para los años 2019, 2030, 2042 y 2070 obtenidas a partir del escenario 7.**

Fuente: Elaboración propia

#### 5.4 Resumen de escenarios en perfiles de densidad variable

A partir de los descensos obtenidos en los puntos de observación para cada escenario, y del desplazamiento de la interfaz, en esta sección se han revisado y comparado los efectos generados por los distintos escenarios en el sistema.

La Tabla 5-13 muestra el resumen del descenso máximo en los puntos de observación para los cuatro escenarios simulados en los perfiles SEAWAT con respecto a la situación de diciembre de 2019 para el perfil de Quelana, la Tabla 5-14 para el perfil de Peine y la Tabla 5-15 para el perfil de La Punta-La Brava.

Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)			
	Escenario 1	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 7
SOPM-08	0,08	0,23	0,05	0,11
L3-14	0,06	0,17	0,04	0,1
L3-13	0,04	0,14	0,03	0,09
L3-12	0,04	0,12	0,04	0,09
L3-11	0,14	0,21	0,14	0,18
L3-10	0,14	0,19	0,14	0,17
L3-9	0,06	0,13	0,06	0,11
L3-8	0,04	0,11	0,04	0,09
L3-6	0,07	0,07	0,07	0,06
L3-5	0,18	0,19	0,17	0,21
L3-15	0,07	0,15	0,06	0,26
L3-16	0,05	0,17	x	0,48

Tabla 5-13: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de Quelana obtenido a partir de los escenarios 1, 3, 4 y 7.

Fuente: Elaboración propia

Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)			
	Escenario 1	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 7
PN-02	0,47	0,73	0,39	0,49
L10-6	0,10	0,16	0,08	0,12
L10-10	0,05	0,08	0,04	0,06
L10-1	0,04	0,04	0,04	0,04
Cuña 6	0,04	0,04	0,04	0,04

Tabla 5-14: Descensos máximos en puntos de control para el perfil de Peine obtenido a partir de los escenarios 1, 3, 4 y 7.

Fuente: Elaboración propia

Puntos de Observación	Máximo Descenso (m)			
	Escenario 1	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 7
PN-16B	0,52	0,59	0,47	0,54
BA-11	0,49	0,54	0,45	0,51
TPZ-13E	0,08	0,09	0,08	0,09
PZ-5B	0,07	0,07	0,07	0,07
MP-03A	0,07	0,07	0,07	0,08
MP-03C	0,07	0,07	0,07	0,07
TPZ-7A	0,08	0,08	0,08	0,09
TPZ-6	0,06	0,06	0,06	0,05
TPZ-12	0,14	0,14	0,14	0,14
PC-1200	0,12	0,12	0,12	0,22

Tabla 5-15: Descensos máximos en los puntos de control para el perfil de La Punta-La Brava obtenido a partir de los escenarios 1, 3, 4 y 7.

Fuente: Elaboración propia

Para los tres perfiles, los máximos descensos en los puntos de observación del núcleo se obtienen en el escenario 3, que simula la extensión de la extracción de salmuera y agua industrial a las tasas aprobadas por RCA 226/2006 a SQM, hasta el 2040, mientras que los mayores descensos en la zona Marginal se producen en el escenario 7, que simula la disminución de la recarga por cambio climático. Los descensos obtenidos a partir del escenario 4 son similares a los del caso base (escenario 1), aunque algo menores, producto de la disminución gradual de la extracción de SQM. Por tanto, revisando los descensos, el efecto de la extensión de la extracción de salmuera a las tasas aprobadas por RCA 226/2006 a SQM hasta el 2040 (escenario 3), es el que produce un mayor efecto en los niveles de los sectores que abarcan los perfiles, provocando los mayores descensos en el salar.

Con respecto al desplazamiento de la interfaz, aunque se obtienen resultados similares a partir de los cuatro escenarios simulados, existen algunas diferencias en el movimiento en profundidad y superficie para cada perfil según cada escenario. En la Tabla 5-16 se incluyen los desplazamientos horizontales (superficiales y profundos) de la interfaz, además de los desplazamientos verticales.

Perfiles	Escenarios	Máximo desplazamiento de la interfaz (m)	
		Horizontal	Vertical
Quelana	Escenario 1	25 superficial (*) 700 profundo	29
	Escenario 3	39 superficial (*) 690 profundo	28
	Escenario 4	25 superficial (*) 700 profundo	29
	Escenario 7	35 superficial (*) 335 profundo	24
Peine	Escenario 1	125 superficial (*)	4
	Escenario 3	165 superficial (*)	5
	Escenario 4	112 superficial (*)	4
	Escenario 7	155 superficial (*)	5
La Punta-La Brava	Escenario 1	225 superficial (*)	2
	Escenario 3	255 superficial (*)	2
	Escenario 4	220 superficial (*)	2
	Escenario 7	305 superficial (*)	2

(\*) Primera capa de cada modelo, equivalente a no más de 10 m de profundidad.

**Tabla 5-16: Desplazamiento horizontal y vertical de la interfaz (profundo y superficial) para los tres perfiles SEAWAT obtenidos a partir de los escenarios de gestión 1, 3, 4 y 7.**

Fuente: Elaboración propia

Los desplazamientos más importantes, tanto en vertical como en horizontal, se producen en el perfil de Quelana, para los escenarios 1 y 4, sin embargo, estos desplazamientos ocurren en profundidad y no se relacionan directamente con las zonas de protección ambiental.

Los desplazamientos horizontales en superficie más importantes para el perfil de Quelana son de 39 m y 35 m (escenarios 3 y 7), para el perfil de Peine de 165 m y 155 m (escenarios 3 y 7) y para el perfil de La Punta-La Brava de 305 m (escenario 7).

## 6 Discusión de los resultados

En este capítulo se resumen y discuten los resultados obtenidos de los 8 escenarios simulados con el modelo de flujo 3D, además de los 4 escenarios que se evaluaron con cada uno de los modelos 2D, en los sectores de Quelana, Peine y La Punta-La Brava.

En la (\*) Se simula una reducción escalonada entre los años 2021-2030 hasta aproximadamente el 50% de la máxima extracción autorizada, es decir 822 l/s

Tabla 6-1 se describe cada uno de los escenarios y se resumen los resultados de los descensos máximos obtenidos en las zonas de protección ambiental, balance hídrico y desplazamiento de la interfaz salina en los perfiles 2D. En la Figura 6-1 se incluyen los sectores de la cuenca mencionados en el texto, los sistemas Aguas de Quelana, Peine y La Punta-La Brava. Además, en la figura se incluyen los sectores o pozos donde se producen las extracciones de salmuera y agua dulce de cada uno de los escenarios y los pozos donde se revisaron los resultados de los modelos numéricos, de forma de establecer su relación espacial con los objetos de protección ambiental.

En este punto, es importante mencionar que los descensos máximos incluidos en la (\*) Se simula una reducción escalonada entre los años 2021-2030 hasta aproximadamente el 50% de la máxima extracción autorizada, es decir 822 l/s

Tabla 6-1 se han determinado en los puntos de observación seleccionados para revisar los resultados de las simulaciones en los modelos numéricos. Por lo tanto, pueden existir descensos diferentes en otros puntos de observación en las inmediaciones de las zonas de protección ambiental que no se han incluido como puntos de observación en el modelo numérico. La distribución espacial de los descensos obtenidos con el modelo 3D para cada escenario se puede revisar en el capítulo 3 de este informe.

Los resultados y discusión en este capítulo se describen en un inicio para el modelo de flujo 3D y luego para los modelos 2D. Además, se ha incluido un capítulo con las limitaciones de las herramientas numéricas utilizadas, que se debe tener en consideración al momento de evaluar el significado de los resultados obtenidos.

Escenario		Resultados Simulaciones 2020									
		Modelo 3D				Modelo 2D					
Escenario 1	Caso Base	Descenso	Zona	Max (m)	Año	Descenso	Perfil	Max (m)	Año		
			Z. Marginal	0,6	2043		Quelana	0,18	2032		
Z. Norte	0,14		2044	Peine	0,47		2043				
Z. Monturaqui	0,77		2023	La Punta La Brava	0,52		2044				
		Balance	Se alcanza una variación de almacenamiento positiva (entradas>salidas) a partir de la década 2030-2039			Desplazamiento Interfaz	Perfil	Horizontal Max. (m)	Año	Vertical Max. (m)	Año
			Quelana	25	2042		29	2070			
			Peine	125	2070		4	2070			
			La Punta La Brava	225	2070		2	2070			
Escenario 2	Caso Base + Aprobación extracción agua dulce CMZ	Descenso	Zona	Max (m)	Año	Equivalente al Escenario 1 (descenso en Núcleo y Z. Marginal del modelo 3D para las condiciones de borde, son iguales a las del Escenario 1)					
			Z. Marginal	0,6	2043						
Z. Norte	0,14		2044								
Z. Monturaqui	1,8		2029								
		Balance	Se alcanza una variación de almacenamiento positiva a partir de década 2030-2039								
Escenario 3	Caso Base + Aprobación extracción agua dulce CMZ + Adicional a misma tasa de SQM (100 % -salmuera y agua dulce por 10 años adicionales)	Descenso	Zona	Max (m)	Año	Descenso	Perfil	Max (m)	Año		
			Z. Marginal	0,88	2044		Quelana	0,23	2044		
Z. Norte	0,15		2044	Peine	0,73		2044				
Z. Monturaqui	1,8		2029	La Punta La Brava	0,59		2044				
		Balance	Se alcanza una variación de almacenamiento positiva (entradas>salidas) a partir de la década 2040-2049			Desplazamiento Interfaz	Perfil	Horizontal Max. (m)	Año	Vertical Max. (m)	Año
			Quelana	39	2042		28	2070			
			Peine	165	2070		5	2070			
			La Punta La Brava	255	2070		2	2070			
Escenario 4	Caso Base + Aprobación extracción agua dulce CMZ + Modificación SQM del Plan de Desarrollo Sustentable 2020 (reducción gradual (*) al 50% al 2030),	Descenso	Zona	Max (m)	Año	Descenso	Perfil	Max (m)	Año		
			Z. Marginal	0,53	2043		Quelana	0,17	2029		
Z. Norte	0,13		2044	Peine	0,39		2044				
Z. Monturaqui	1,8		2029	La Punta La Brava	0,47		2044				
		Balance	Se alcanza una variación de almacenamiento positiva (entradas>salidas) a partir de la década 2030-2039			Desplazamiento Interfaz	Perfil	Horizontal Max. (m)	Año	Vertical Max (m)	Año
			Quelana	25	2042		29	2070			
			Peine	112	2070		4	2070			
			La Punta La Brava	220	2070		2	2070			

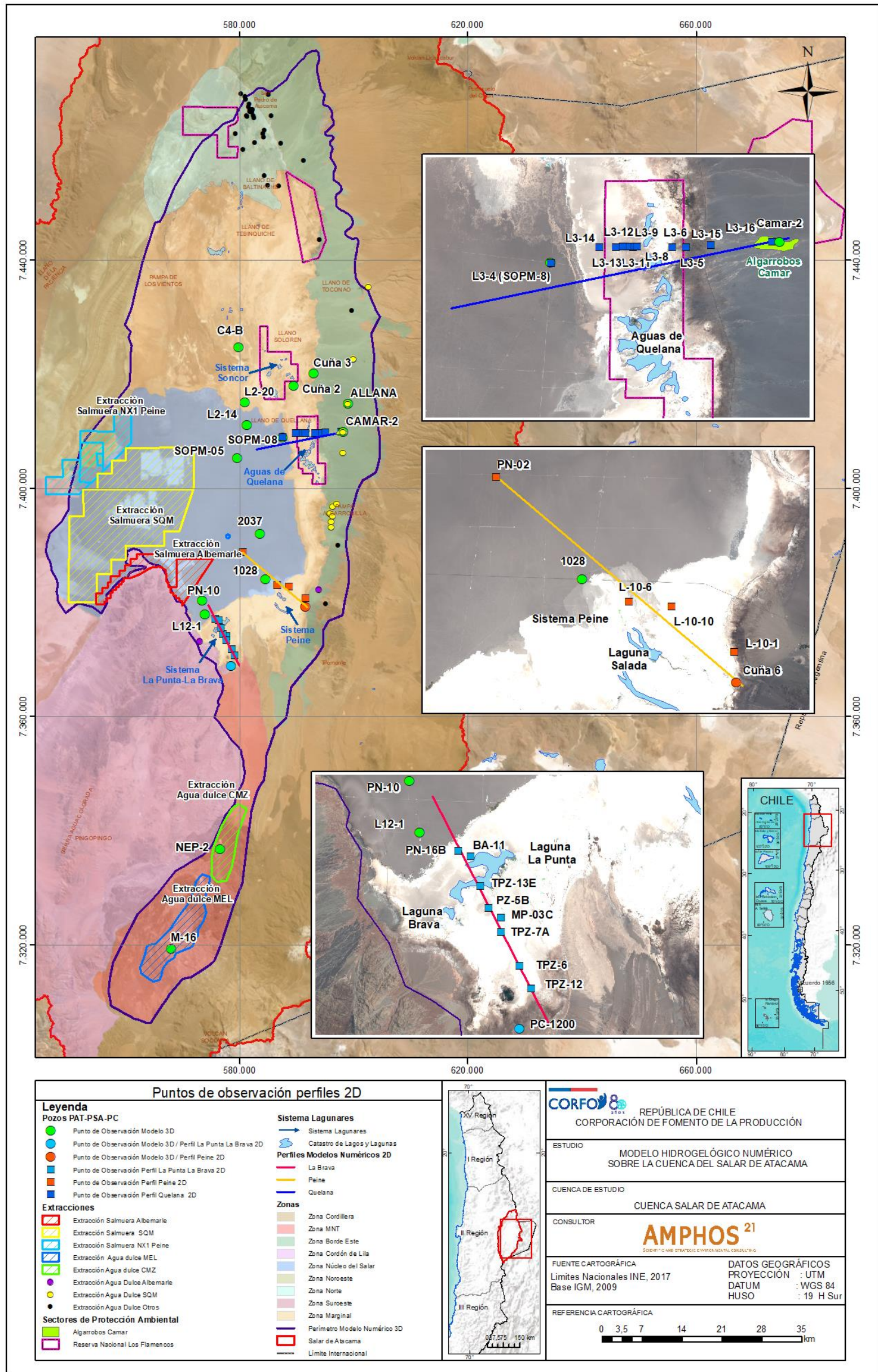
Escenario		Resultados Simulaciones 2020												
		Modelo 3D			Modelo 2D									
Escenario 5	Caso Base + Aprobación extracción agua dulce CMZ + Extracción a tasa fija al 50% de la tasa SQM por 20 años (agua dulce y salmuera).	Descenso	Zona	Max (m)	Año	Similar al Escenario 1 y 2 (descenso en Z. Marginal del modelo 3D para las condiciones de borde, es igual a la del Escenario 1. Para el Núcleo el descenso es similar)								
			Z. Marginal	0,57	2043									
Z. Norte	0,14		2044											
Z. Monturaqui	1,8	2029												
Balance	Se alcanza una variación de almacenamiento positiva (entradas>salidas) a partir de la década 2040-2049													
Escenario 6	Caso Base + Aprobación extracción agua dulce CMZ + Modificación tasa extracciones SQM (con reducción gradual al 50% (*) en 10 años hasta 2030) y extracción a tasa fija x 10 años adicionales (2031-2040)	Descenso	Zona	Max (m)	Año					Similar al Escenario 1 y 2 (descenso en Z. Marginal del modelo 3D para las condiciones de borde, es igual a la del Escenario 1. Para el Núcleo el descenso es similar)				
			Z. Marginal	0,6	2043									
Z. Norte	0,14		2044											
Z. Monturaqui	1,8	2029												
Balance	Se alcanza una variación de almacenamiento positiva (entradas>salidas) a partir de la década 2040-2049													
Escenario 7	Caso Base + Aprobación extracción agua dulce CMZ + Cambio Climático	Descenso	Zona	Max (m)	Año	Descenso	Perfil	Max (m)	Año					
			Z. Marginal	0,7	2030		Quelana	0,48	2032					
Z. Norte	1,74		2070	Peine	0,49		2043							
Z. Monturaqui	3,1	2053	La Punta La Brava	0,54	2044									
Balance	Se alcanza una variación de almacenamiento positiva (entradas>salidas) solo en la década 2040-2049				Desplazamiento Interfaz	Perfil	Horizontal Max. (m)	Año	Vertical Max. (m)	Año				
						Quelana	35	2042	24	2070				
						Peine	155	2070	5	2070				
										La Punta La Brava	305	2070	2	2070
Escenario 8	Caso Base + Aprobación extracción agua dulce CMZ + Adicional salmuera y agua dulce NX1 Peine	Descenso	Zona	Max (m)	Año	Muy similar al Escenario 1 y 2 (descenso en Z. Marginal del modelo 3D para las condiciones de borde, es igual a la del Escenario 1. Para el Núcleo el descenso es muy similar)								
			Z. Marginal	0,6	2043									
Z. Norte	0,14		2044											
Z. Monturaqui	1,8	2029												
Balance	Se alcanza una variación de almacenamiento positiva (entradas>salidas) a partir de la década 2030-2039													

(\*) Se simula una reducción escalonada entre los años 2021-2030 hasta aproximadamente el 50% de la máxima extracción autorizada, es decir 822 l/s

Tabla 6-1: Resumen de escenarios y resultados de las simulaciones evaluadas con el modelo 3D y 2D.

Fuente: Elaboración propia





**Figura 6-1: Mapa de localización de los perfiles 2D de Quelana, Peine y La Punta - La Brava con sus respectivos puntos de observación y la clasificación de los puntos de seguimiento ambiental, entre PSA, PC y PAT de los diferentes operadores de la cuenca del Salar de Atacama.**

Fuente: Elaboración propia

## 6.1 Modelo 3D de flujo

Los resultados de las simulaciones de escenarios predictivos en el modelo tridimensional se han analizado de acuerdo a: (i) la serie temporal de niveles piezométricos en algunos puntos de control del plan de seguimiento ambiental hidrogeológico (PSAH) y en cuatro puntos de observación (dos de ellos ficticios) en la zona de Monturaqui, (ii) el balance hídrico global y promedio en el periodo 2020-2070, (iii) el descenso en toda la cuenca en distintas épocas de la simulación, y (iv) el efecto en los niveles en los puntos definidos como condición de contorno de nivel prescrito en los perfiles SEAWAT para analizar los escenarios que requieren la modelación de flujo con densidad variable.

Los puntos de observación elegidos para el análisis de los escenarios predictivos en el modelo tridimensional se localizan en las zonas de mayor interés medioambiental. Así, se han tomado tres puntos de control por cada sistema lagunar, uno de ellos hacia la zona del Núcleo, otro cercano a las lagunas y el tercero en la parte más distal del núcleo.

En el área de Soncor se han utilizado 5 puntos de control, debido a la magnitud de las lagunas en este sistema, los puntos son (L2-14, L2-20, Cuña 2, L2-3 y Allana), en la zona Norte se han tomado dos puntos de control (C4-B y RM-8) y 4 en la zona de Monturaqui (M-23, NEP-2, ZZ1-MNT y ZZ2-MNT). En el sector de La Punta-La Brava se han seleccionado 3 puntos de control (PN-10, L12-1 y PC-1200), en el sector de Peine 3 puntos de control (2037, 1028 y Cuña 6), en el sector de Quelana 3 puntos de control (SOPM-05, SOPM-08 y Camar 2). La Figura 6-1 muestra la ubicación de los puntos de control para el modelo tridimensional, los sectores y zonas mencionados y los principales objetos de protección medioambiental.

*El resumen de los resultados obtenidos en los puntos de control, a partir de cada uno de los escenarios para el modelo 3D, se detalla en la (\*) Se simula una reducción escalonada entre los años 2021-2030 hasta aproximadamente el 50% de la máxima extracción autorizada, es decir 822 l/s*

Tabla 6-1.

*A continuación, se indican los descensos obtenidos del caso Base y los descensos, obtenidos de los 7 escenarios hipotéticos restantes. Lo que se indica aquí como áreas La Punta-La Brava, Peine, Quelana, Soncor, son agrupadas en la (\*) Se simula una reducción escalonada entre los años 2021-2030 hasta aproximadamente el 50% de la máxima extracción autorizada, es decir 822 l/s*

Tabla 6-1, como zona Marginal.

1. Para el escenario 1 (caso Base), que considera la extracción de SQM hasta el año 2030, la de ALB hasta el año 2042, la extracción de agua industrial de CMZ hasta 2023 y el cese de la extracción de MEL, se obtienen los siguientes descensos:
  - a. En el área La Punta-La Brava el descenso máximo es del orden de 0,6 m en la zona más cercana al núcleo y disminuye hacia el sur.
  - b. En el área Peine, el mayor descenso se observa en el punto de observación más cercano al núcleo, con un valor de prácticamente 0,4 m y disminuye hacia el Sureste del Salar.
  - c. En el área de Quelana el mayor descenso se observa en el punto más cercano al núcleo con un valor de 0,5 m y disminuye hacia el Este (zona Marginal).
  - d. En el área de Soncor los mayores descensos se producen en puntos de observación localizados hacia el núcleo, con valores de 0,3 m, que disminuye hacia el este y vuelve a aumentar en la zona Marginal a valores de 0,2 y 0,3 m, debido a la extracción de agua industrial del pozo Allana de SQM.
  - e. En la zona de Monturaqui no se observa descenso en la parte más alta de la cuenca, y los niveles comienzan a recuperarse desde el inicio del escenario. Sin embargo, al final de la simulación los puntos no alcanzan los niveles previos a la extracción. En la zona de Callejón se observa un descenso máximo de 0,8 m y de 0,4 m al sur de Tilopozo, debido a las extracciones de CMZ.
  - f. En la zona Norte no se observa descensos más allá de las oscilaciones naturales.
2. Para el escenario 2, que considera la extensión de CMZ hasta 2031, los descensos obtenidos son muy similares a los obtenidos del caso Base, con excepción de la zona de MNT, debido a la extracción de CMZ. Así, en la zona de Callejón se obtiene un descenso adicional respecto al caso Base de 1 m (con descensos totales del orden de 1,8 m) y de alrededor de 15 cm al sur del sector de Tilopozo (con descensos de 0,55 m).
3. El escenario 3, que considera la extensión de CMZ (2031) y la extensión de extracción de SQM hasta el año 2040, indica descensos adicionales con respecto al caso base de 13 cm en La Punta-La Brava, 24 cm en Peine, 37 cm en Quelana y 19 cm debido a la extensión de extracción de salmuera de SQM. En la zona de MNT, al igual que para el escenario 2, se obtiene un descenso adicional de 1 m en Callejón y de alrededor de 15 cm al sur de Tilopozo con respecto al caso Base.

4. Para el escenario 4, que considera la extracción de CMZ (2031) y la reducción gradual de la extracción de SQM del 50% al año 2030, se obtienen descensos menores que para el caso Base en todas las zonas (implicando reducciones de los descensos de hasta 17 cm), a excepción de la zona de MNT para la cual se obtienen los mismos resultados que en los escenarios 2 y 3, con descensos adicionales de 1 m en Callejón (con descensos totales del orden de 1,8 m) y de alrededor de 15 cm al sur de Tilopozo.
5. En el escenario 5, que considera la extensión de CMZ (2031) y la extensión de la extracción de SQM hasta el año 2040 con reducción a tasa fija del 50% a partir del año 2021, se obtienen descensos levemente inferiores a los del caso base en todas las zonas, a excepción de la zona de MNT para la cual se obtienen los mismos resultados que en los escenarios 2 al 4, con descensos adicionales de 1 m en Callejón (con descensos totales del orden de 1,8 m) y de alrededor de 15 cm al inicio de Tilopozo.
6. En el escenario 6, que considera la extensión de CMZ (2031) y la extensión de la extracción de SQM hasta el año 2040 con reducción gradual del 50% al año 2030, se obtienen descensos similares a los del caso base en todas las zonas, a excepción de la zona de MNT para la cual se obtienen los mismos resultados que en los escenarios 2 al 5, con descensos adicionales de 1 m en Callejón (con descensos totales del orden de 1,8 m) y de alrededor de 15 cm al sur de Tilopozo. Los descensos en el resto de las zonas son levemente superiores (producto de la extensión de la extracción de SQM), a excepción de los descensos en los pozos cercanos a los pozos de extracción de agua industrial de SQM, donde son levemente inferiores, producto de la reducción gradual de esta extracción.
7. Respecto al escenario 7, que considera la extensión de CMZ (2031) y la disminución de la recarga por efectos del cambio climático, se observan mayores descensos en todas las zonas, siendo los más relevantes en la zona Marginal (entre 11 y 41 cm adicionales al caso base), zona Norte (1,7 m adicionales al caso base) y en la zona de Monturaqui (2,7 m adicionales al caso base).
8. Por último, según el escenario 8, que considera la extensión de CMZ (2031) y la extracción de salmueras del proyecto NX-1 entre el año 2021 y 2040, los descensos obtenidos son prácticamente iguales que los obtenidos a partir del escenario 1 y 2. Esto es debido a que el caudal extraído tanto de salmuera como de agua industrial por NX-1 (230 L/s y 25 l/s, respectivamente) es menor en proporción al caudal total

extraído por SQM (1.700 l/s y 180 l/s para salmuera y agua industrial, respectivamente), además que se encuentra más alejado a los sectores protegidos de la zona Marginal. Por tanto, se puede concluir que las extracciones de NX-1 no generan descensos en la zona Marginal donde se ubican los objetos de protección ambiental, pero sí en la zona del Núcleo en las décadas de operación del proyecto NX1 de Peine.

Finalmente, de la revisión de las respuestas del nivel piezométrico en los diferentes sectores de la cuenca a partir de los distintos escenarios predictivos, se puede concluir que el escenario hipotético 3 es el que genera un mayor efecto sobre el sistema en términos de descensos en la zona del Salar alcanzando unos 10 u 11 m. Este escenario es el que cuenta con la extensión de extracción de salmuera a la tasa aprobada en la RCA 226/2006 de SQM, hasta el año 2040 sin ningún tipo de reducción, que es el factor que genera mayor efecto en la zona del Núcleo.

Para la zona de Monturaqui, zona Norte y en la zona Marginal, el escenario 7 es el que genera los mayores descensos. Este escenario contempla la reducción de la recarga por cambio climático. Así, se obtienen descensos de 2 m en la cabecera de la subcuenca y al sur del sector de Tilopozo, y descensos de 3,1 m en el sector de Callejón.

Por otro lado, los escenarios que consideran una reducción de la extracción para el periodo 2021-2030 por parte de SQM, y del operador de litio de dicha concesión minera para el periodo 2031-2040 (escenario 4, 5 y 6), generan resultados en los que los descensos en todos los sectores (exceptuando Monturaqui) son menores a los obtenidos en los escenarios que no consideran reducción en las extracciones (escenarios 1, 2 y 3). En particular el escenario 4 obtiene menores descensos que el caso base (escenario 1), ambos con extracción hasta el 2030. Por su parte, los escenarios 5 y 6 obtienen menores descensos que el escenario 3, todos ellos modelados con extracción hasta 2040.

Con respecto al balance hídrico, se ha determinado que:

- En general, para todos los escenarios predictivos en la década 2020-2029 se obtiene una variación del almacenamiento negativa, con valores entre -1.016 y -1.829 L/s para el SHAC N (salmuera), entre -147 y -874 L/s para el F (agua dulce) y entre -30 y -169 L/s para el A+B+C (zona de mezcla).
- Para los escenarios que simulan la extracción de salmuera de SQM hasta el año 2030 (escenarios 1, 2, 4, 7 y 8), para la década de 2030-2039 se obtiene una

variación de almacenamiento positiva (entradas superiores a las salidas y aumento del volumen almacenado en el acuífero) en el SHAC N (salmuera), con valores entre 208 y 419 L/s. El resultado es similar para los SHAC F (agua dulce) y A+B+C (zona mezcla), donde se obtiene una variación de almacenamiento positiva que varía entre 74 y 82 L/s para el F (agua dulce) y entre 5 y 9 L/s para el A+B+C, con excepción del escenario 7, que debido a la disminución de la recarga, se obtienen variaciones de almacenamiento negativas para todos los periodos analizados.

- En los escenarios que simulan la extensión de SQM o de otro operador hasta 2040 (escenarios 3, 5 y 6), la variación del almacenamiento para la década 2030-2039 sigue siendo negativa, con valores entre -334 y -1.055 L/s para el SHAC N (salmuera), entre -9 y -49 L/s para el F (agua dulce) y entre -5 y -15 L/s para el A+B+C (zona de mezcla).
- Para todos los escenarios, en la década 2040-2049 la variación de almacenamiento es positiva con valores entre 683 y 880 L/s para el SHAC N (salmuera). El resultado es similar para los SHAC F (agua dulce) y A+B+C (zona de mezcla), donde se obtiene una variación de almacenamiento positiva que varía entre 61 y 94 L/s para el F (agua dulce) y entre 11 y 18 L/s para el A+B+C, con excepción del escenario 7 que, debido a la disminución de la recarga, se obtienen variaciones de almacenamiento negativas para todos los periodos analizados.
- A partir de la década de 2050-2059 para todos los escenarios, la variación del almacenamiento total disminuye, y continúa disminuyendo hasta el término de las simulaciones en 2070, debido a que el cese de extracción induce un aumento en los niveles que conlleva un aumento en la evaporación, principalmente en el núcleo.

En términos generales, una vez que termina la extracción en los distintos escenarios, la variación del almacenamiento se vuelve positiva, es decir, las entradas superan a las salidas del sistema. Sin embargo, el cese de extracción conlleva un aumento generalizado en los niveles piezométricos en todo el Salar, que induce un aumento importante en la evaporación. Por esto, la variación del almacenamiento aumenta al terminar las extracciones, pero luego vuelve a disminuir debido al aumento en la evaporación. Pese a esta disminución, en todos los escenarios, a excepción del escenario 7, al término de la simulación la variación del almacenamiento es positiva para el último periodo (2060-2070) con un máximo para el escenario 3 de 773 l/s y un mínimo para el escenario 4 de 442 l/s.

En el caso del SHAC N (salmuera) el escenario más desfavorable en términos de balance es el escenario 3, que produce una variación de almacenamiento para el periodo 2020-

2070 negativa e igual a -28 L/s. En el caso de los SHAC F (agua dulce) y A+B+C (mezcla) el escenario más desfavorable es el 7, que produce variaciones de almacenamiento negativas para todo el periodo (2020-2070), siendo de -460 L/s para el F (agua dulce) y -217 L/s para el A+B+C (mezcla).

Por lo tanto, en términos de balance, el escenario que supone un mayor efecto al agua dulce del sistema es el escenario 7 (que simula la disminución de la recarga por cambio climático), cuya variación de almacenamiento se mantiene negativa en todo el periodo de simulación. Por otra parte, el escenario 3 (que consideran extracción de SQM o de otro operador hasta el año 2040 sin reducción) es el que produce el mayor efecto a la zona de salmuera (SHAC N), ya que produce una variación del almacenamiento negativa hasta la década de 2030-2039, que implica una variación de almacenamiento negativa e igual a -28 L/s para todo el periodo 2020-2070.

## 6.2 Modelos 2D de flujo con densidad variable

Se han construido 3 perfiles en SEAWAT en los sectores de Quelana, Peine y La Punta-La Brava. Para la elección de los escenarios simulados se ha cuantificado la variación de los niveles en los puntos que definen la condición de borde en ambos extremos de cada perfil, a partir de todos los resultados de las simulaciones realizadas con el modelo tridimensional de flujo.

En la Figura 6-1 se presenta el mapa de distribución de los perfiles 2D con los puntos de observación utilizados en las simulaciones, así como la clasificación de los puntos pertenecientes a los Planes de Seguimiento Ambiental (PSA), Planes de Alerta Temprana (PAT) y Planes de Contingencia (PC), según los compromisos ambientales de cada operador.

En función de la respuesta de los niveles a los distintos escenarios y las distintas tendencias observadas en el modelo 3D, se ha decidido simular, tanto para el perfil Quelana, Peine y La Punta-La Brava los escenarios 1 (caso Base), 3, 5 y 7. El resumen de los resultados obtenidos a partir de cada uno de los escenarios simulados se detalla en la (\*) Se simula una reducción escalonada entre los años 2021-2030 hasta aproximadamente el 50% de la máxima extracción autorizada, es decir 822 l/s

Tabla 6-1.

En términos generales, para los tres perfiles, los máximos descensos en los puntos de observación cercanos al núcleo del salar se obtienen a partir del escenario 3, que simula la extensión de la extracción de salmuera y agua industrial de SQM hasta el 2040 sin ningún tipo de reducción. El único escenario que presenta descensos mayores al escenario 3 en algunos puntos de la zona Marginal, es el escenario 7, que simula la disminución de la recarga por cambio climático.

El máximo descenso en la zona del Núcleo en el perfil de Quelana es de 0,23 m, en el perfil de Peine es de 0,73 m y en el perfil de La Punta-La Brava es de 0,59 m. Mientras que el máximo descenso en la zona Marginal en el perfil de Quelana es de 0,48 m, en el perfil de Peine es nulo y en el perfil de La Punta-La Brava es de 0,22 m.

Respecto al desplazamiento de la interfaz salina, los resultados de las simulaciones son similares entre los cuatro escenarios. Sin embargo, los escenarios 3 y 7 son los que generan mayores desplazamientos de la interfaz salina en superficie. Estos escenarios corresponden a la extensión de la hipotética extracción de SQM o de otro operador hasta 2040 sin ningún tipo de reducción y a la hipotética disminución de la recarga por cambio climático respectivamente.

De este modo, a partir de los resultados numéricos para el escenario 3 del perfil de Quelana se obtiene un desplazamiento horizontal máximo de la interfaz en superficie del orden de 39 m y desplazamiento vertical máximo del orden de 28 m, para el escenario 3 del perfil de Peine un desplazamiento horizontal máximo del orden de 165 m y desplazamiento vertical máximo en torno a 5 m, y para el escenario 7 del perfil de La Punta-La Brava un desplazamiento horizontal máximo del orden de 305 m y desplazamientos verticales máximos en torno a 2 m.

A partir de los resultados numéricos obtenidos de las simulaciones, se observa en todos los escenarios un comportamiento similar de la interfaz, donde los descensos que se producen en los niveles piezométricos en las inmediaciones de los sistemas lagunares producto de la extracción de salmuera en el Núcleo y agua dulce desde el Borde Este tienen el potencial para provocar desplazamientos en la interfaz salina, debido a la conexión hidráulica entre el núcleo, la zona Marginal y Borde Este.

Respecto al funcionamiento hidrogeológico en la interfaz salina, se ha determinado que el flujo se ve condicionado tanto por las permeabilidades de los depósitos sedimentarios que se ubican bajo la zona Marginal, así como por la diferencia de densidad de los fluidos que

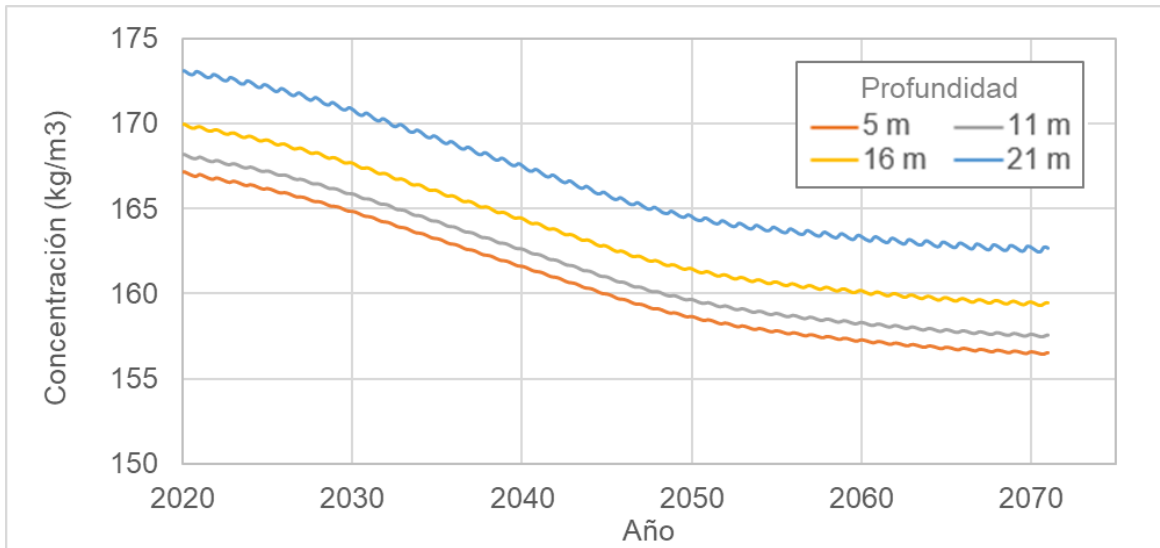


coexisten en el sector. La salmuera se ubica en la parte inferior de la interfaz y el agua dulce y salobre, de menor densidad, se dispone en la parte superior. Por lo tanto, el flujo de agua subterránea dulce y profunda, desde los bordes hacia el Salar, se ve interrumpido por la mayor densidad de la salmuera, favorecido además por la menor permeabilidad de los depósitos sedimentarios, lo que provoca un ascenso y evaporación del agua cercana a la superficie. Además, los modelos de densidad variable ponen en evidencia la generación de flujos convectivos en el entorno de la interfaz salina y otros sectores del núcleo donde predomina la salmuera, debido a contrastes de densidad que produce la evaporación superficial y la mezcla con salmueras más concentradas (y posiblemente antiguas).

Todos estos aspectos entregan nuevos antecedentes sobre el funcionamiento de la interfaz salina y zona de mezcla, y ponen de manifiesto su alta complejidad. Por lo tanto, las hipótesis acá planteadas y obtenidas de los modelos numéricos deben corroborarse a partir de nuevos estudios de detalle y que abarquen, además, el comportamiento más profundo, donde se tiene menor información, así como al Oeste y Norte del Salar.

La importancia del desplazamiento de la interfaz salina se debe a que sectores de la zona Marginal donde actualmente existe agua subterránea con una concentración (sólidos disueltos totales o SDT) definida, pueden variar a una concentración distinta, lo que podría significar una modificación de la alimentación de los objetos de protección ambiental. Por tanto, los planes de seguimiento ambiental y umbrales definidos con el objeto de proteger los sistemas lagunares ubicados en la zona Marginal no sólo deben considerar las variaciones en el nivel piezométrico, sino también la variación en la posición de la interfaz y, por lo tanto, la calidad química del agua subterránea.

A modo de ejemplo, en la Figura 6-2 se muestra la variación en la concentración (SDT) de un punto ubicado en la zona Marginal en el perfil de La Punta-La Brava para el escenario 7 (reducción de la recarga por cambio climático). Las simulaciones muestran una disminución de la concentración desde un valor inicial cercano a 170 kg/m<sup>3</sup> (SDT: 170.000 mg/l) hasta concentraciones de 160 kg/m<sup>3</sup> (SDT: 160.000 mg/l) al final de la simulación para las capas más someras del perfil. Por tanto, se hace hincapié en la importancia de un monitoreo sistemático de las variaciones en la composición química en profundidad.



**Figura 6-2: Variación de la concentración en el tiempo de las capas 2, 4, 6 y 8 para  $x=7.000$  m en el perfil 2D en la simulación del escenario 7 del perfil de La Punta-La Brava.**

Fuente: Elaboración propia

Por último, es importante destacar que de la simulación de todos los escenarios (a excepción del escenario 7) se obtiene una recuperación parcial de niveles generalizada y del balance hídrico una vez cesa la extracción, con una variación de almacenamiento positiva para el año 2070, es decir que las entradas de agua al sistema acuífero son superiores a las salidas. Sin embargo, el desplazamiento de la interfaz salina hacia el núcleo no se revierte para el año 2070 (que corresponde a la fecha final simulada), es decir, el desplazamiento de la interfaz se revierte a una velocidad menor que la recuperación de niveles para el mismo periodo, debido a que el movimiento de la interfaz posee una inercia de desplazamiento que sigue escalas temporales superiores a las de recuperación de los niveles piezométricos. Sin perjuicio de lo anterior, la tendencia de recuperación de la interfaz observada hasta el 2070, sugiere que dicha recuperación podría mantenerse en décadas posteriores al horizonte modelado.

### 6.3 Limitaciones de las simulaciones

Respecto a los modelos numéricos en que se basan las predicciones realizadas en este informe se debe tener en consideración lo siguiente:

- Todos los resultados obtenidos de las simulaciones de escenarios futuros se han construido con herramientas numéricas que corresponden a una simplificación de un modelo conceptual, que logra explicar los distintos datos medidos en la cuenca. Estos modelos, tanto conceptuales y numéricos, deben ser complementados y actualizados con mayores datos geológicos, geofísicos, hidrogeológicos e hidroquímicos, acorde se genere mayor información.
- Los resultados obtenidos de las simulaciones deben ser actualizados acorde a la capacidad predictiva de los modelos numéricos. Lo anterior debe ser revisado y validado a medida que se generen nuevos datos de monitoreo.
- El modelo 3D presenta una escala regional y de cuenca. Por tanto, dicha escala del modelo y su discretización espacial sólo permite cuantificar tendencias en los niveles piezométricos, no permitiendo cuantificar con precisión efectos locales y a escala centimétrica en los niveles o superación de umbrales debido a la extracción antrópica en la cuenca. En caso de que se requiera cuantificar funcionamientos locales, es necesario desarrollar modelos 3D de menor escala que incluyan flujo con densidad variable para reproducir con precisión el campo de flujo inducido por (i) la diferencia de densidad entre la salmuera y agua dulce; y (ii) las extracciones en la cuenca. Para la construcción de dichos modelos, es necesario disponer de más información y de mayor detalle respecto a la posición y forma de la interfaz en los sectores de mayor interés ambiental.
- Los modelos bidimensionales de flujo con densidad variable son una simplificación del sistema que permite evaluar fenómenos locales y no a escala regional. Por tanto, no se pueden extrapolar directamente los resultados a escalas mayores para definir posibles efectos generalizados sobre la interfaz salina debido a la extracción en la cuenca.
- Debido a las simplificaciones adoptadas en los perfiles de flujo con densidad variable, sus resultados son la mejor aproximación a la situación real de descenso de niveles y desplazamiento de la interfaz, dadas las limitaciones inherentes a la construcción de los modelos 2D (escala, dimensionalidad del problema,

consideración de condiciones totalmente saturadas, entre otros). La dinámica de estos procesos es tridimensional y obedece también a la relación con procesos superficiales que han sido considerados únicamente como condiciones de borde de los modelos desarrollados en este estudio, y que debe ser cuantificados con herramientas más complejas que incluyan la interacción de agua superficial y subterránea, procesos en la zona no saturada, y densidad variable.

- Por otro lado, los resultados a partir de los modelos bidimensionales de flujo con densidad variable dependen significativamente de las condiciones de contorno impuestas en los mismos y, por tanto, de la elección de los puntos de observación elegidos para definir dichas condiciones de contorno. La elección de otros puntos de observación con mayores variaciones en los niveles piezométricos para la definición de las condiciones de contorno en los modelos 2D, puede conllevar a predicciones que muestren diferentes efectos en la interfaz salina que los que predicen los perfiles 2D presentados.
- Finalmente, la elección de disminución de la recarga para el escenario 7, debe considerarse como una de las posibilidades dentro de muchos probables casos de simulación de precipitaciones. Cabe hacer presente que la simulación de cambio climático depende fuertemente de los datos de recarga impuestos, por lo que la elección de otras series de dato, ya sea mayores o menores, pueden producir resultados de descenso y balance completamente diferentes a los aquí presentados.

## 7 Conclusiones

Se ha concluido el modelo hidrogeológico numérico de flujo 3D de la cuenca del Salar de Atacama con el código MODFLOW-USG. Este modelo, a escala de cuenca, integra la geología y geometría de las unidades hidrogeológicas que conforman el Sistema Acuífero de la Cuenca del Salar de Atacama, sus propiedades hidráulicas, así como los procesos que controlan el sistema, tales como la recarga, la evaporación y las extracciones.

También, se han concluido los 3 modelos numéricos bidimensionales de flujo con densidad variable, construidos en SEAWAT 2000, para cuantificar el efecto de las extracciones futuras, en términos de descensos del nivel freático, de la distribución de la concentración (sólidos disueltos totales o SDT) y del desplazamiento de la interfaz salina en la zona Marginal, donde se ubican los sistemas lagunares.

El detalle del modelo conceptual y de la construcción, calibración y validación de los modelos numéricos, que sustentan los escenarios predictivos de simulación del presente informe, se puede revisar en el Informe de Modelo Hidrogeológico (Amphos 21, 2021).

Con el modelo numérico de flujo 3D desarrollado, se han simulado 8 escenarios predictivos de extracción conjunta de salmuera y agua dulce de los principales operadores de la cuenca, que corresponden a: SQM, Albemarle (ALB), y Minera Zaldívar (CMZ). Además, en estos escenarios se han cuantificado los efectos en los niveles del sistema acuífero producto de una reducción en la recarga debido al cambio climático, como caso más desfavorable para la cuenca, y la hipotética aprobación de proyectos en trámite o bien la modificación hipotética de los caudales de extracción de salmuera y agua dulce de los proyectos aprobados.

Con los modelos numéricos de flujo con densidad variable, se han simulado 4 escenarios predictivos (para cada perfil), los cuales han sido elegidos en base a los resultados de los 8 escenarios del modelo de flujo 3D. Los resultados de estos escenarios están condicionados por todos los elementos conceptuales (precipitaciones, recarga, propiedades hidráulicas, entre otros) y numéricos. Por lo tanto, los resultados deben ser considerados como aproximaciones y tendencias generales del funcionamiento del sistema y deberán ser corroborados con futuros datos de los parámetros observados.

A partir del análisis de los resultados de los distintos escenarios obtenidos con los modelos numéricos, se ha determinado que:

- El modelo 3D entrega un panorama general a escala de cuenca, del resultado de las extracciones conjuntas y sus efectos en los niveles del acuífero, sin embargo, no considera variaciones en la densidad, por lo que los resultados deben tomarse como orientativos en los sectores donde la densidad no es constante. En la zona Marginal, donde existe una mezcla del agua dulce y salmuera, y se ubican los sistemas lagunares, se deben considerar más representativos los resultados de los modelos 2D.

Respecto a los niveles de agua dulce y salmuera obtenidos de los modelos 3D y 2D:

- Todos los escenarios simulados muestran descensos del nivel freático en el Núcleo y en la zona Marginal del Salar. La magnitud de estos descensos está en función de los caudales de extracción a un lado u otro de la interfaz salina, así como del horizonte de simulación. Los descensos en la Zona Marginal son en todos los casos centimétricos.
- Los mayores descensos en la Zona Marginal ocurren para el hipotético escenario 3 (ampliación del caudal extraído por SQM o de otro operador de litio hasta el año 2040 a una tasa de 1.700 L/s de salmuera) y no superan el metro en el extremo cercano al salar y el medio metro en la zona central de la zona Marginal. Para el caso base, se aprecian descensos de pocos centímetros que no difieren del comportamiento registrado hasta la fecha a partir de los datos de monitoreo existentes.
- Los escenarios en que se considera una reducción en las extracciones de SQM hasta el 2030 (escenario 4) o reducción en las extracciones de SQM o de otro operador hasta el 2040 (escenarios 5 y 6), obtienen resultados en los que los descensos en todos los sectores (exceptuando Monturaqui) son menores a los obtenidos en los escenarios que no tienen reducción de las extracciones (escenarios 1, 2 y 3). En particular el escenario 4 correspondiente al Plan de Desarrollo Sustentable de SQM (octubre 2021) obtiene menores descensos incluso que el caso base (escenario 1), ambos con extracción hasta el 2030. Por su parte, los escenarios 5 y 6 obtienen menores descensos que el escenario 3, todos ellos simulados con extracción hasta 2040.
- En la Zona del Núcleo del Salar, el escenario 3 que considera la hipotética ampliación de la extracción de salmuera por SQM o de otro operador hasta el año 2040 a una tasa de 1.700 L/s (aprobada a través de RCA 226/2006) es el que produciría los mayores descensos.

- El hipotético escenario 7, que considera una reducción de la recarga entre un 15 y 18 % respecto a la estimación actual producto del cambio climático (según las simulaciones de precipitaciones del CR<sup>2</sup>), es el que produce los mayores descensos en la Zona Norte, Borde Este y Monturaqui. Cabe destacar que la simulación de cambio climático depende fuertemente de los datos de precipitación impuestos, por lo que la elección de otras series de dato, ya sean mayores o menores, pueden producir resultados de descenso y balance completamente diferentes a los aquí presentados.
- El escenario 8 correspondiente a la hipotética extracción del proyecto NX1-Peine ubicado en el borde oeste del Salar, presenta descensos en la Zona Marginal muy parecidos al escenario 2, que corresponde a los caudales aprobados a través de las RCA vigentes más la extensión de CMZ. La diferencia se observa en el sector oeste de la Zona del Núcleo de Salar donde se simulan descensos inducidos por el proyecto, del orden de 5 m al año 2042.
- En la Zona del Núcleo de Salar, la extracción de Albemarle, que fue simulada hasta el 2042 en todos los escenarios, presenta descensos de entre 3 y 5 m en su entorno, con excepción del escenario 3, en el que debido a la extensión de las extracciones de SQM se produce una superposición de los efectos del bombeo de ambos operadores lo que genera descensos mayores en el entorno de Albemarle.

#### Respecto al balance hídrico:

- El escenario con una hipotética reducción en la recarga producto del cambio climático (escenario 7) posee una variación de almacenamiento negativa e igual a -606 L/s en todo el dominio del modelo en el periodo 2020-2070. La elección de disminución de la recarga para el escenario 7 debe considerarse como una de las posibilidades dentro de muchos probables casos de simulación de precipitaciones. Además, es el que produce los mayores efectos en el agua dulce, ya que resulta en una variación del almacenamiento negativa en los SHAC F (agua dulce) y A+B+C (zona de mezcla) en todos y cada uno de los periodos de simulación analizados. Es decir, las salidas del sistema por extracciones y por evaporación, superan a las entradas por recarga, lo que disminuye las reservas de agua almacenadas en el acuífero.
- El escenario 3 que considera la hipotética ampliación de la extracción de salmuera por SQM u otro operador hasta el año 2040 a una tasa de 1.700 L/s (aprobada a través de RCA 226/2006) sin reducción, también posee una variación de

almacenamiento negativa, de -49 L/s, para el periodo 2020-2070, en todo el sistema acuífero. Además, es el escenario que produce los mayores efectos en la salmuera, ya que resulta en una variación del almacenamiento negativa en el SHAC N (salmuera) para el periodo 2020-2070 de -28 L/s.

- Para el mismo escenario 3, se observa una variación de almacenamiento negativa del sistema y de cada SHAC por separado, hasta el cese del bombeo (incluso en los escenarios con reducción). Sin embargo, posteriormente, esto se revierte y la variación de almacenamiento pasa a ser positiva, debido a la recuperación de los niveles.
- En el escenario 8, correspondiente a NX1-Peine, se produce una mayor disminución del almacenamiento en el sector del núcleo en comparación al escenario 2 (RCA vigentes y extensión de CMZ), debido a la extracción de salmuera que produciría este proyecto. Esto se ve reflejado en la disminución de la variación de almacenamiento de -1.628 a -1.829 L/s (periodo 2020-2029) y de 419 a 208 L/s (periodo 2030-2039).

Respecto al desplazamiento de la interfaz salina:

- En los 3 perfiles 2D modelados se evidencia un movimiento en la interfaz salina, identificado a partir de variaciones en las curvas de isoconcentración. La componente horizontal de este desplazamiento siempre es mayor, en uno o dos órdenes de magnitud, que la componente vertical, por lo que se hace referencia a la primera.
- Los desplazamientos de las curvas de concentración, que dan cuenta del movimiento de la interfaz, no difieren significativamente entre los distintos escenarios, por lo que se hace mención a los resultados de modo general.
- En el caso del perfil de Quelana, el desplazamiento horizontal somero de la interfaz salina, en los primeros 10 m de profundidad, es de casi 40 metros (escenarios 3 y 7), mientras que en el perfil de Peine es de alrededor de 160 m (escenarios 3 y 7) y en La Punta-La Brava es de 305 de metros (escenario 7).
- Este desplazamiento de la interfaz salina debido al efecto conjunto de las extracciones futuras de salmuera y agua dulce podrían generar efectos en la distribución de las concentraciones (sólidos totales disueltos).
- Si bien los escenarios muestran la recuperación de los niveles al final de la simulación (2070), no se evidencia que la interfaz salina revierta el desplazamiento



para esa misma década. El desplazamiento de la interfaz se revierte a una velocidad menor que la recuperación de niveles para el mismo periodo, debido a que posee una inercia de desplazamiento que sigue escalas temporales superiores a las de recuperación de los niveles piezométricos. Sin perjuicio de lo anterior, la tendencia de recuperación de la interfaz observada hasta el 2070, sugiere que dicha recuperación podría mantenerse en décadas posteriores al horizonte modelado.

- Los resultados de las simulaciones han demostrado que el bombeo de salmuera puede generar descensos de distinta magnitud en los niveles de la zona Marginal, así como también, modificaciones variables en la distribución de la concentración, lo que pone en evidencia que existe una conexión hidráulica entre el dominio de salmuera y agua dulce en el sistema acuífero. La respuesta en los niveles y concentración de los sistemas con densidad variable es más compleja y con un tiempo de respuesta más lento respecto a los sistemas de densidad constante, sin embargo, se descarta que se trate de sistemas completamente aislados. Por el contrario, la posición de la interfaz salina y niveles del acuífero en la zona Marginal responden de distinta forma y magnitud ante los distintos escenarios simulados, lo que corrobora que para evaluar los descensos en la zona Marginal se debe considerar el sistema de forma integrada.

Respecto a la capacidad predictiva de los modelos numéricos es importante destacar que las simulaciones poseen una serie de limitaciones, por lo que son capaces de predecir tendencias y aproximaciones al funcionamiento del sistema hidrogeológico. Las principales limitaciones son:

- El modelo numérico de flujo 3D corresponde a una simplificación de un modelo conceptual en la cual se discretiza temporal y espacialmente la realidad. Este modelo logra explicar los niveles medidos en la cuenca, pero no simula todos los procesos que ocurren en ella, como la interacción de agua superficial y subterránea, procesos en la zona no saturada, densidad variable, entre otros.
- La escala regional del modelo 3D, así como el tamaño de malla adoptado, no permite cuantificar con precisión efectos locales y a escala centimétrica en los niveles piezométricos o superación de umbrales debido a la extracción antrópica en la cuenca.
- Los escenarios de simulación asumen una distribución aproximada espacial y temporal de los caudales de extracción de salmuera.

- Debido a las simplificaciones adoptadas en los perfiles de flujo con densidad variable, sus resultados son una aproximación a la situación real de descenso de niveles y desplazamiento de la interfaz, dadas las limitaciones inherentes a la construcción de los modelos 2D (escala, dimensionalidad del problema, consideración de condiciones totalmente saturadas, entre otros). La dinámica de estos procesos es tridimensional y obedece también a la relación con procesos superficiales que han sido considerados únicamente como condiciones de borde de los modelos desarrollados en este estudio, y que debe ser cuantificados con herramientas más complejas que incluyan la interacción de agua superficial y subterránea, procesos en la zona no saturada, y densidad variable.
- Por otro lado, los resultados a partir de los modelos 2D dependen significativamente de las condiciones de contorno impuestas en los mismos y, por tanto, de la elección de los puntos de observación elegidos para definir dichas condiciones de contorno. Por tanto, la elección de otros puntos de observación con mayores variaciones en los niveles piezométricos para la definición de las condiciones de contorno en los modelos 2D puede conllevar a predicciones que muestren diferentes efectos en la interfaz salina que los que predicen los perfiles 2D presentados.
- Los resultados de las simulaciones numéricas presentados en este informe no deben ser entendidos como valores precisos y absolutos, sino como aproximaciones o tendencias que dependen de las consideraciones y supuestos. La escala de los modelos y sus limitaciones propias, los constituyen en herramientas capaces de predecir tendencias, órdenes de magnitud en los resultados y procesos generales y no para la determinación de umbrales puntuales o la superación de estos asociados a los planes de seguimiento ambiental (PSA), planes de alerta temprana (PAT) y planes de contingencia (PC). En caso de necesitar respuestas de mayor precisión, se debe contar con modelos numéricos construidos con información de detalle, acorde a la escala del problema.

## 8 Recomendaciones

En el Informe de Modelo Hidrogeológico se incluyeron una serie de recomendaciones específicas respecto a la obtención de información geológica, hidrológica, geofísica, hidrogeológica e hidroquímica para robustecer el modelo conceptual, en los sectores con menor información y de esta forma ir actualizando y complementando los modelos numéricos. En forma adicional, a continuación, se hace énfasis en algunas recomendaciones destinadas a fortalecer el monitoreo, en particular en las zonas de mayor interés medioambiental y sistemas lagunares:

- Incluir un monitoreo constante con nuevos puntos de control, complementarios a los ya existentes, ubicados aguas arriba y agua abajo de los sistemas lagunares, ubicados en la zona Marginal hacia el Núcleo y hacia el sureste para las lagunas de La Punta-La Brava y Peine, y hacia el Núcleo y el este para las lagunas de Quelana y Soncor.
- Construcción de piezómetros multinivel para una diferenciada caracterización de los niveles y calidad química en la zona Marginal. Estos piezómetros multinivel deben ser instalados a distintas profundidades y con una sección ranurada sólo en una porción reducida del acuífero.
- Una vez construidos los piezómetros multinivel, se recomienda llevar un registro continuo de nivel y concentración (SDT o CE), complementario a los puntos de monitoreo ya existentes, de forma de identificar, en caso de que existan, las variaciones en la calidad química del agua frente a las extracciones futuras, y evaluar fenómenos de desplazamiento de la interfaz.
- Se recomienda que tanto el Plan de Contingencia (PC) o el Plan de Alerta Temprana (PAT) incluyan medidas de calidad de las aguas subterráneas (conductividad eléctrica, TDS u otra), de forma complementaria a los umbrales en los niveles. Esto permitirá detectar cambios en la concentración de la salmuera, que podrían estar asociados a potenciales movimientos de la interfaz salina.
- Se recomienda realizar un mayor número de perfiles geofísicos TEM o similares, en base a métodos eléctricos, en los bordes del Salar, así como en las inmediaciones de los sistemas lagunares ubicados en la zona Marginal, que permitan una mejor caracterización de la interfaz salina. Esto se puede complementar con levantamientos en distintas épocas del año (verano-invierno) para evaluar posibles modificaciones en la posición de la interfaz salina.

- Debido a que los perfiles bidimensionales de flujo con densidad variable son una simplificación del sistema, se recomienda el uso de herramientas tridimensionales numéricas más complejas y a una escala adecuada que incluyan la interacción de agua superficial y subterránea, efectos en la zona no saturada, y efectos de densidad variable. Para el desarrollo de dichas herramientas numéricas es indispensable disponer de información adicional con mayor grado de detalle de la que se dispone actualmente sobre la distribución de niveles y concentraciones, y una caracterización más exhaustiva sobre la disposición de la interfaz y ancho de mezcla, tanto en planta como en vertical, a través de perfilaje geofísico.
- El modelo transitorio presentado en este informe está debidamente calibrado y cumple con todos los criterios establecidos en la guía de modelos de aguas subterráneas del SEIA (SEA, 2012), además de ser coherente con el modelo conceptual presentado en el Informe de Modelo Hidrogeológico. No obstante, lo anterior y siguiendo las recomendaciones de la Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA (SEA, 2012), se sugiere la actualización permanente de los modelos hidrogeológicos, tanto conceptual como numérico, incorporando nueva información que se genere en la cuenca, nuevas metodologías de trabajo y los análisis de incertidumbre relacionados a los parámetros calibrados.

## 9 Referencias

- Amphos 21 (2018). Estudio de modelos hidrogeológicos conceptuales integrados, para los Salares de Atacama, Maricunga y Pedernales. Comité de Minería no Metálica.
- Amphos 21 (2021). Modelo Hidrogeológico de la cuenca del Salar de Atacama. Informe: Modelo Hidrogeológico Conceptual y Numérico, Corfo.
- Center for Climate and Resilience Research (2018). Simulaciones climáticas regionales. Proyecto “Simulaciones climáticas regionales y marco de evaluación de vulnerabilidad”.
- CORFO (2018). Bases de conciliación proceso arbitral CORFO / SQM. Salar de Atacama.
- CPH Consultores (2011). Adenda 2: EIA Planta de producción de sales de potasio SLM NX UNO de Peine. Informe: Hidrología e hidrogeología Salar de Atacama.
- Herzberg, A. (1901). Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder [The water supply of some spas on the North Sea]. *J. Gasbeleuch Wasserversorg*, 44, p. 815-819.
- Luszczynski, N.J. (1961). Head and flow of groundwater of variable density. *J. Geophysical Res.* Vol. 66. N°12. p. 4247–4256.
- Marazuela MA., Vasquez-Suñé E., Custodio E., Palma E., García-Gil A. y Ayora C. (2018). 3D mapping, hydrodynamics and modelling of the freshwater-brine mixing zone in salt flats similar to the Salar de Atacama (Chile). *Journal of Hydrology*. Vol. 561. p. 223-235.
- Marazuela MA., Vasquez-Suñé E., Ayora C., García-Gil A. y Palma T. (2018b). Hydrodynamics of salt flat basins: The Salar de Atacama example. *Science of the total Environment* 651 (2019), p. 668-683.
- RCA N° 1/1997 (1997). Lixiviación de Óxidos de Cobre y Aumento de la Capacidad de Tratamiento de Mineral Sulfurado, de Minera Escondida Limitada (MEL). Bases Generales del Medio Ambiente. Comisión Regional del Medio Ambiente. Región de Antofagasta.
- RCA N° 47/2010 (2010). Modificaciones Faena Minera Zaldívar, de Compañía Minera Zaldivar SpA (CMZ). Bases Generales del Medio Ambiente. Comisión Regional del Medio Ambiente. Región de Antofagasta.
- RCA N° 226/2006 (2006). Cambios y Mejoras en la operación minera en el Salar de Atacama, de SQM Salar S.A. Según lo dispuesto en la Ley N° 19.300. Bases Generales del Medio Ambiente. Comisión Regional del Medio Ambiente. Región de Antofagasta.
- RCA N°021/2016 (2016). EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de evaporación Solar en el Salar de Atacama, de Rockwood Lithium. Bases Generales del Medio Ambiente. Comisión Regional del Medio Ambiente. Región de Antofagasta.

Servicio de Evaluación Ambiental (2012). Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA. Servicio de Evaluación Ambiental.

Zheng, C. and Simpson, M. J. (2004). SEAWAT-2000: Variable-Density Flow Processes and Integrated MT3DMS Transport Processes. *Groundwater*, 42: 642-645.