



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**INCERTIDUMBRE DE PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS EN  
SIMULACIONES PREDICTIVAS CON APLICACIÓN EN  
SUBCUENCA DEL RÍO RAPEL, REGIÓN DE COQUIMBO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA**

**VALERIA ISABEL GODOY MATURANA**

**PROFESORA GUÍA**

CLAUDIA MARTINEZ TORO

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN**

DOLORINDA DANIELE

TOMÁS OPAZO GONZÁLEZ

SANTIAGO DE CHILE

2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geóloga  
**POR:** Valeria Isabel Godoy Maturana  
**FECHA:** Octubre 2018  
**PROFESORA GUÍA:** Claudia Martínez Toro

## **INCERTIDUMBRE DE PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS EN SIMULACIONES PREDICTIVAS CON APLICACIÓN EN SUBCUENCA DEL RÍO RAPEL, REGIÓN DE COQUIMBO**

En este trabajo de título se analiza la influencia de la incertidumbre en los parámetros hidráulicos conductividad hidráulica y rendimiento específico en un modelo hidrogeológico sobre las simulaciones predictivas.

El trabajo incluye el desarrollo de un marco teórico en el cual se abarcan los conceptos básicos de la modelación hidrogeológica y de la incertidumbre existente en ella. Junto con la aplicación y análisis en un modelo numérico existente en el sector del río Rapel en la región de Coquimbo.

El marco teórico entrega la definición de diferentes conceptos asociados a la modelación hidrogeológica, así como las consideraciones mínimas para el desarrollo de un modelo conceptual y numérico. Además, entrega información respecto de las diferentes fuentes de incertidumbre y, específicamente, enfatiza la incertidumbre paramétrica y las metodologías para evaluarla y reducirla.

Se presenta una aplicación práctica del análisis de incertidumbre en un modelo numérico, utilizando un modelo creado por Véliz (2018) en la subcuenca del río Rapel, IV Región. Este modelo fue calibrado considerando 15 tasas de recarga diferentes, con lo cual se obtuvo 15 sets de parámetros de conductividad hidráulica y rendimiento específico consistentes en la zona.

En primer lugar, se realiza un análisis de incertidumbre a los parámetros calibrados en el modelo, con el fin de apreciar los efectos de la calibración sobre los rangos paramétricos posibles en el modelo, con la intención de reducir estos rangos.

En segundo lugar, se realiza una simulación predictiva a cada una de las 15 series calibradas, utilizando dos escenarios futuros; uno en el cual se mantiene la condición natural del sistema sin aplicar estrés adicional al acuífero y únicamente se evalúan los diferentes resultados de cota hidráulica simulados; y, otro, en donde se utiliza una serie de recarga única para los 15 set de parámetros y se aplica estrés al acuífero en forma de pozos de bombeo ubicados en una zona específica del modelo, con el fin de comparar los diferentes caudales que cada escenario es capaz de extraer.

Se analiza del primer escenario de simulación, una amplia variación de cota hidráulica simulada en cada una de las 15 series, al igual que en el segundo escenario se observan variaciones importantes de capacidad de bombeo entre cada una de las series.

Se concluye que dependiendo del set de parámetros a utilizar y del uso que se requiera del acuífero, se puede obtener una gama de resultados amplia. Se observa una dependencia importante entre los parámetros utilizados y los resultados simulados, con amplias variaciones en estos últimos al cambiar los parámetros, a pesar de que todos estos se encuentren dentro del rango posterior admisible.

Se demuestra que la manera correcta de realizar un modelo hidrogeológico corresponderá a la metodología de modelo estocástico, con la realización de un análisis de incertidumbre asociado, del cual se obtiene una distribución de resultados, cada uno con un porcentaje de probabilidad de ocurrencia, con lo que se pueden evaluar las diferentes acciones a tomar sobre el acuífero.

## AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar la inmensa gratitud que siento hacia mis papás en este momento, sin su apoyo incondicional ni su cariño no hubiera podido llegar a donde estoy ahora. Gracias por creer en mí, apoyar mis decisiones y ser parte de todo el proceso que significó lograr esto. Gracias por estar siempre para mí.

A Guido, gracias por ser una parte tan importante de mi vida, acompañarme desde que empecé el camino de la geología, creer en mí desde el principio, aguantarme y levantarme en los momentos donde, en mi exageración, sentía que nada iba a funcionar. Que creas incondicionalmente en mí significa mucho.

A mis hermanas Andrea y Maite, gracias por acompañarme y aguantarme desde hace tantos años.

Gracias a las personas de WSP que estuvieron dispuestas a enseñarme y explicarme con infinita paciencia, especialmente a Claudia que realmente fue una guía en este proceso y siempre se hizo un tiempo dentro de su ocupada agenda para juntarnos, ayudarme y corregirme. A Esteban que bueno... sin su trabajo no existiría esta tesis, gracias por ayudarme en cada dato que me faltaba. A Claudio por compartir sus conocimientos de GIS. Y a todos, gracias por su disposición y buena onda siempre.

A Tomás que fue un gran apoyo, a pesar de no estar en la oficina se dio el tiempo de ayudarme por teléfono/whatsapp/mail, gracias por el tiempo y la paciencia.

A los mis compañeros de la universidad, por esas largas noches de estudio que pasamos juntos en la carrera, que también ayudaron al proceso de estar acá. Los Gus et al., Tovalabos, geoAmigas, Malaquitas y todos los geólogos y casi geólogos con los que compartí este camino.

Obviamente también a mis amigas y amigos que me acompañan desde el colegio, son el mejor grupo con el que pude haber crecido.

No hay espacio en una hoja para toda la gente que quisiera agradecer, espero que, si no están acá, igual reconozcan el cariño.

## TABLA DE CONTENIDO

1.- INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.- Motivación .....	1
1.2.- Hipótesis .....	3
1.3.- Objetivo general .....	3
1.4.- Objetivos específicos .....	3
1.5.- Metodología.....	4
1.6.- Estructura del informe.....	5
2.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1.- Modelación hidrogeológica.....	7
2.2.- Incertidumbre en modelos numéricos hidrogeológicos .....	8
2.3.- Trabajos anteriores en la zona de estudio.....	8
3.- MARCO CONCEPTUAL.....	10
3.1.- Modelo conceptual.....	11
3.2.- Modelo numérico.....	13
3.3.- Unidades hidrogeológicas .....	14
3.4.- Parámetros hidráulicos .....	15
3.5.- Parametrización.....	17
3.6.- Calibración del modelo.....	18
3.7.- Análisis de incertidumbre paramétrica.....	20
3.8.- Simulación predictiva.....	22
3.9.- Modelamiento estocástico .....	22
4.- INCERTIDUMBRE .....	24
4.1.- Fuentes de incertidumbre en modelos hidrogeológicos .....	24
4.2.- Incertidumbre paramétrica .....	25
4.3.- Incertidumbre en caso de estudio .....	28

5.- DESCRIPCIÓN DEL MODELO EXISTENTE .....	29
5.1.- Ubicación del área de estudio .....	29
5.2.- Geología .....	30
5.3.- Modelo conceptual .....	35
5.4.- Construcción del modelo numérico .....	38
5.5.- Calibración del modelo numérico .....	44
6.- ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE.....	50
6.1.- Evaluación de parámetros y recarga.....	50
6.2.- Análisis de incertidumbre paramétrica .....	51
6.3.- Exploración de la incertidumbre predictiva .....	55
7.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	75
7.1.- Incertidumbre previa a la calibración.....	75
7.2.- Análisis de incertidumbre paramétrica.....	77
7.3.- Incertidumbre posterior a la calibración .....	78
8.- CONCLUSIONES .....	81
9.- BIBLIOGRAFÍA .....	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama general de la construcción de un modelo hidrogeológico. Elaboración propia. ....	11
Figura 2. Diagrama resumen método de calibración por prueba y error. (SEA, 2012)	20
Figura 3. Diagrama campana de Gauss antes de la calibración, y campana de Gauss posterior a la calibración obtenida a través del análisis de incertidumbre (Doherty, 2015). ....	21
Figura 4. Ubicación subcuenca Río Rapel. Región de Coquimbo, Chile. Elaboración propia. ....	30
Figura 5. Mapa geológico zona Río Rapel. Editado de mapa geológico Montepatria El Maquí (Modificado de Pineda y Calderón, 2008). ....	34
Figura 6. Ubicación pozos presentes en Río Rapel. Elaboración propia. ....	36
Figura 7. Piezometría acuífero para la fecha diciembre 2015. Véliz (2018). ....	37
Figura 8. Zonificación del acuífero según CAZALAC y Rhodos (2006) con acercamiento a la zona que conforma el área de estudio. Véliz (2018). ....	40
Figura 9. Modelo hidrogeológico del acuífero. a. Capa superior del modelo con zonas 1, 7, 2 y 3. En amarillo el río Rapel. b. Capa inferior con zonas 4, 8, 5 y 6 del modelo. Editado de Véliz (2018). ....	41
Figura 10. Diagrama de cajas conductividades horizontales calibradas de las 8 zonas. (Véliz, 2018). ....	48
Figura 11. Diagrama de cajas coeficiente de almacenamiento de acuífero libre calibrados de las 8 zonas. (Véliz, 2018). ....	49
Figura 12. Gráfico comparativo de error NRMS entre las distintas variaciones realizadas. ....	51
Figura 13. Varianza parámetro conductividad hidráulica previa a la calibración del modelo. Rango de valores teóricos de conductividad. ....	52
Figura 14. Varianza parámetro conductividad hidráulica posterior a la calibración del modelo. Valores en morado corresponden a los valores calibrados para la serie #14. ....	53
Figura 15. Varianza parámetro rendimiento específico previa a la calibración del modelo. Rango de valores teóricos de rendimiento específico. ....	53

Figura 16. Varianza parámetro rendimiento específico posterior a la calibración del modelo. Valores en morado corresponden a los valores calibrados para la serie #14.....	54
Figura 17. Valores recarga ingresada en simulación predictiva a escala mensual para series #2, #4, #5, #8 y #13. Elaboración propia. ....	56
Figura 18. Valores recarga ingresada en simulación predictiva a escala mensual para series #3, #6, #10, #11 y #12. Elaboración propia. ....	57
Figura 19. Valores recarga ingresada en simulación predictiva a escala mensual para series #1, #7, #9, #14 y #15. Elaboración propia. ....	58
Figura 20. Posición de los pozos y los puntos de observación dispuestos en el modelo. Elaboración propia. ....	59
Figura 21. Gráfico de cotas piezométricas simuladas en pozo AS. ....	60
Figura 22. Gráficos de cota piezométrica simulada en pozo AC. ....	60
Figura 23. Cotas piezométricas simuladas en punto de observación N1.....	61
Figura 24. Cotas piezométricas simuladas en punto de observación N2. ....	62
Figura 25. Cotas piezométricas simuladas en punto de observación N3 .....	63
Figura 26. Cotas piezométricas simuladas en punto de observación N4. ....	64
Figura 27. Cotas piezométricas simuladas en punto de observación N5.....	65
Figura 28. Cotas piezométricas simuladas en punto de observación N6. ....	66
Figura 29. Modelo numérico incluyendo los cuatro pozos de bombeo impuestos en las zonas 3-6, marcados en un círculo rojo. Elaboración propia. ....	70
Figura 30. Gráfico comparativo entre los caudales bombeados por los pozos y los niveles simulados por el pozo AS.....	71
Figura 31. Gráfico comparativo entre los caudales bombeados por los pozos y los niveles simulados por el pozo AC. ....	72
Figura 32. Resultados para caudales bombeados por cada serie a manera de porcentaje. ....	73
Figura 33. Gráfico comparativo entre los máximos y mínimos de niveles simulados y el promedio de los niveles observados en el pozo AS. ....	74
Figura 34. Gráfico comparativo entre los máximos y mínimos de niveles simulados y el promedio de los niveles observados en el pozo AC. ....	74

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores referenciales para la conductividad hidráulica (SEA, 2012).....	26
Tabla 2. Coeficiente de almacenamiento de acuífero libre o rendimiento específico (SEA, 2012). .....	27
Tabla 3. Valores de rendimiento específico y conductividad hidráulica horizontal calibrados en el estudio de CAZALAC y Rhodos (2006).....	42
Tabla 4. Rangos teóricos de conductividad hidráulica y rendimiento específico definidos para cada zona del modelo por Véliz (2018). .....	43
Tabla 5. Valores índices NRMS obtenidos por Véliz (2018) para las 15 series calibradas. ....	45
Tabla 6. Resultados calibración obtenidos por Véliz (2018). .....	46
Tabla 7. Valores de índice NRMS obtenidos en la calibración por Véliz (2018), junto con las recargas ingresadas en la calibración para cada serie. ....	68
Tabla 8. Valores NRMS obtenidos de la simulación predictiva al cambiar las recargas de los modelos. ....	69

# 1.- INTRODUCCIÓN

## 1.1.- Motivación

El agua subterránea ha cobrado una gran importancia como recurso hídrico, tanto para comunidades como para grandes industrias. En el caso del consumo humano es una de las fuentes más importantes de obtención del recurso para numerosas comunidades.

Además, la alta demanda del sector agrícola alcanza un 73% del uso de agua total nacional, con lo que se abastece una superficie regada de 1,1 millones de hectáreas entre las regiones de Coquimbo a Los Lagos, siendo el sector norte donde este recurso cobra mayor importancia debido a las bajas tasas de precipitaciones (Santibañez, 2017).

En muchas regiones del país los derechos de aprovechamiento de agua existentes superan la disponibilidad real del recurso, llevando a declarar numerosas regiones como agotadas tanto en sus aguas superficiales como subterráneas (Santibañez, 2017), por lo tanto, se trata de un bien escaso y de alta demanda. Además, el agua subterránea es un recurso vulnerable y no renovable en caso de ser sobreexplotado o contaminado, es por esta razón que surge la importancia de su uso responsable y sostenible.

Dada la escasez del recurso, para proyectos o actividades con potenciales efectos de descenso de nivel o disponibilidad hídrica de un acuífero, es necesario efectuar estudios hidrogeológicos para controlar tanto la explotación de aguas subterráneas como la circulación de fluidos contaminantes, entre varios otros motivos, con el fin de cuantificar y evaluar los potenciales efectos sobre el acuífero y sus ecosistemas asociados (SEA, 2012).

Estos estudios se realizan mediante la construcción de modelos hidrogeológicos, los que son una herramienta que proporcionan una estructura para sistematizar la información de campo, pudiendo responder preguntas del funcionamiento del acuífero, ofreciendo un camino para avanzar en el entendimiento de sistemas acuíferos (Betancur y Palacio, 2009).

La modelación numérica permite cuantificar y evaluar los potenciales efectos de un proyecto o actividad. La finalidad de estos modelos es entender y reproducir el comportamiento actual y, en base a esto, predecir el comportamiento futuro del acuífero de interés.

Los modelos hidrogeológicos constan, en primera instancia, de un modelo conceptual que permita describir el funcionamiento del sistema de agua subterránea y, en segunda instancia, de un modelo numérico que sirve de herramienta para realizar predicciones de cómo responderá el sistema ante diferentes situaciones futuras.

Si bien la herramienta numérica ha sido ampliamente utilizada durante el tiempo, se debe tener en cuenta que la modelación de aguas subterráneas es un tema complejo, que puede ser abordado con distintos grados de profundidad y utilizando diversos enfoques y

metodologías, y que los resultados que se obtienen pueden ser significativamente diferentes dependiendo de la forma en que se desarrolle la modelación (SEA, 2012).

Se debe tener en consideración, además, que la construcción de un modelo numérico corresponde a una simplificación de la realidad y no refleja completamente la naturaleza del acuífero, debido a la heterogeneidad inherente de los acuíferos y las incertidumbres asociadas a la estimación de los parámetros tanto químicos, físicos e hidrogeológicos, lo cual torna el proceso de modelación una tarea compleja (Baalousha, 2003). No obstante, un modelo lo suficientemente robusto debe ser capaz de describir y reproducir los procesos esenciales de recarga y descarga del sistema subterráneo, a fin de que sea válida su utilización.

Asimismo, los modelos conceptuales se construyen de una fuente de información generalmente incompleta, por lo que frecuentemente puede surgir nueva información capaz de invalidar uno o más supuestos del modelo previamente definido. La escasez de datos empíricos indica que la invalidación ocurre en 20-30% de los análisis realizados a los modelos (Bredehoeft, 2005).

Además, basado en la información disponible y en la no-linealidad de las ecuaciones que definen el flujo subterráneo, es que se suele incurrir en problemas de no unicidad, es decir, que suelen existir distintos conjuntos de valores de parámetros hidrogeológicos asociados a zonas que entregan un nivel de ajuste similar durante el proceso de calibración. De esto se desprende que exista una incertidumbre asociada a los parámetros hidrogeológicos calibrados que resultan representativos a las unidades hidrogeológicas y su heterogeneidad real en el sistema subterráneo.

El objetivo del presente trabajo de título consiste en realizar una evaluación de la importancia del análisis de la incertidumbre predictiva asociada a los modelos hidrogeológicos, adjudicando especial énfasis en aquella relacionada a los parámetros hidrogeológicos.

Para este fin, se evaluará la incertidumbre, a través de la comparación de resultados de diferentes calibraciones de un modelo numérico, los cuales presentan distintos valores de conductividad hidráulica y rendimiento específico, dentro de un rango conceptual y numéricamente factible.

Mediante esta exploración, se podrá evaluar el efecto sobre la variación en los niveles y cantidad de agua que modelan en un acuífero específico, esperando que los resultados obtenidos con cada combinación de parámetros presenten variaciones entre ellos.

En la medida que los resultados obtenidos tengan una alta variabilidad y que ésta tenga impacto en la toma de decisiones dentro de la disponibilidad de agua de un acuífero, se corrobora la importancia de la evaluación de la incertidumbre en la modelación numérica y de esta manera cuidar el recurso hídrico.

## 1.2.- Hipótesis

Considerando la incertidumbre inherente asociada a los modelos hidrogeológicos mencionada anteriormente, surge la pregunta ¿Qué relevancia posee un análisis de incertidumbre al momento de evaluar la disponibilidad futura de un acuífero?

En este trabajo de título se plantea que la importancia en el tema radica en que, un proyecto a ejecutar sobre un acuífero será evaluado de acuerdo con los resultados asociados al comportamiento del acuífero entregados por un modelo hidrogeológico. Y frecuentemente estos resultados son utilizados sin la apropiada realización de un análisis de incertidumbre, debido a que este análisis no es exigido por las autoridades en nuestro país.

La “Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA” (SEA, 2012) corresponde a la pauta en Chile dictada por las autoridades para la construcción de modelos hidrogeológicos para la evaluación de impacto ambiental, y en ésta únicamente se recomienda la realización de un análisis de incertidumbre, no es de carácter obligatorio, siendo que este análisis puede tener gran relevancia al momento de realizar otorgamientos de derechos de agua en una cuenca y de predecir efectos en áreas de interés ambiental, debido a las variaciones que pueden presentar los resultados.

Es por ello, que la presente hipótesis de trabajo apunta a demostrar la importancia que posee este análisis en la modelación, a partir de un caso de estudio, en el cual se analizarán las variaciones obtenidas en los resultados simulados a partir de combinaciones de parámetros calibrados, pretendiendo encontrar una alta variación en los resultados, lo que se traduce en una alta incertidumbre y la necesidad de un análisis asociada a la misma.

## 1.3.- Objetivo general

Dada la variabilidad de valores de conductividad hidráulica y rendimiento específico, el objetivo general de este trabajo consiste en evaluar la importancia de un análisis de incertidumbre paramétrica en los resultados de simulaciones predictivas de un modelo numérico, en la cuenca del río Rapel, Región de Coquimbo.

## 1.4.- Objetivos específicos

- Identificar y definir fuentes de incertidumbre en modelos numéricos hidrogeológicos.
- Realizar un análisis de incertidumbre paramétrica a los parámetros de conductividad hidráulica y rendimiento específico en modelo previamente calibrado en zona de estudio.
- Implementar el modelo predictivo a partir del mismo modelo preexistente en zona de estudio.

- Analizar el efecto que tienen los rangos de incertidumbre de los parámetros de conductividad hidráulica y rendimiento específico sobre predicciones realizadas en dos escenarios de simulación.
- Evaluar la incertidumbre y la importancia de un análisis de incertidumbre asociado a los resultados obtenidos en el caso de estudio.

## 1.5- Metodología

La metodología a desarrollar en este informe se resume a continuación.

- **Revisión de antecedentes:** Se comienza con la revisión bibliográfica correspondiente, con la finalidad de recopilar la mayor cantidad de información disponible de modelación hidrogeológica e incertidumbre, ambos temas en los cuales está enfocado el trabajo; también se realiza una recopilación de trabajos anteriores realizados en la zona en la cual se realizará el caso de estudio.
- **Desarrollo del marco teórico:** Una vez que se obtiene la información necesaria, se procede con la realización del marco conceptual, utilizando la información disponible para definir los conceptos de interés para la comprensión de los análisis a realizar.
- **Descripción del modelo preexistente:** Se utiliza para el caso de estudio, un modelo numérico preexistente (Véliz, 2018) realizado en la cuenca del río Limarí, específicamente en la zona correspondiente a la subcuenca del río Rapel, Región de Coquimbo. Véliz realizó un modelo hidrológico e hidrogeológico combinado, en donde el segundo fue calibrado utilizando 15 series de recarga obtenidas en el modelo hidrológico, y obtuvo como resultado 15 sets de parámetros (conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento) los cuales calibran el modelo.
- **Análisis incertidumbre paramétrica modelo existente:** se realiza a los parámetros de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento, posterior a la calibración, pudiendo observar la sensibilidad de cada uno de ellos a la calibración, lo que se traduce en nuevos rangos de incertidumbre, más acotados que los rangos conceptuales utilizados previamente.
- **Simulación escenarios:** Utilizando las 15 series obtenidas en el modelo preexistente se simulan dos escenarios predictivos, para evaluar el rango posible de predicciones obtenidas y, a partir del rango de resultados, se analiza la incertidumbre asociada a la disponibilidad del recurso hídricos subterráneo.

Para el primer escenario simulado, a partir de los diversos valores de conductividad hidráulica y rendimiento específico ya obtenidos a través de la calibración con puntos de control de la cuenca, se efectúa un análisis de la variación observada en la cota hidráulica obtenida de los resultados de simulación predictiva al ingresar múltiples valores para conductividad y rendimiento específico.

Luego, para el segundo escenario, utilizando una única tasa de recarga, se analizan las variaciones experimentadas al extraer agua del acuífero a través de pozos de bombeo, asemejando una situación potencialmente real, comparando los resultados para las mismas variaciones de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento que las analizadas en el primer escenario.

- **Discusión resultados:** En este estudio los parámetros hidrogeológicos a analizar son la conductividad hidráulica y el rendimiento específico, debido a que estos son los que afectan de mayor forma a las condiciones de flujo y niveles de acuíferos libres. De la misma forma, se pretende demostrar que, aun cuando existen diversas fuentes de incertidumbre, la incertidumbre paramétrica tiene un efecto importante sobre las predicciones del comportamiento de un acuífero, lo que podrá afectar en los usos que se proponga entregar a este.

Finalmente, se discute cómo estos resultados cambian al variar los sets de parámetros y qué repercusiones tienen estas variaciones en las predicciones del modelo y en el nivel de confianza de las mismas. Y a partir de las variaciones se discute la incertidumbre asociada a la construcción de los modelos y la relevancia de un análisis de incertidumbre asociado a estos.

## 1.6.- Estructura del informe

El presente trabajo ordena sus contenidos según se indica a continuación.

En el Capítulo 2, se realiza una revisión bibliográfica que abarca los estudios anteriores relativos a la modelación hidrogeológica, incertidumbre y estudios previos realizados en la zona de estudio, indicando el contexto que motiva este informe y los conocimientos disponibles para su realización.

En el Capítulo 3, se presenta el marco conceptual asociado al trabajo con el fin de familiarizar al lector con la modelación hidrogeológica. Se definen en este capítulo los conceptos principales de la construcción de un modelo hidrogeológico. Se describen los aspectos más relevantes asociados al modelo conceptual y al modelo numérico, prosiguiendo con el concepto de parámetros hidrogeológicos.

Además, familiariza al lector con el proceso de calibración de un modelo, para finalmente explicar la simulación predictiva, la cual corresponderá el paso a realizar en el modelo utilizado en el estudio.

En el Capítulo 4, se introduce el concepto de incertidumbre, definiendo las fuentes que incrementan la incertidumbre en un modelo hidrogeológico. Se recalcan entre ellas, la incertidumbre asociada a parámetros hidrogeológicos, la cual constituye la fuente de incertidumbre a analizar en este trabajo.

En el Capítulo 5, se presentan los antecedentes para el caso de estudio realizado, los que corresponden a los datos asociados a la construcción del modelo hidrogeológico de Véliz (2018), a partir del cual se trabajará.

En el Capítulo 6, se exponen los aportes realizados al modelo en el presente trabajo, comenzando con la realización de un análisis de incertidumbre paramétrica a los parámetros ya calibrados y una evaluación del nivel de error asociado a la recarga y a los parámetros del modelo, con el fin de definir cuál de los dos genera mayor nivel de incertidumbre.

Además, se presentan las modificaciones a implementar para la realización del modelo predictivo, con el fin de ejemplificar a partir del caso de estudio, el alcance de la incertidumbre asociada a los parámetros de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento de acuífero libre en un modelo predictivo. Finalmente se simulan dos escenarios predictivos, y se presentan los resultados.

En el Capítulo 7, se realiza un análisis de los resultados obtenidos en el capítulo anterior, discutiendo y comparando las diferencias presentes de niveles y flujos simulados entre cada prueba y la importancia de analizar las diferencias obtenidas al variar los parámetros en cada serie, comprobando o refutando la hipótesis inicialmente planteada.

Por último, en el Capítulo 8, se presentan las conclusiones del trabajo, donde se esclarecen los principales aspectos logrados en el Capítulo 6 y Capítulo 7 a partir del caso de estudio, el aporte realizado a partir de este trabajo y recomendaciones a futuro para un mayor y mejor desarrollo de este.

## 2.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Para guiar el presente trabajo y contextualizar la investigación, se presenta la realización de una revisión bibliográfica con la principal información disponible respecto a los temas a tratar. Esta se enfoca en la recopilación de los principales autores de los siguientes temas.

### 2.1.- Modelación hidrogeológica

Custodio y Llamas (2001) “Hidrología Subterránea”, contiene una amplia gama de conocimiento hidrogeológico, principalmente útiles en este trabajo se encuentra el contenido relacionado a los conceptos básicos relacionados a los acuíferos (definiciones, parámetros, etc.) y el contenido relacionado a los modelos hidrogeológicos, donde se explica los procesos que se requieren para la construcción de un modelo.

Freeze y Cherry (1979) “Groundwater”, corresponde a un libro que abarca los conceptos esenciales en el campo de la hidrogeología, de donde se obtienen definiciones importantes tales como, la conductividad hidráulica, el almacenamiento específico y conceptos generales para la comprensión del medio subterráneo.

Anderson, Woessner y Hunt (2015) “Applied Groundwater Modeling”, consiste en una guía de modelación hidrogeológica, en donde se definen los procesos asociados a la modelación, abarcando desde los fundamentos básicos de la modelación, la construcción de un modelo conceptual y numérico, la calibración de un modelo y el análisis de incertidumbre, con la finalidad de generar conocimientos para la construcción de modelos hidrogeológicos. Maliva (2016) “Acuifer Characterization Techniques” describe las técnicas de caracterización de acuíferos, las cuales son utilizadas para desarrollar modelos. Se rescata de esta referencia la explicación para el desarrollo de los modelos numéricos de agua subterránea. Describe en detalle los pasos principales a seguir para la construcción de uno de estos modelos, desde la generación de un objetivo, la construcción de un modelo conceptual, la elección de un código de modelación, el diseño y parametrización del modelo, la calibración y análisis de sensibilidad seguidos de la verificación y validación del modelo, hasta la modelación predictiva.

Servicio de Evaluación Ambiental (2012) “Guía para el uso de modelos de agua subterráneas en el SEIA”, tiene como objetivo entregar los contenidos mínimos que deben acompañar a una modelación hidrogeológica, de manera que entregue la información relevante y suficiente para una evaluación de impacto ambiental. También pretende entregar criterios útiles para la elaboración de un modelo en cada una de sus etapas, con el fin principal de mejorar la calidad de los modelos desarrollados en los proyectos.

En Chile esta guía es ampliamente utilizada por todo tipo de industria que presenta un estudio hidrogeológico al sistema de evaluación y por el mismo sistema de evaluación para

la revisión de dichos estudios. En base a ella se define si un estudio es suficiente o no para la predicción de impactos.

## 2.2.- Incertidumbre en modelos numéricos hidrogeológicos

Doherty (2015) “Calibrations and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models”, corresponde a uno de los libros más relevantes en el tema de PEST. En él se describe la teoría de PEST, concepto que se refiere a la estimación de parámetros, con las implicancias que tiene en la modelación. De este libro se obtienen los conocimientos necesarios para llevar a cabo el análisis de incertidumbre paramétrica.

Husam Musa Baalousha (2003) “Risk assessment and uncertainty analysis in groundwater modelling”, reconoce y profundiza acerca de la incertidumbre en la modelación, específicamente aquella asociada a parámetros, cuestionándose el efecto de ésta en la precisión de los resultados. Dentro de este tema, reconoce la recarga y la conductividad hidráulica como las variables con mayor grado de incertidumbre y con mayor dificultad de determinar.

JiChun Wu y Xian Kui Zeng (2003) “Review of the uncertainty analysis of groundwater numerical simulation”, definen y describen las diversas fuentes de incertidumbre a considerar en los modelos hidrogeológicos, al igual que mencionan y definen los métodos utilizados para la disminución de esta misma.

## 2.3.- Trabajos anteriores en la zona de estudio

Esteban Véliz (2018) “Confección de un modelo integrado con análisis de la recarga: aplicación en la subcuenca del Río Rapel, IV Región”, corresponde a la tesis de pregrado del autor y se enfoca en la confección de un modelo hidrológico e hidrogeológico integrado. En el modelo hidrológico se generan diversas series de recarga posibles, específicamente 15 series, que se ingresan luego al modelo hidrogeológico y mediante la calibración se determinan valores de conductividad hidráulica y rendimiento específico para cada recarga. Se obtienen finalmente 15 combinaciones, cada una de las cuales presentan una recarga asociada y un set de parámetros calibrado.

CAZALAC<sup>1</sup> con la asesoría de Rhodos Asesorías y Proyectos Ltda (2006) “Aplicación de metodologías para determinar la eficiencia del uso del agua. Estudio de caso en la región de Coquimbo”, se realiza un modelo hidrogeológico en tres macrocuencas: Elqui, Limarí y Choapa, aplicando metodologías para determinar la eficiencia del uso de agua de la

---

<sup>1</sup> Centro del Agua para Zonas Áridas de Latinoamérica y el Caribe

región de Coquimbo, debido a la alta demanda del recurso en la región mencionada. De este estudio se utilizan los datos obtenidos para la cuenca Elqui, específicamente el sector del río Rapel, como antecedente para la realización del modelo de Véliz, y como respaldo al estudio a realizar a continuación.

Germán Pineda y Mauricio Calderón (2008) “Carta Geológica del Área Monte Patria-El Maqui”, realizan la carta Geológica de Monte Patria-El Maqui publicada por el servicio nacional de geología, para definir la geología de la zona de estudio. En esta se describen las unidades geológicas presente en el lugar en una escala de 1:100.000, y será de gran utilidad al momento de realizar la descripción de los cuerpos cuaternarios y la roca impermeable que definen el acuífero a estudiar.

### 3.- MARCO CONCEPTUAL

Los modelos son utilizados para pronosticar un amplio rango de fenómenos de interés humano, tales como terremotos, erupciones volcánicas, deslizamientos de tierra, inundaciones, el movimiento de las aguas subterráneas y sus contaminantes, erosión, etc. (Oreskes y Bokulich, 2017).

El foco principal de este estudio corresponde a la incertidumbre asociada a los modelos construidos para pronosticar movimientos de agua subterránea, específicamente las simulaciones predictivas a partir de modelos numéricos hidrogeológicos, para lo cual, se debe comenzar con la definición de conceptos básicos, desde la comprensión de un modelo hidrogeológico junto con los pasos que se requieren para su realización.

A grandes rasgos, un modelo hidrogeológico consta, en primer lugar, de un modelo conceptual que permita la descripción del funcionamiento del sistema de agua subterránea y, en segunda instancia, de la construcción de un modelo numérico que sea capaz de reproducir el balance hídrico y dinámica del movimiento del agua subterránea establecidos en el modelo conceptual.

Para esto, se requiere, identificar que un acuífero es un sistema abierto que intercambia materia y energía con el entorno, y este se debe estudiar en exploraciones hidrogeológicas en terreno. Luego, los resultados de la exploración hidrogeológica básica en una zona determinada son plasmados en el modelo conceptual (Betancur y Palacio, 2009).

En segundo lugar, consta de un modelo numérico, para el cual se requiere de la elección de un código de modelación y la discretización del modelo conceptual a celdas numéricas, con un set de parámetros asignados a cada celda o nodo (Maliva, 2016) y, a partir de las celdas discretizadas, los valores de los parámetros ingresados en primera instancia serán calibrados, facultando al modelo su uso como herramienta para realizar predicciones de las condiciones de niveles y flujos del sistema, mediante la simulación de diferentes escenarios de estrés aplicados al sistema.

A continuación, se presenta un diagrama general del proceso de elaboración de un modelo hidrogeológicos, con los principales pasos a realizar (Figura 1). Luego se procederá a entregar definiciones relevantes para la comprensión y contextualización del presente trabajo.

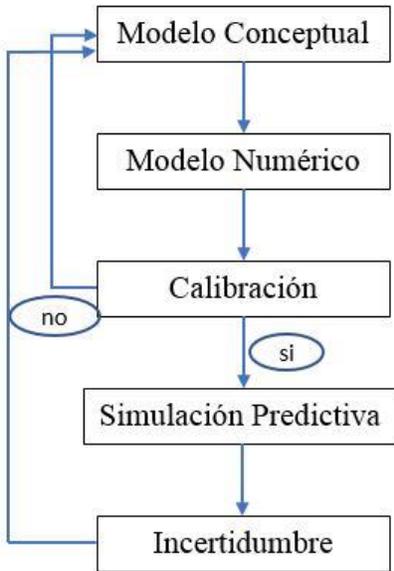


Figura 1. Diagrama general de la construcción de un modelo hidrogeológico. Elaboración propia.

### 3.1.- Modelo conceptual

#### 3.1.1.- Definición

El modelo conceptual se define como una representación ilustrativa simplificada de un sistema real, la idea básica o construcción, del cual se conocen un número puntual de datos (Custodio y Llamas, 2001).

Históricamente científicos han utilizado modelos conceptuales para explicarse fenómenos que, debido a su escala espacial o temporal, tienen un alto grado de complejidad. Uno de los modelos conceptuales geológicos históricos con mayor importancia corresponde al “Ciclo de Erosión”, elaborado por William Morris Davis (1850-1935), con el cual se establece un marco de reflexión en relación a la modelación en geomorfología. Más detalles de este modelo en “The Geographical Cycle” (Davis, 1899).

Este trabajo se enfoca en los modelos hidrogeológicos, los cuales requieren de un estudio hidrogeológico, y como parte fundamental de este estudio, se debe construir un modelo conceptual de la zona a estudiar, el cual permite describir, en forma simplificada, el funcionamiento del sistema de agua subterránea.

Un modelo conceptual corresponde a una síntesis de la información conocida y en general, mientras más cercano sea a la realidad de terreno, es más probable que el modelo numérico genere mejores simulaciones. El nivel de detalle del modelo conceptual está dado por el propósito de la modelación, la información disponible y los límites prácticos

de agregar complejidad al modelo numérico (Anderson et al., 2015). La validez de esta simplificación depende del objetivo que se pretende conseguir con el modelo (Custodio y Llamas, 2001).

Entre la información principal que contiene un modelo conceptual se encuentra la caracterización geológica, catastros de información disponible de pozos y sondajes, definición de unidades hidrogeológicas, rangos de parámetros hidrogeológicos, fuentes y razones de carga y descarga, direcciones de flujo esperadas, heterogeneidad del acuífero, entre otros puntos.

Debido a su esencia simplificadora, los modelos conceptuales tienden a acarrear algún grado de incertidumbre, debido a que los datos de terreno en los que se basa siempre están incompletos y proveen únicamente una descripción aproximada de las verdaderas condiciones hidrogeológicas (Anderson et al., 2015).

La incertidumbre asociada al modelo conceptual será de importancia o poco relevante dependiendo de la cantidad de datos que se posean y de la finalidad del estudio. Aun así, se debe tener en consideración en el análisis de incertidumbre, debido a que la incertidumbre asociada a la base del modelo conceptual puede contribuir a la incertidumbre predictiva final (Sepúlveda y Doherty, 2015).

Los modelos conceptuales pueden ser realizados como un producto final o como un paso preliminar en el proceso de crear un modelo matemático (Oreskes y Bokulich, 2017).

### 3.1.2.- Elaboración de un modelo conceptual hidrogeológico

La elaboración de un modelo conceptual requiere de una exhaustiva revisión bibliográfica, labores de terreno y estudios básicos, lo que servirá de sustento técnico para definir las condiciones hidrogeológicas del modelo numérico y determinarán la precisión y capacidad predictiva del mismo. Un modelo numérico depende fuertemente de la conceptualización a partir de la cual fue originado, por lo tanto, mientras más robusto sea el modelo conceptual, los resultados de las simulaciones tendrán asociados una mayor credibilidad (SEA, 2012).

Un modelo conceptual consta de la compilación e interpretación de los resultados generados a partir de la información oficial y estudios geológicos, hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e hidrológicos, que en conjunto aportan diversa información para la construcción de tal modelo (SEA, 2012).

Se requiere que exista una serie de aspectos básicos que el modelo permita esclarecer, entre ellas la geometría de las unidades hidrogeológicas presentes en el acuífero y sus propiedades hidráulicas correspondientes, tales como, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y porosidad, los mecanismos de carga y descarga del sistema y el establecimiento de un balance hídrico preliminar (SEA, 2012).

Respecto de los parámetros hidráulicos a definir en el modelo, se debe cuidar que exista consistencia entre estos, el tipo litológico presente en la unidad hidrogeológica, y las

unidades geológicas descritas. Se debe establecer un rango teórico para cada unidad hidrogeológica, dentro del cual el valor del parámetro puede fluctuar. Este rango debe basarse en el conjunto de valores derivados de las pruebas y ensayos de terreno y los valores teóricos presentes en la literatura (SEA, 2012).

Los diversos mecanismos de recarga y descarga presentes en el modelo deben identificarse correctamente cuantificando todos aquellos que sean relevantes, junto con su rango de posible variación, ya que corresponden a los términos más relevantes y con mayor incertidumbre utilizado para establecer el balance hídrico, el cual corresponde a una parte indispensable en la construcción del modelo (SEA, 2012).

Por último, es necesario tener en consideración que, el modelo conceptual realizado está sujeto a modificaciones, incluso puede cambiar dramáticamente a medida que la cantidad de información disponible varía, siendo necesario en muchos de los casos, la construcción de más de un único modelo conceptual, residiendo finalmente, en el hidrogeólogo encargado de su construcción realizar una decisión subjetiva respecto al modelo a utilizar (Bredehoeft, 2005). Esta elección debiese ser realizada una vez analizados y comparados los resultados obtenidos a partir del modelo numérico correspondiente a cada modelo conceptual.

## 3.2.- Modelo numérico

### 3.2.1.- Definición

Los modelos numéricos corresponden a modelos matemáticos que representan sistemas naturales y sus interacciones a través de un sistema de ecuaciones. Usualmente son implementados en una simulación computarizada que exhibe el comportamiento del modelo para un extenso periodo de tiempo, expandiendo las metas de las geociencias para incluir pronósticos y predicción al mismo tiempo que explicaciones (Oreskes y Bokulich, 2017).

El modelo numérico se construye para validar o refutar, a través de la calibración, el modelo conceptual planteado anteriormente. Si el modelo conceptual es refutado se debe volver a plantear, por lo tanto, el proceso de modelación se entiende como un proceso iterativo, tal como se presenta en la Figura 1.

En el modelo numérico se representa la información contenida en el modelo conceptual realizando una discretización del área y tiempo del estudio, a través de sistemas de ecuaciones. A partir de estas ecuaciones, con un método matemático, se simula el comportamiento del modelo en un periodo extendido de tiempo, permitiendo a los científicos la utilización de los modelos no solo para explicar fenómenos, sino también para pronosticarlos (Oreskes y Bokulich, 2017).

Los atributos básicos que se deben definir en un modelo numérico hidrogeológico consisten en la definición de las condiciones de borde, condiciones iniciales, límites y geometría del área, definición del nivel de detalle de la discretización, tipo de modelo

(régimen permanente o transiente) y atributos en relación con el tiempo, tasas de recarga y otros flujos de entrada/salida, asignación de parámetros del modelo y selección de pozos de observación y series de datos asociados (SEA, 2012).

### 3.2.2.- Elaboración de un modelo numérico

El modelo requiere, en primer lugar, de la definición de los límites del acuífero, formando un sub-dominio de modelación, correspondiente a una zona activa en donde ocurrirán los procesos a analizar. Los límites de esta se distinguen en tres categorías correspondientes a los límites superiores, inferiores y laterales, los cuales deben ser representados por condiciones de borde. En el caso del límite superior, este coincide normalmente con el nivel de superficie del terreno, a excepción de los acuíferos confinados. El límite inferior y los contactos laterales se definen usualmente siguiendo los contactos roca-relleno, que representan una condición de no flujo (SEA, 2012).

En segundo lugar, se debe considerar el intervalo de tiempo de la modelación, el cual cambia según los objetivos de ésta y de los fenómenos que se desean representar, dependiendo de factores tales como la extensión temporal del modelo, el tiempo puede ser representado en escala diaria, semanal, mensual, etc. (SEA, 2012).

En tercer lugar, se requiere definir las condiciones de borde y condiciones iniciales del modelo, la primera con el fin de establecer límites físicos del dominio de modelación y fijar aspectos claves que inciden en el comportamiento de éste y, la segunda, para establecer un punto de partida en el caso de los modelos transientes (Anderson et al., 2015).

Finalmente, se necesita asignar una recarga y valores de parámetros a las unidades hidrogeológicas identificadas en el modelo. La recarga es obtenida a partir de estudios hidrológicos o hidrogeológicos en la zona, cuantificándola de acuerdo con el tiempo y el espacio. Los parámetros se obtienen del rango asignado en el modelo conceptual, siendo preferible ingresar al modelo numérico los valores medios dentro del rango de variación asignado, los que posteriormente se variarán en la etapa de calibración (SEA, 2012).

### 3.3.- Unidades hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas apuntan a caracterizar o conceptualizar el comportamiento hidrogeológico del sistema (SEA, 2012). Estas son definidas en base al estudio geológico de la zona, por lo que a medida que se tenga un mayor conocimiento geológico, se tendrá una mejor definición de la hidrogeología de la zona a estudiar.

Estas unidades son definidas al momento de crear el modelo conceptual, y se encuentran presentes en la discretización a realizar en el modelo numérico, como unidades representativas de ciertos parámetros hidráulicos, por lo que es trascendental realizar una buena interpretación para una buena caracterización de estas.

Las unidades hidrogeológicas deben incluir el tipo litológico y su relación con las unidades geológicas previamente descritas, por lo que deben considerar su disposición estratigráfica, geometría y relaciones de contacto, junto con sus principales características hidráulicas como lo son la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento y porosidad. Las unidades hidrogeológicas pueden o no incluir una o más unidad geológica y, por otro lado, las unidades geológicas pueden incluir una o más unidades hidrogeológicas (SEA, 2012).

### 3.4.- Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos relevantes a ser considerados en la construcción de un modelo son: la porosidad, rendimiento específico, la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento. Este análisis se enfocará en los definidos a continuación.

#### 3.3.1.- Conductividad hidráulica ( $K$ )

La conductividad hidráulica corresponde a una propiedad extrínseca de la roca o sedimento que depende de las propiedades del fluido y del medio. En medios subterráneos (acuíferos), se utiliza generalmente la conductividad hidráulica, en lugar de la permeabilidad, para cuantificar la habilidad de un material para conducir agua a través de los espacios vacíos del medio (Maliva, 2016), por lo que depende de las propiedades de la matriz y del fluido (Bear y Verruijt, 1987) y es cuantificada en unidades de distancia por tiempo ( $m/d$ ;  $m/s$ ; etc.).

Las propiedades importantes del fluido son la densidad ( $\rho$ ) y la viscosidad ( $\mu$ ) y las propiedades a considerar de la matriz corresponden al tamaño de grano (o de poro), distribución de tamaño, forma de grano, tortuosidad, superficie específica y porosidad (Bear y Verruijt, 1987). La conductividad hidráulica  $K$  puede ser expresada como:

$$K = k\rho g/\mu = kg/v$$

Donde:

- $g$  es la aceleración de gravedad.
- $v$  es la viscosidad cinemática (combinación entre la densidad y la viscosidad).
- $k$  es la permeabilidad del medio poroso, que depende únicamente de las propiedades de la matriz sólida.

El valor teórico de este parámetro hidrogeológico puede variar dentro de un rango de varios órdenes de magnitud, por lo que se deben realizar mediciones a través de ensayos hidráulicos y pruebas de bombeo en el lugar de interés. Los valores de conductividad obtenidos en estas pruebas entregan información relevante que permite acotar el rango de variación, para así obtener de manera más eficiente un rango de parámetros que ayuden en la calibración del modelo numérico.

Los valores de conductividad que se obtienen de terreno corresponden a la conductividad hidráulica horizontal, debido a que es la dirección de mayor flujo de agua. Comúnmente la conductividad hidráulica vertical es significativamente menor, por lo que se adopta como un porcentaje de la conductividad horizontal (generalmente un 10%), lo que se justifica por la estratificación horizontal natural con la que habitualmente se forman los suelos. Por lo tanto, este criterio es aceptado en caso de que no se tenga un conocimiento más detallado del sistema del acuífero, pero se debe tener presente que no es siempre efectiva (SEA, 2012).

### 3.3.2.- Coeficiente de almacenamiento ( $S$ )

El coeficiente de almacenamiento de un acuífero se define como el volumen de agua que un acuífero es capaz de liberar o almacenar por unidad de área del acuífero por unidad piezométrica (Heath, 1987). El coeficiente de almacenamiento es una unidad adimensional.

$$S = S_y + hS_s$$

Donde:

- $S$  es el coeficiente de almacenamiento.
- $S_y$  es el rendimiento específico.
- $h$  es el espesor saturado.
- $S_s$  es el coeficiente de almacenamiento específico.

En caso de los acuíferos no confinados, se tiene que  $S_y \gg hS_s$  y en consecuencia  $S \sim S_y$ .

El rendimiento específico se define como la cantidad de agua promedio que drena por gravedad ( $V_d$ ) desde un volumen de suelo ( $V_{total}$ ) inicialmente saturado (Bear, 1972).

$$S_y = \frac{V_d}{V_{total}}$$

Hidrogeólogos separan el agua almacenada en el subsuelo entre la fracción que puede ser drenada bajo la influencia de la gravedad (rendimiento específico) y la fracción que es retenida a modo de membrana en la superficie de las rocas o en pequeñas aberturas de la roca (retención específica) (Heath, 1987).

Al igual que la conductividad hidráulica, este parámetro se mide a través de ensayos hidráulicos y pruebas de bombeo y consta de un nivel de incertidumbre importante.

### 3.5.- Parametrización

Al momento de construir el modelo numérico, se debe discretizar el área, lo que implica asignar valores de parámetros hidráulicos a cada celda del modelo, pero comúnmente, los datos disponibles de estos parámetros corresponden a una fracción muy pequeña de la extensión total del modelo.

Al momento de realizar la parametrización, se da comúnmente la situación en la cual muchos sets de parámetros logran proveer ajustes satisfactorios al modelo, algunos de estos sets pueden corresponder a valores muy distintos de los parámetros reales esperables dependiendo de la sensibilidad de los mismos y, por lo tanto, pueden guiar a predicciones erróneas del comportamiento futuro del reservorio.

Debido a la no-unicidad observable en la parametrización, es que se produce incertidumbre en cuanto al set de parámetros más adecuado para representar el medio subterráneo, capaz de lograr una mejor reproducción de los parámetros reales. En el caso práctico presentado más adelante se presentará esta problemática, discutiendo soluciones para disminuir la incertidumbre.

Además, en este escenario se debe tener en consideración que un modelo con mayor grado de detalle no necesariamente corresponde a un mejor modelo, debido a que, al aumentar el grado de detalle, aumenta el número de variables, lo que implica un aumento en el número de posibles soluciones, generando un mayor grado de incertidumbre y adicionalmente, incrementando la cantidad de información lo que puede derivar en un problema de sobre parametrización, aumentando el número de parámetros independientes que se ingresan al sistema (Doherty, 2015).

Por otro lado, una parametrización muy simplificada cae en el inconveniente de generar un modelo muy simple sin suficientes datos, con el cual no se obtendrán los resultados esperados (Kitanidis, 1997).

El objetivo de la parametrización es encontrar un punto medio en donde la calibración de los parámetros provea suficiente flexibilidad tal que, se logre extraer la máxima cantidad de información de los puntos de calibración y reducción del error estructural, y que los parámetros no sean tan numerosos para confundir o perjudicar la calibración (Anderson et al., 2015). Encontrar este punto medio es parte del arte de modelar y continúa en discusión.

La parametrización consiste en la simplificación del espacio a estudiar a través de diversos métodos de discretización espacial y a continuación, se definirán los dos métodos principales utilizados para este fin.

#### 3.4.1.- Zonación

Este método utiliza la subdivisión del dominio del modelo numérico en sub-zonas a las cuales se les asigna un valor constante y representativo único para cada parámetro hidrogeológico. En modelos de agua subterránea, se suele dividir el dominio en un

pequeño número de zonas con parámetros de valor uniforme (Maliva, 2016) consistentes con las unidades hidrogeológicas definidas.

Corresponde a un método para disminuir la cantidad de parámetros a calibrar, ya que, como ya se mencionó, a cada sub-zona se le asigna un parámetro con valor uniforme, y al ajustar el parámetro en la calibración de la sub-zona, se ajusta el parámetro en todos los nodos de manera simultánea (Anderson et al., 2015).

A pesar de que existen distintos enfoques para representar la heterogeneidad de las unidades hidrogeológicas contenidas en los modelos numéricos, ésta es una de las más utilizadas, y será la que se usará en el caso de estudio presentado en el capítulo 5. Es considerado un método común para reducir el número de parámetros independientes y lograr una buena parametrización del sistema.

Pero se debe tener cuidado al momento de definir la cantidad de zonas impuestas para simplificar el sistema ya que, si el nivel de simplificación impuesto por el modelador degrada el funcionamiento del modelo de manera inaceptable, el modelo es considerado sobre simplificado y no entregará los resultados deseados (Anderson et al., 2015)

#### 3.4.2.- Puntos pilotos

Corresponde a un método desarrollado inicialmente por Marsily (1978). El concepto básico de los puntos pilotos consiste en la asignación de valores de parámetros hidráulicos a un set de puntos en el espacio distribuidos en el dominio del modelo, para luego estos ser calibrados en un paso posterior de la modelación. Los puntos pilotos asignan valores al resto del espacio a modelar a través de interpolación espacial (Anderson et al., 2015) y a diferencia del método de zonación, se obtiene una variación suave y gradual de los parámetros entre cada celda del modelo.

Según Kaludjerovic (2018) los puntos piloto constituyen una versión mejorada del método de zonación. Aunque se continúa utilizando el método de zonación con mayor frecuencia, debido a las dificultades aún encontradas al momento de configurar los puntos piloto al parametrizar.

Numerosos estudios se están realizando actualmente para mejorar los resultados obtenidos con los puntos pilotos, entre ellos Klass y Imteaz (2017), quienes en su estudio realizan pruebas con puntos pilotos en una captación kárstica con el fin de encontrar una relación entre la cantidad de puntos pilotos, la distancia entre ellos y la calidad de los resultados.

#### 3.6.- Calibración del modelo

Luego de la construcción de los modelos numéricos se continúa con el proceso de calibración, que consiste básicamente en la obtención de un set de parámetros hidrogeológicos representativos para cada sub-zona que logre un buen grado de ajuste

entre los valores de cota hidráulica observada en puntos de control (pozos ubicados en el acuífero) y los valores de niveles obtenidos por medio del modelo numérico, junto con verificar que se cumplan otros aspectos impuestos en el modelo conceptual tales como balance de aguas, tasa de recarga, bombeos calculados, entre otros puntos.

Este proceso consiste en simular un periodo histórico y comprobar si los niveles obtenidos con el modelo para este conjunto de datos se ajustan de forma aceptable a los niveles observados. En general, no ocurrirá así, por lo cual será preciso modificar los datos de partida hasta conseguir que las diferencias entre los niveles históricos y calculados sean adecuadas para la precisión requerida por el problema tratado (Custodio y Llamas, 2001).

Se debe considerar que involucrar un gran número de parámetros en la calibración contribuye al problema de no unicidad, que indica que no se puede definir objetivamente el mejor modelo porque todos los esfuerzos de modelación hidrogeológica basados en el terreno, usan sets de datos incompletos y con un grado de error. Siempre habrá un número de modelos posibles que podrán simular razonablemente lo que conocemos del sistema real (Anderson et al., 2015).

Por lo tanto, la selección de un modelo que es considerado la mejor representación de la realidad siempre será subjetiva. Hay casos en los cuales un modelo con mayor grado de complejidad puede proveer una mejor simulación que uno con menor grado de complejidad, siempre que se le puedan asignar valores representativos a todos los parámetros del área a estudiar (Doherty y Hunt, 2009).

De acuerdo con la “Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA” (SEA, 2012), los parámetros que frecuentemente se utilizan para calibrar un modelo de flujo corresponden a la conductividad hidráulica, rendimiento específico, distribución de las tasas de recarga superficial junto con los caudales de recarga lateral y parámetros que rigen el funcionamiento de las condiciones de borde.

Existen dos enfoques a partir de los cuales se puede calibrar: calibración manual (mediante prueba y error) y calibración automática (mediante algoritmos de modelación inversa). En la Figura 2 se muestra un diagrama de la calibración por prueba y error que resume los pasos básicos para calibrar un modelo.

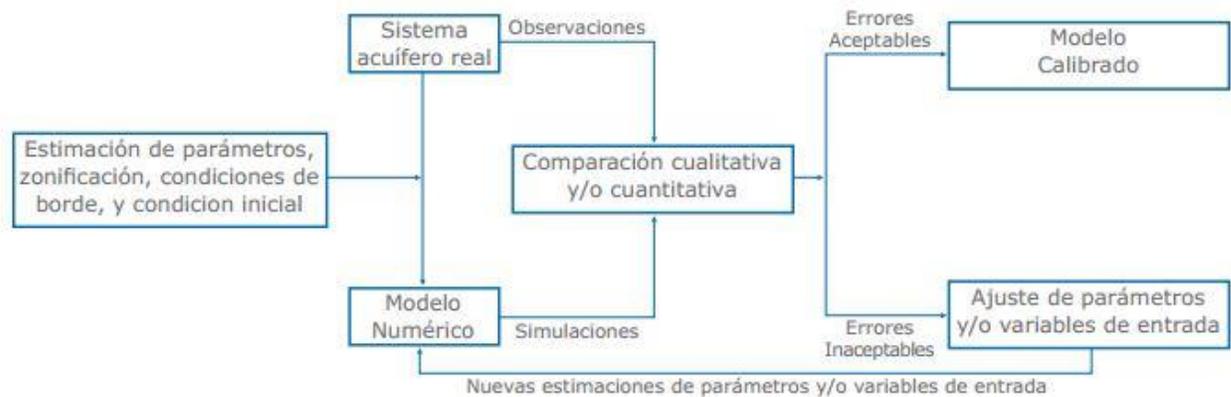


Figura 2. Diagrama resumen método de calibración por prueba y error. (SEA, 2012)

Finalmente, un modelo es declarado “bien calibrado” cuando ha sido provisto con un set de parámetros para los cuales los resultados del modelo igualan las mediciones del sistema razonablemente bien. Sin embargo, esto no nos dice nada sobre si existe otro set de parámetros diferente igualmente válido que también permita al modelo igualar las mediciones del sistema razonablemente bien (Doherty, 2015).

### 3.7.- Análisis de incertidumbre paramétrica

El análisis de incertidumbre es realizado posteriormente a la calibración, con la finalidad evaluar la variación de los resultados del modelo producto del cambio de un parámetro. Puede ser utilizado para definir cuáles son aquellos parámetros con mayor incidencia en los resultados. Comúnmente los parámetros a utilizar son las constantes elásticas, conductividades, coeficientes asociados a los mecanismos de transporte, variables de entrada, etc. (SEA,2012).

La metodología para llevar a cabo un análisis de incertidumbre corresponde a elegir uno o más parámetros y asociarles un rango realista de variación (rango conceptual), para luego correr el modelo repetidas veces variando cada parámetro y analizando su efecto en los resultados de la modelación (SEA, 2012), buscando como objetivo acotar el rango asociado al parámetro elegido.

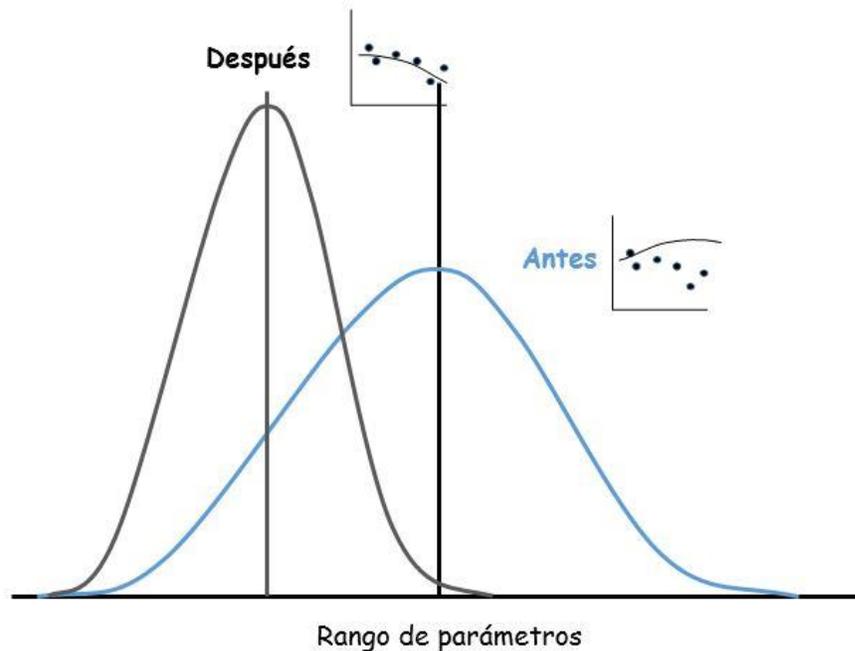


Figura 3. Diagrama campana de Gauss antes de la calibración, y campana de Gauss posterior a la calibración obtenida a través del análisis de incertidumbre (Doherty, 2015).

En la Figura 3 se observa la campana de Gauss asociada a este análisis. En esta se compara en el Eje X el rango en que se puede mover el parámetro a analizar y en el Eje Y la probabilidad asociada a cada valor que puede presentar el parámetro.

La curva presentada en azul muestra la probabilidad de un parámetro cualquiera antes de la calibración, en donde se ve un amplio rango posible, definida según el rango conceptual del parámetro analizado, con una probabilidad asociada ampliamente distribuida entre ellos. En cambio, la curva presentada en negro muestra la probabilidad posterior a la calibración, presentando un rango de parámetros más acotado, y una probabilidad asociada a cada valor que presenta una notoria preferencia hacia los valores centrales.

Por lo tanto, si un parámetro es sensible a la calibración, la campana de Gauss posterior a la calibración se acotará notoriamente, presentando un rango de parámetros acotado, y, si el parámetro es poco sensible a la calibración, la campana de Gauss asociada a este mantendrá un rango muy similar al rango conceptual, presentando un rango de valores amplio. Esto implica que incluso después de realizada la calibración, para cualquier valor impuesto a este parámetro dentro del rango conceptual, no variará significativamente los resultados del modelo.

Este análisis puede ser realizado a través del programa PEST, el que corresponde a un software que se basa en algoritmos de modelación inversa y se utiliza para realizar el análisis de incertidumbre al modelo previamente calibrado por Véliz.

Las ventajas de este software es que gran parte de su funcionalidad viene incluida en el programa de Groundwater Vistas, por lo que los archivos que utiliza pueden ser creados a

partir de este programa o de manera externa, a partir de los cuales se utilizará en este caso, la fórmula siguiente:

$$C'(k) = C(k) - C(k)Z^t[ZC(k)Z^t + C(\varepsilon)]^{-1}ZC(k)$$

Dónde:

- $C'(k)$  corresponde a la matriz de covarianza posterior de los parámetros
- $C(k)$  corresponde a la matriz de covarianza previa
- $C(\varepsilon)$  es el ruido asociado a las mediciones
- $Z$  es una matriz de sensibilidad
- $k$  corresponde a los parámetros

Debido a la complejidad asociada a los cálculos realizados por PEST, no se ahondará en detalles respecto a su ejecución. Si se desea más información, consultar “Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models” (Doherty, 2015).

### 3.8.- Simulación predictiva

La mayoría de los modelos no se construyen únicamente con la finalidad de estimar las propiedades del sistema. Si no que, son construidos para realizar predicciones futuras del comportamiento ambiental bajo regímenes de estrés similares o alterados a aquellos predominantes en el momento de la calibración (Doherty, 2015).

Los datos medidos por lo general son escasos y suelen estar sujetos a errores, de modo que los resultados predichos por el modelo a menudo se desvían de los valores reales, lo que se le atribuye a la incertidumbre de la simulación numérica de aguas subterráneas.

Dado lo anterior, un análisis de sensibilidad de parámetros y de incertidumbre permitirá una estimación del rango de incertidumbre o error de las predicciones.

De la misma forma, es importante destacar que, aunque el ajuste de la calibración sea exitoso, se debe tener en cuenta que los resultados de la simulación predictiva consisten en estimaciones o tendencias de los cambios esperables en el acuífero, no en valores absolutos, por lo que deben tratarse con cuidado (SEA, 2012).

### 3.9.- Modelamiento estocástico

Comúnmente existen dos metodologías para abarcar el modelamiento hidrogeológico. En primer lugar, y más frecuentemente utilizada, se encuentra la modelación determinista, la cual concluye con un único resultado simulado para el modelo, en donde se percibe certeza por los valores obtenidos, en lugar de cierto grado de incertidumbre asociada a este.

En segundo lugar, existe el modelamiento estocástico, en donde se corre un gran número de simulaciones en un marco probabilístico con el fin de explorar el rango de condiciones futuras posibles a partir del cual se evalúa cuantitativamente la probabilidad de varios resultados para un evento futuro, en lugar que predecir un único, presuntamente más probable, resultado con una incertidumbre incierta.

El modelamiento estocástico es una herramienta para estimar probabilidad de distribución de potenciales resultados utilizando la variación parcialmente azarosa de uno o más parámetros en el tiempo. Este método conlleva un análisis de incertidumbre, siendo éste el aproximamiento técnicamente correcto en modelación predictiva (Maliva, 2016).

El acercamiento general para el desarrollo de un modelo estocástico comienza con la construcción de un modelo conceptual discretizado, del cual, a partir de los parámetros y condiciones de borde asociadas a este y debido a la falta de conocimiento de la variabilidad espacial de los parámetros, se obtienen funciones de distribución de probabilidad, con las cuales, utilizando el método de Monte Carlo (Anderson et al., 2015), se realizan las simulaciones con valores asignados a cada celda, elemento y nodo del modelo numérico, evaluando la plausibilidad de cada resultado utilizando el criterio de calibración.

Si la realización no cumple el criterio de calibración, es considerada irrealista. Una vez seleccionadas las realizaciones realistas, se utilizan para realizar las simulaciones predictivas. Los resultados de estas son analizados determinando su probabilidad de ocurrencia y la incertidumbre asociada (Maliva, 2016).

En el caso práctico realizado en este trabajo, se utiliza un modelo calibrado a partir del método estocástico del cual se obtienen 15 sets de parámetros de conductividad hidráulica y rendimiento específico, y a partir de estos resultados se procede a realizar las consecuentes simulaciones predictivas asociadas a cada set de parámetros, con el fin de analizar las variaciones.

## 4.- INCERTIDUMBRE

En lo que respecta a la Real Academia Española, la incertidumbre se define como la falta de conocimiento seguro y claro de algo. Lo cual dentro de la rama de estudio de la geología se precisa como la incompletitud de conocimiento (de información o contexto), que causa que una predicción realizada en base a un modelo difiera de la realidad en una forma descrita por una función de distribución (DeLaurentis y Mavris, 2000) y se debe tener en consideración en la mayoría de las especialidades. Particularmente en la hidrogeología, debido al escaso conocimiento del subsuelo, es utópico especular que se alcanzará un conocimiento de este carente de incertidumbre.

### 4.1.- Fuentes de incertidumbre en modelos hidrogeológicos

Como fue expuesto en los capítulos anteriores, la construcción de un modelo hidrogeológico acarrea incertidumbre desde la primera etapa, debido, por un lado, a la aleatoriedad inherente a los parámetros hidrogeológicos en el espacio y el tiempo y, por otro lado, a que el modelamiento hidrogeológico requiere de supuestos, que como resultado guían a más incertidumbre.

En el trabajo realizado por Baalousha (2003), se define que las fuentes de incertidumbre en la modelación hidrogeológica se clasifican en tres categorías principales, descritas a continuación.

#### 4.1.1.- Incertidumbre natural

La existencia de este tipo de incertidumbre está dada por la naturaleza aleatoria inherente a los sistemas hidrogeológicos y ambientales. Esta aleatoriedad puede existir en el tiempo o el espacio, debido a que las variaciones en el tiempo y el espacio de las fluctuaciones hidrogeológicas son inciertas.

Un ejemplo de esto es representado por la incertidumbre asociada a la variación espacial de los parámetros hidrogeológicos, cuyos valores cambian en los distintos puntos del sistema, debido a la heterogeneidad del medio subterráneo.

#### 4.1.2.- Incertidumbre asociada a parámetros

A pesar de que se pueden realizar una gran cantidad de mediciones de parámetros en terreno, el valor real de estos en algunos puntos del sistema no puede ser representado, por lo que se deben interpolar. A medida que aumentan las mediciones, se puede disminuir esta fuente de incertidumbre en el modelo, del mismo modo, se utilizan funciones de distribución de probabilidad para describir la incertidumbre asociada a estos.

Más adelante se entrará en mayor detalle en relación con este tipo de incertidumbre.

#### 4.1.3.- Incertidumbre asociada al modelo

Por un lado, respecto al modelo conceptual, este consiste en una simplificación de la realidad hidrogeológica, lo que implica descartar algunos aspectos del entorno que se consideran poco significativos para el estudio en particular. Debido a que consiste en un modelo sub superficial, es construido a partir de información obtenida principalmente a partir de sondajes, los cuales contienen información limitada a cierta cantidad de puntos del modelo. El modelo consiste en una interpretación de la realidad a partir de escasa información, lo cual abarca una cantidad de incertidumbre bastante significativa.

Es por esta razón, que muchos autores recomiendan la construcción de más de un único modelo conceptual, con el fin de utilizar más de una interpretación de la realidad para la obtención de resultados y de esta forma disminuir el grado de incertidumbre, pero esta metodología en la práctica es escasamente utilizada, debido a los costos monetarios y de tiempo que implica la construcción de diversos modelos.

Por otro lado, en relación con el modelo numérico, este ya acarrea la incertidumbre proveniente del modelo conceptual, y se le debe sumar la incertidumbre inherente a la discretización que debe ser realizada en esta etapa, considerando que se deben efectuar aproximaciones tales como el tamaño de la grilla a utilizar. Decisiones que deben ser realizadas según el criterio del modelador.

Además, el modelo numérico representa procesos geológicos naturales conceptualizados a través de ecuaciones simples gobernadas por el flujo, debido a las limitaciones de los datos, resultando en predicciones que a menudo se desvían de los valores reales, lo que se atribuye a la incertidumbre asociada a la simulación numérica (Wu y Zeng, 2013).

#### 4.2.- Incertidumbre paramétrica

Corresponde a la fuente de incertidumbre en la cual se va a enfocar el análisis de este estudio, específicamente relacionándola a los parámetros de conductividad hidráulica y rendimiento específico, parámetros que abarcan un amplio rango de valores posibles en una misma unidad hidrogeológica. A modo de ejemplo, la conductividad hidráulica esperable teóricamente en un mismo material puede variar varios ordenes de magnitud, como se muestra en la Tabla 1. De la misma manera, en cuanto al rendimiento específico, los rangos comunes encontrados en la literatura se presentan en la Tabla 2, mostrándose igualmente variaciones significativas.

Tabla 1. Valores referenciales para la conductividad hidráulica (SEA, 2012).

<b>Tipo de suelo/roca</b>	<b>Conductividad hidráulica <math>K</math> (m/d)</b>
Arcilla	$10^{-8} - 10^{-2}$
Limo	$10^{-2} - 1$
Arena fina	<b>1 - 5</b>
Arena media	<b>5 - 20</b>
Arena gruesa	<b>20 - 100</b>
Grava	<b>100 - 1000</b>
Esquistos	$5 \times 10^{-8} - 5 \times 10^{-6}$
Areniscas	$10^{-3} - 1$
Calizas	$10^{-5} - 1$
Basaltos	<b>0.0003 - 3</b>
Granitos	<b>0.0003 - 0.03</b>
Pizarras	$10^{-8} - 10^{-5}$

Tabla 2. Coeficiente de almacenamiento de acuífero libre o rendimiento específico (SEA, 2012).

<b>Acuífero</b>	<b>N° de análisis</b>	<b>Rango</b>	<b>Media aritmética</b>
<b>Material sedimentario</b>			
Arenisca (fina)	<b>47</b>	<b>0.02 – 0.40</b>	<b>0.21</b>
Arenisca (media)	<b>10</b>	<b>0.12 – 0.41</b>	<b>0.27</b>
Limolita	<b>13</b>	<b>0.01 – 0.33</b>	<b>0.12</b>
Arena (fina)	<b>287</b>	<b>0.01 – 0.46</b>	<b>0.33</b>
Arena (media)	<b>297</b>	<b>0.16 – 0.46</b>	<b>0.32</b>
Arena (gruesa)	<b>143</b>	<b>0.18 – 0.43</b>	<b>0.30</b>
Grava (fina)	<b>33</b>	<b>0.13 – 0.40</b>	<b>0.28</b>
Grava (media)	<b>13</b>	<b>0.17 – 0.44</b>	<b>0.24</b>
Grava (gruesa)	<b>9</b>	<b>0.13 – 0.25</b>	<b>0.21</b>
Limo	<b>299</b>	<b>0.01 – 0.39</b>	<b>0.20</b>
Arcilla	<b>27</b>	<b>0.01 – 0.18</b>	<b>0.06</b>
Caliza	<b>32</b>	<b>0.00 – 0.36</b>	<b>0.14</b>
<b>Materiales erosionables</b>			
Loess	<b>5</b>	<b>0.14 – 0.22</b>	<b>0.18</b>
Arenas eólicas	<b>14</b>	<b>0.32 – 0.47</b>	<b>0.38</b>
Toba	<b>90</b>	<b>0.02 – 0.47</b>	<b>0.21</b>
<b>Roca metamórfica</b>			
Esquisto	<b>11</b>	<b>0.22 – 0.33</b>	<b>0.26</b>

A partir de estas tablas se puede concluir que obtener el valor exacto de uno de estos parámetros para un material específico es poco probable, debido al amplio rango de variabilidad que los distingue, además de las variaciones experimentadas por los mismos materiales espacialmente en el medio que los contiene.

Este es el principal origen de la incertidumbre asociada a los parámetros, ya que, como se mencionó anteriormente, solo se tienen datos medidos, a partir de ensayos hidráulicos, en ciertos puntos del sistema. Esta información es la más certera del sistema pero, también comúnmente, la más escasa, puntual y esparcida heterogéneamente en la extensión del dominio de modelación. Por lo tanto, es inevitable la necesidad de asumir

los valores espaciales restantes, realizando interpolaciones en las zonas carentes de datos, con el fin de representar la variabilidad espacial.

Además, los ensayos hidráulicos también presentan limitaciones al momento de estimar la conductividad hidráulica y rendimiento específico, debido a que los resultados obtenidos dependerán del estrés que se le aplica al sistema y no siempre representan la situación real del acuífero, debido a la naturaleza heterogénea del medio subterráneo y los errores inherentes a las pruebas de bombeo. Esto agrega un mayor grado de incertidumbre al sistema, por lo que, a pesar de los esfuerzos enfocados en una correcta realización de las pruebas de bombeo, estas pueden contener cierto grado de error en los datos medidos.

Una de las técnicas de interpolación consiste en la zonación, explicada en el capítulo anterior, en donde se definen zonas de conductividad constantes de acuerdo con la interpretación del modelo conceptual. Este será el método utilizado en el caso práctico para representar la variabilidad de los parámetros de conductividad hidráulica y rendimiento específico.

Este mismo método, que por un lado confiere menor incertidumbre, por otro lado, define las zonas respecto a las zonas definidas en el modelo conceptual, lo que acarrea en sí mismo un grado de incertidumbre importante, por lo tanto, se debe tener en cuenta que las zonas pueden variar, mientras tenga consistencia con la geología y la hidrogeología de la zona, junto con los datos concretos que conforman el modelo.

#### 4.3.- Incertidumbre en caso de estudio

A continuación, se presentará un caso de estudio consistente en un modelo hidrológico e hidrogeológico integrado ubicado en la cuenca del río Rapel, en donde se evaluará la incertidumbre predictiva asociada a los parámetros de conductividad hidráulica y rendimiento específico, en un modelo previamente construido por Véliz (2018), analizando el impacto de la incertidumbre existente sobre los resultados y valorando la realización de un análisis de incertidumbre.

En este caso particular, a partir de distintas pruebas y condiciones impuestas al acuífero se compararán las variaciones en los resultados obtenidos para cada uno de los casos estudiados discutiendo su efecto, y con este método se obtendrán resultados con el suficiente grado de confianza para los análisis que se le aplicarán a continuación.

## 5.- DESCRIPCIÓN DEL MODELO EXISTENTE

En este capítulo se entregarán los antecedentes necesarios para la comprensión de las simulaciones predictivas realizadas en este trabajo de título, describiendo la construcción del modelo realizado por Véliz (2018), y la descripción geológica actualizada según la carta Monte Patrial-El Maqui (Pineda y Calderón, 2008).

El caso de estudio a realizar en esta tesis se basa en el trabajo realizado por Esteban Véliz (2018), el cual tuvo como objetivo la generación de un modelo hidrológico superficial y subterráneo integrado, aplicado a la subcuenca del Río Rapel. Por lo tanto, todos los procesos, definiciones y resultados obtenidos por Véliz en su trabajo se considerarán como antecedentes para el trabajo a realizar a continuación.

En el modelo de Véliz (2018) se realizaron calibraciones en un espacio parametrizado implementando el método de zonación. Se utilizaron 15 series de recarga diferentes, calibradas en el modelo superficial hidrológico, para los cuales se calibró el modelo de agua subterránea, obteniendo los respectivos valores de conductividad hidráulica y rendimiento específico para cada una de las 15 series de recarga y se efectuará un análisis de la variación de los resultados de calibración obtenidos.

Los valores de los parámetros hidrogeológicos de conductividad hidráulica y rendimiento específico obtenidos se encuentran dentro del rango más aceptable de variación basado en el rango de valores aceptables ingresados en el modelo conceptual.

### 5.1.- Ubicación del área de estudio

La zona de estudio se ubica en la Región de Coquimbo, como se observa en la Figura 4. A casi 90 kilómetros al sur de La Serena, aproximadamente a 80 kilómetros de la costa y 65 kilómetros al sureste de la ciudad de Ovalle, correspondiente a la subcuenca del río Rapel. Su límite oriental corresponde a la frontera entre Chile y Argentina.

Se ubica específicamente en la cuenca del río Limarí, en la cual el río más importante corresponde al río Limarí. Este río está formado por la confluencia de los ríos Hurtado y Grande, siendo el río Hurtado de menor envergadura que el río Grande debido al tamaño de su cuenca, en cambio el río Grande corresponde al mayor aporte de caudal del río Limarí. El río Grande nace en la Cordillera de los Andes y en su curso recibe diversos afluentes, entre ellos los ríos Tascadero, Mostazal y Rapel (DGA, 2008), siendo este último el área de este estudio.

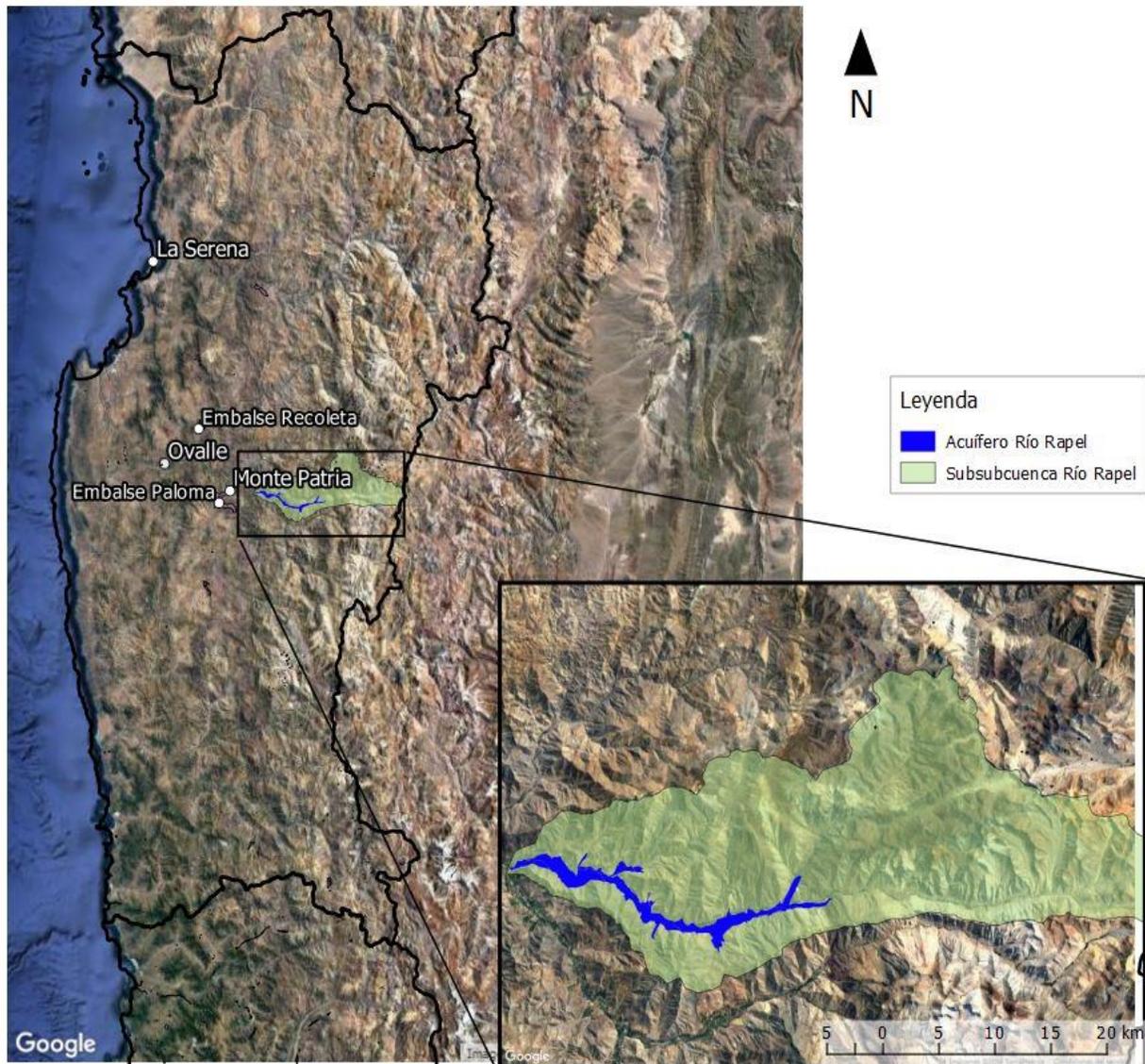


Figura 4. Ubicación subcuenca Río Rapel. Región de Coquimbo, Chile. Elaboración propia.

## 5.2.- Geología

Dado que el trabajo de Veliz (2018) no incluye una buena descripción geológica del área, debido a la antigüedad y bajo grado de detalle de la fuente utilizada en su trabajo, para contextualizar el entendimiento y descripción de la geología del área de estudio, se utilizará la carta geológica del área Monte Patria-El Maqui, realizada por Pineda y Calderón (2008) en escala 1:100.000.

La distribución geológica principal consiste en el acuífero de interés, el cual recorre la zona de este a oeste, constituido de depósitos cuaternarios y contiene el cauce del río Rapel.

Lateralmente se encuentra delimitado por dos tipos principales de roca caja. En el sector oeste, el acuífero es contenido por roca intrusiva perteneciente a la Diorita Pichasca, y en el sector este, delimitado por la Falla Tuluahuén, la roca caja se compone de tres franjas norte-sur consistentes de roca estratificada, las cuales ordenadas de base a techo corresponden a las formaciones Río Tascadero, Pucalume y Viñitas, encontrándose las dos primeras en la zona más oriental, en escaso contacto con el acuífero.

A continuación, se entregará una descripción detallada de cada litología, y en la Figura 5 se mostrará una modificación del mapa geológico Montepatria El Maqui (Pineda y Calderón, 2008), en donde se acerca al área de interés mostrando las unidades geológicas correspondientes al sector de estudio.

### Rocas Estratificadas

#### Formación Río Tascadero (Berriasiano-Barremiano)

**Definición.** Secuencia de rocas carbonatadas de origen marino (Rivano, 1980), en la zona de estudio corresponde a una sucesión estratificada constituida principalmente por calizas de grano fino.

**Distribución.** Se observa como una franja de dirección norte-sur que cruza la zona de estudio en el límite oriental, con un espesor que no supera los 800 metros y sobre ésta se observa, hacia el oeste, en concordancia la Formación Pucalume. Asimismo, en el límite occidental esta formación se encuentra intruida por un cuerpo plutónico perteneciente a la Diorita Campanario.

#### Formación Pucalume (Aptiano-Cenomaniano?)

**Definición.** Definida como una secuencia estratificada de origen continental (Dediós, 1967). Dentro de la zona de interés presenta un color rojizo, estratificación fina y está constituida por una sucesión de conglomerados, areniscas y calizas.

**Distribución.** Se observa como una franja norte-sur que cruza el área de estudio con una extensión este-oeste máxima de un kilómetro. Sobreyace concordantemente a la Formación Río Tascadero y es sobreyacida en discordancia por la Formación Pucalume. Alcanza una potencia máxima de 500 metros.

Debido a su espesor y escaso contacto con el acuífero principal, la influencia de esta Formación en este estudio, es prácticamente insignificante, por lo que no se ahondará en mayor detalle.

#### Formación Viñita (Turoniano-Campaniano?)

**Definición.** Secuencia volcánica continental con intercalaciones epiclásticas (Emparan y Pineda, 1999), en ella se reconocen cuatro facies litológicas, ubicándose en la zona de estudio únicamente la facie “a”, correspondiente a una sucesión de coladas de andesitas

ferruginosas y andesitas basálticas porfídicas de anfíbola y piroxeno con intercalaciones delgadas de niveles de tobas de lapilli, areniscas epiclásticas y brechas piroclásticas compuestas por fragmentos volcánicos y cristales.

**Distribución.** Dentro de la zona de estudio, esta facie se dispone como una franja nort-sur que se encuentra delimitada al oeste por la Falla Tulahuén y hacia el este por la Formación Pucalume y la Formación Río Tascadero, de forma discordante. También se puede observar un afloramiento de esta en el límite occidental de la zona.

### Rocas Intrusivas

#### Diorita Pichasca (66-64 Ma)

**Definición.** Se compone de un conjunto de plutones de forma tabular (Emparan y Pineda, 2006), compuestos por dioritas, granodioritas y granitos, los cuales representan la actividad magmática intrusiva en el límite entre el Cretácico y el Paleógeno. En este sector aflora un cuerpo plutónico de gran tamaño, en el cual se identifican cuerpos graníticos de biotita, de grano medio y colores grisáceos claros y cuerpos subordinados de monzogranitos de biotita-anfibolita.

**Distribución.** Se observa como un afloramiento de gran extensión en el sector occidental de la zona de estudio, delimitado desde el límite oriental por la Falla Tulahuén y en el límite occidental de la cuenca se observa en contacto con la Formación Viñita.

#### Granodiorita Rapelcillo (ca. 57 Ma)

**Definición.** Corresponde a un conjunto de plutones granodioríticos con facies graníticas subordinadas, de grano fino a medio, de color gris claro (Pineda y Calderón, 2008).

**Distribución.** Dentro de la zona de estudio afloran pequeños cuerpos en el sector oriental, aflorando a través de la discordancia observada entre la Formación Viñitas y la Formación Río Tascadero, además se localiza otro afloramiento en el sector sur, intuyendo a la Formación Viñitas.

### Depósitos Cenozoicos

#### Depósitos fluviales antiguos (Pleistoceno)

**Definición.** Se presentan como remanentes de depósitos sedimentarios continentales semiconsolidados, correspondientes a cuerpos estratificados con estructuras internas que exponen episodios de inundación y laminación paralela y cruzada en los niveles finos, indicando episodios de aguas tranquilas. Compuestos mayormente por gravas gruesas y muy gruesas, con abundante matriz de arena, contienen intercalaciones de gravas finas arenosas y arena.

**Distribución.** Se encuentran arealmente restringidos en terrazas a lo largo de los márgenes de los cursos fluviales actuales, como es en este caso, el río Rapel. Se pueden apreciar inmediatamente al este de la traza de la Falla Tulahuén, y constituyen una pequeña parte del acuífero particular de este estudio.

*Depósitos aluviales antiguos y recientes (Pleistoceno-Holoceno)*

**Definición.** Corresponden a sedimentos no consolidados, generados por cursos de agua y flujos de detritos. Se componen de bolones y bloques, clasto y matriz soportados. No poseen estructuras sedimentarias, se observa una disminución del tamaño de grano en las facies distales, lugares en donde se acumula grava, arena y limo.

**Distribución.** Se pueden observar a lo largo de los cursos fluviales, específicamente en sectores donde cambia la pendiente y disminuye la energía hidráulica. Específicamente en el Río Rapel, se pueden observar de manera esporádica a lo largo del cauce.

*Depósitos fluviales recientes (Holoceno)*

**Definición.** Se definen como depósitos no consolidados, estratiformes a lenticulares e internamente homogéneos, constituidos por bolones, gravas y arenas. Predominantemente clasto soportado y, en menor cantidad, matriz soportados. Compuestos por gravas gruesas y muy gruesas, polimícticas, con abundante matriz de arena, no consolidadas y cuyos clastos presentan orientación y/o imbricación.

**Distribución.** Corresponden a depósitos activos ubicados en el curso actual del Río Rapel, se puede observar a lo largo de todo el sector del río dentro del área de interés, lateralmente al curso del río.

Las últimas tres unidades descritas corresponden a las de mayor interés en el estudio a realizar, debido a que estas constituyen el acuífero determinado por Véliz (2018) para el caso de estudio, a pesar de que en su trabajo utiliza otra fuente para definir la geología, por lo tanto, las unidades difieren levemente en su clasificación y nombre, pero concuerdan en cuanto a edad aproximada y distribución espacial.

Las unidades hidrogeológicas se describirán más adelante. Se debe tener en cuenta que la distribución de estas unidades en el modelo conceptual fue realizada a partir de otro estudio previamente realizado en la zona.

# Mapa Geológico Sector Río Rapel

## Editado de Carta Montepatria El Maqui

1:100.000

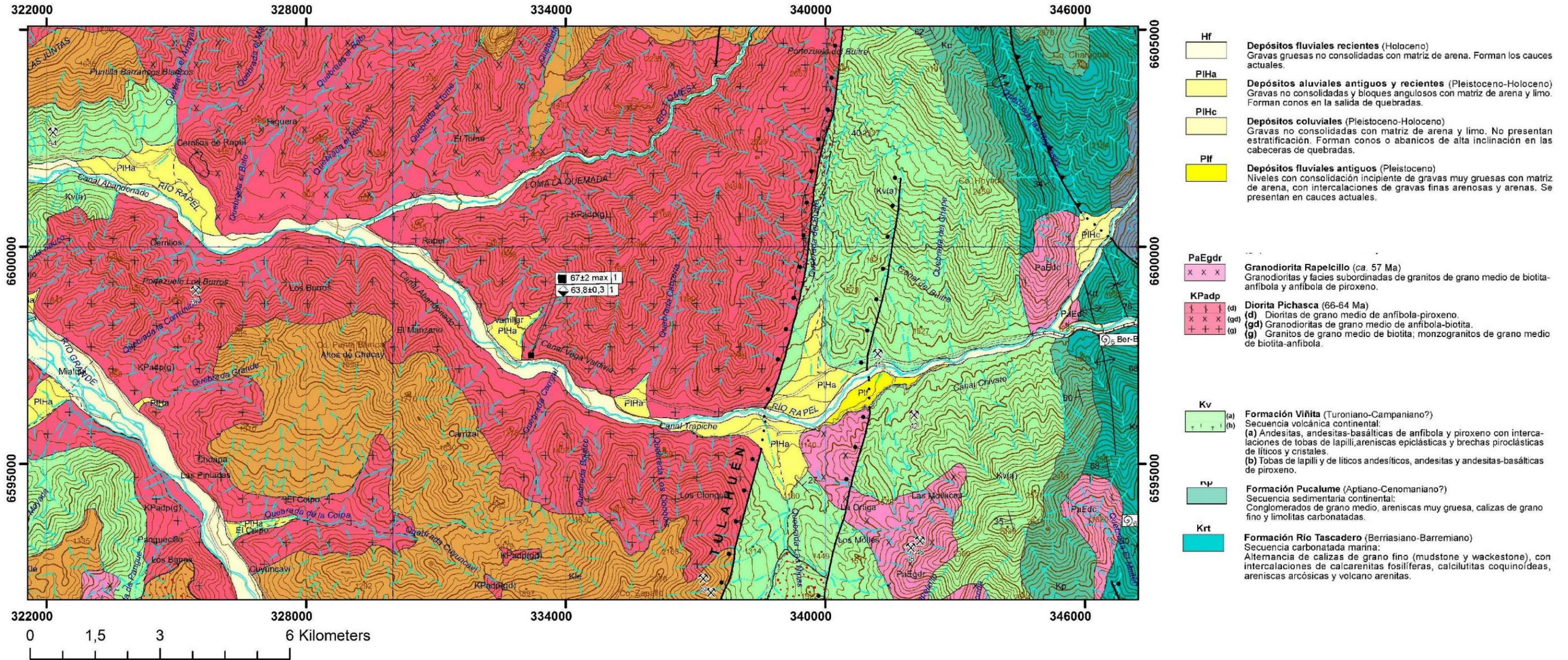



Figura 5. Mapa geológico zona Río Rapel. Editado de mapa geológico Montepatria El Maqui (Modificado de Pineda y Calderón, 2008).

### 5.3.- Modelo conceptual

Este modelo fue realizado en el trabajo de Véliz (2018), y fue construido en base a estudios anteriores en la zona, como también a partir de datos obtenidos de tres pozos ubicados en el acuífero a modelar. Cabe señalar que para la construcción de este modelo no se realizó trabajo en terreno, por lo que toda la información utilizada corresponde a estudios ejecutados con anterioridad y observaciones realizadas a través de imágenes digitales.

#### 5.3.1.- Unidades hidrogeológicas

Véliz (2018) definió una única unidad hidrogeológica utilizando información bibliográfica justificada con datos hidrogeológicos obtenidos de los pozos Asentamiento Alborada, Asentamiento Cerrillos y Asentamiento Sol de Pradera ubicados en la zona.

En este estudio, Véliz (2018) caracteriza el acuífero como relleno sedimentario no consolidado conformado por una base de alta permeabilidad compuesta por bolones, gravas y arenas; y un techo semi permeable compuesto por arenas, gravas, limos y cantidad variable de arcilla.

El trabajo realizado por Véliz (2018) identifica una única unidad hidrogeológica, correspondiente a las unidades geológicas cuaternarias ubicadas en los alrededores del río Rapel, como se observa en la Figura 5. Posteriormente en la construcción del modelo numérico, esta unidad es dividida en ocho zonas como se explicará más adelante.

#### 5.3.2.- Geometría superficial y profundidad del basamento

Véliz (2018) definió los límites laterales del acuífero por la presencia en superficie de las tres unidades cuaternarias mencionadas en la descripción geológica, donde los límites del mismo corresponden, al oeste, la junta del acuífero del río Rapel con el acuífero del río Grande. Hacia el este, la extensión del acuífero se presenta hasta aproximadamente la cota 1550 m.s.n.m., en donde se observa una marcada disminución y angostamiento de la vegetación. El límite superior del modelo corresponde a la topografía, ya que, este caso a estudiar corresponde a un acuífero libre.

Las otras unidades son consideradas roca caja, estas corresponden a las unidades estratificadas e intrusivos definidos en la sección 5.2.1., clasificados en este estudio como roca impermeable, debido a sus conductividades hidráulicas notoriamente menores que aquellas asociadas a las unidades cuaternarias.

Del mismo modo, bajo las unidades cuaternarias, la roca caja se encuentra entre los 27 y 35 metros de profundidad, valor obtenido a partir de estudios anteriores y estratigrafía de pozos. A partir de estos datos, Véliz (2018) en su modelo, considera una profundidad del acuífero uniforme de 30 metros.

### 5.3.3.- Pozos de observación

Para obtener datos del medio subterráneo, tales como la conductividad, rendimiento específico y niveles piezométricos, se utilizó en la construcción del modelo los pozos de observación presentes en la zona de estudio, de los cuales Véliz (2018) utilizó los registros históricos de niveles obtenidos de las tres estaciones presentes en el acuífero del río Rapel.

Estos pozos corresponden al Asentamiento Cerrillos (AC), el cual presenta un registro piezométrico en el periodo 1975-2014; Asentamiento Alborada (AA), con el mismo periodo de registro que el pozo anterior; y Asentamiento Sol de Pradera (AS), que presenta datos registrados entre los años 1970 y 2012. En la Figura 6 se muestra la ubicación de estos pozos en el acuífero.

Los registros de cota hidráulica en los pozos permiten trazar la piezometría de la zona, permitiendo evaluar si el sistema responde a una recarga estacional y a qué velocidad. Los niveles también permiten conocer si el acuífero alimenta al sistema superficial o si la relación es inversa, concluyendo que la relación es tal que es el acuífero el que aporta la recarga al río Rapel.

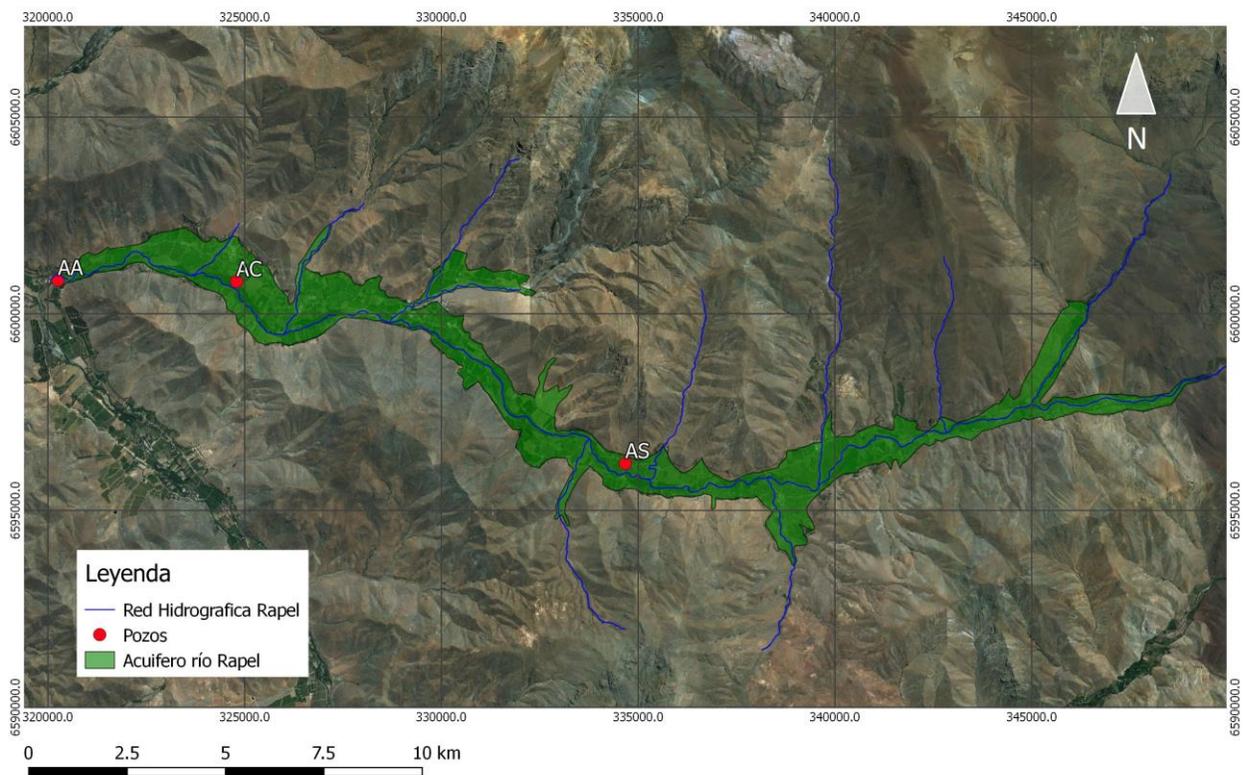


Figura 6. Ubicación pozos presentes en Río Rapel. Elaboración propia.

### 5.3.4.- Piezometría y dirección del flujo

Debido a la falta de información en la zona, no se cuenta con una piezometría construida para el propósito del modelo conceptual. Por lo tanto, para este trabajo se extrae la piezometría obtenida del modelo numérico calibrado por Véliz (2018). Se muestra en la Figura 7 la piezometría del modelo para diciembre 2015.

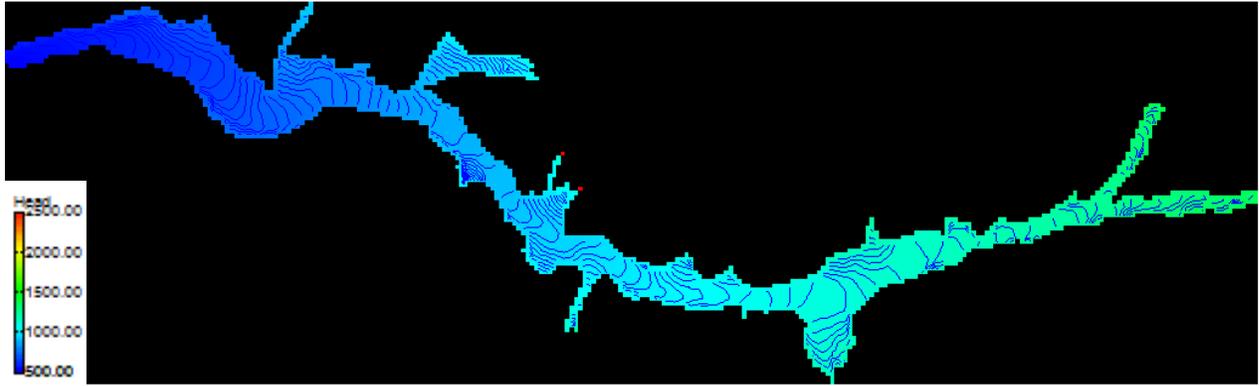


Figura 7. Piezometría acuífero para la fecha diciembre 2015. Véliz (2018).

De esta imagen se puede observar la existencia de un gradiente de aproximadamente 3%, presentándose un nivel piezométrico aproximado de 1500 m.s.n.m. en el límite oriental y un nivel piezométrico cercano a los 500 m.s.n.m. en el límite occidental del acuífero de interés.

Se obtiene, debido a la diferencia de altura, que la dirección del flujo se presenta desde el este hacia el oeste.

### 5.3.5.- Balance hídrico

El balance hídrico describe las entradas y salidas de agua del sistema subterráneo. En un sistema en equilibrio las entradas y salidas deben ser similares y si hay diferencias estas se deben ver reflejadas en la variación de almacenamiento del acuífero, el que se observa a través de la variación de niveles.

#### Entradas

Debido a que la cuenca corresponde a una cuenca de cabecera, no se producen entradas subterráneas desde aguas arriba. La tasa de recarga que se ingresa al modelo hidrogeológico es estimada por Véliz (2018) considerando dos componentes, la entrada de agua proveniente de las precipitaciones y del riego esperado en la zona.

Como se mencionó anteriormente, la recarga ingresada al flujo subterráneo, es definida por Véliz (2018) a partir de un modelo hidrológico del cual se obtienen 15 series de recarga calibradas. Estas 15 series son utilizadas más adelante para la obtención de 15 sets de parámetros.

La importancia de la componente de riego radica en que un 70% de la superficie total considerada en el sistema es regada (Véliz, 2018), debido a la alta producción agrícola en la cuenca, dentro de la cual destaca el cultivo de uva.

A modo de simplificación y debido a la falta de información detallada acerca de la distribución de la recarga en la cuenca, es que, en las 15 series se considera una recarga uniforme mensual e igual a la asociada a las condiciones promedio de la cuenca para la precipitación y el riego.

### Salidas

Las salidas del sistema están dadas por dos componentes: el aporte desde el acuífero al río y la salida lateral de flujo subterráneo.

En primer lugar, acorde a la cantidad de recarga que ingresa al acuífero, Véliz (2018) impone al río Rapel como una fuente de salida de agua del acuífero, es decir, parte del agua contenida en el río proviene de una descarga subterránea desde el acuífero, y no se produce la relación contraria en la cual el río aporta agua recargando al acuífero.

En segundo lugar, Véliz (2018) estima el flujo pasante por la sección subterránea de salida según la ley de Darcy en el límite occidental de la cuenca modelada. Aplicando la fórmula de Darcy:

$$Q_d = K_h i A$$

Donde:

- $Q_d$  es el flujo de Darcy en  $m^3/día$ .
- $K_d$  es la conductividad horizontal en la sección de salida en  $m/día$ .
- $i$  es el gradiente hidráulico del nivel piezométrico (%).
- $A$  es el área de la sección de Darcy, por donde escurre el flujo subterráneo, en  $m^2$ .

### 5.4.- Construcción del modelo numérico

En el modelo numérico se procede a plasmar matemáticamente el comportamiento definido en el modelo conceptual previamente confeccionado. Para ello, como se expuso en el capítulo de modelación hidrogeológica, se debe discretizar el área de estudio y el tiempo a simular, así como establecer las condiciones iniciales y de borde para representar el comportamiento del sistema hidrogeológico.

Para la construcción del modelo numérico, Véliz empleó la interfaz gráfica Groundwater Vistas, correspondiente a un programa de modelación el cual dentro de su extensión posee todas las versiones del software de resolución de flujo, MODFLOW. En particular se utilizó

la versión MODFLOW-USG para los cálculos numéricos realizados para la construcción y calibración del modelo.

#### 5.4.1.- Discretización espacio-temporal

Anteriormente, en la construcción del modelo conceptual se definió el dominio del acuífero, el cual consta de los límites entre el relleno cuaternario y el basamento lateral e inferior y la elevación del terreno como límite superior.

Al construir el modelo numérico, se discretiza el espacio, representando el dominio del acuífero en dos capas, en donde la capa superior tiene una profundidad uniforme de 15 metros, al igual que la capa inferior, con el fin de incluir los depósitos más antiguos, respetando la división horizontal de las zonas hidrogeológicas previamente descritas y realizando la separación de acuerdo a los límites espaciales de las unidades hidrogeológicas.

El modelo numérico se conforma de una grilla uniforme con celdas de 100x100 metros, compuesta por 87 filas, 284 columnas y dos capas, de las cuales 43378 celdas se imponen como celdas de no-flujo, por lo que se tienen 6038 celdas activas, correspondientes a un 22% del total. La geometría del modelo se observa en la Figura 9 anteriormente presentada.

Del mismo modo, para lograr un equilibrio inicial en el sistema, se utilizaron los primeros 2 años como condición estabilizadora del sistema, y los 20 años a continuación se utilizan con la finalidad de calibrar el modelo, por lo que se consideró una modelación en régimen transiente, con una discretización temporal en escala mensual.

Por lo tanto, cada periodo de estrés<sup>2</sup> del modelo tendrá una extensión temporal de un mes (a excepción del primero que tendrá una duración de dos años), obteniendo un total de 301 periodos de estrés.

#### 5.4.2.- Zonas hidrogeológicas

Anteriormente a Véliz, CAZALAC y Rhodos (2006) realizan un modelo que incluye el acuífero de estudio, en donde ellos fragmentan el acuífero del río Rapel en tres zonas hidrogeológicas como se muestra en la Figura 8, con una profundidad uniforme de 15

---

<sup>2</sup> Se denomina “periodo de estrés” a un intervalo de tiempo en donde las condiciones de entrada y salida del sistema permanecen constantes.

metros, cada una de las cuales contiene uno de los pozos con información de los parámetros asociados.

La información que permite a los autores caracterizar el acuífero de esta manera se obtiene del estudio “Investigación de recursos hidráulicos de la IV° Región, CHI-535” (1979) y de una revisión de la información básica contenida en todos los expedientes aprobados de solicitudes de derechos ingresados a la DGA.

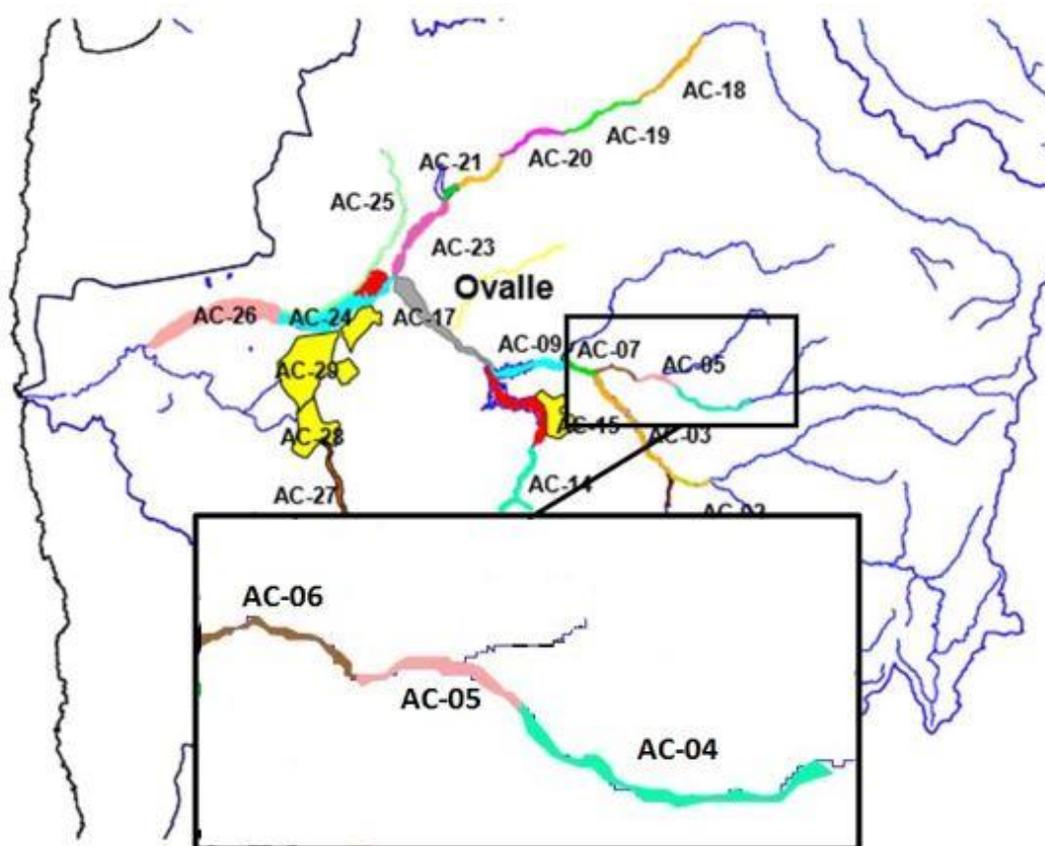


Figura 8. Zonificación del acuífero según CAZALAC y Rhodos (2006) con acercamiento a la zona que conforma el área de estudio. Véliz (2018).

Véliz (2018) modifica la caracterización hidrogeológica anterior, utilizando como base las tres zonas definidas por CAZALAC y Rhodos (2006), dividiendo una de ellas en dos zonas diferentes, debido a la presencia de una falla en el sistema, llamada Falla Tulahuén, la cual limita las dos nuevas zonas hidrogeológicas. Además, agrega una segunda capa al modelo de 15 metros de profundidad, con la misma geometría que las zonas superiores, obteniendo una profundidad final de 30 metros.

Esto es justificado con la información procedente de un estudio de evaluación de recurso hídrico subterráneo de la cuenca del río Limarí realizado por la Dirección General de Aguas (2008), en el cual se indica que la unidad de depósitos fluviales presenta con un grado de consolidación decreciente de base a techo, en donde la base está asociada a depósitos cuaternarios más antiguos y el techo a depósitos más recientes.

Este estudio, caracteriza al acuífero como relleno sedimentario no consolidado conformado por una base de alta permeabilidad compuesta por bolones, gravas y arenas; y un techo semi permeable compuesta por arenas, gravas, limos y cantidad variable de arcilla. Información a partir de la cual Véliz (2018) confiere la segunda capa a la caracterización hidrogeológica

Finalmente, el modelo construido por Véliz consiste en un acuífero dividido en 8 zonas, como se presenta a continuación en la Figura 9. Cada zona presentará propiedades de conductividad hidráulica y rendimiento específico particulares.

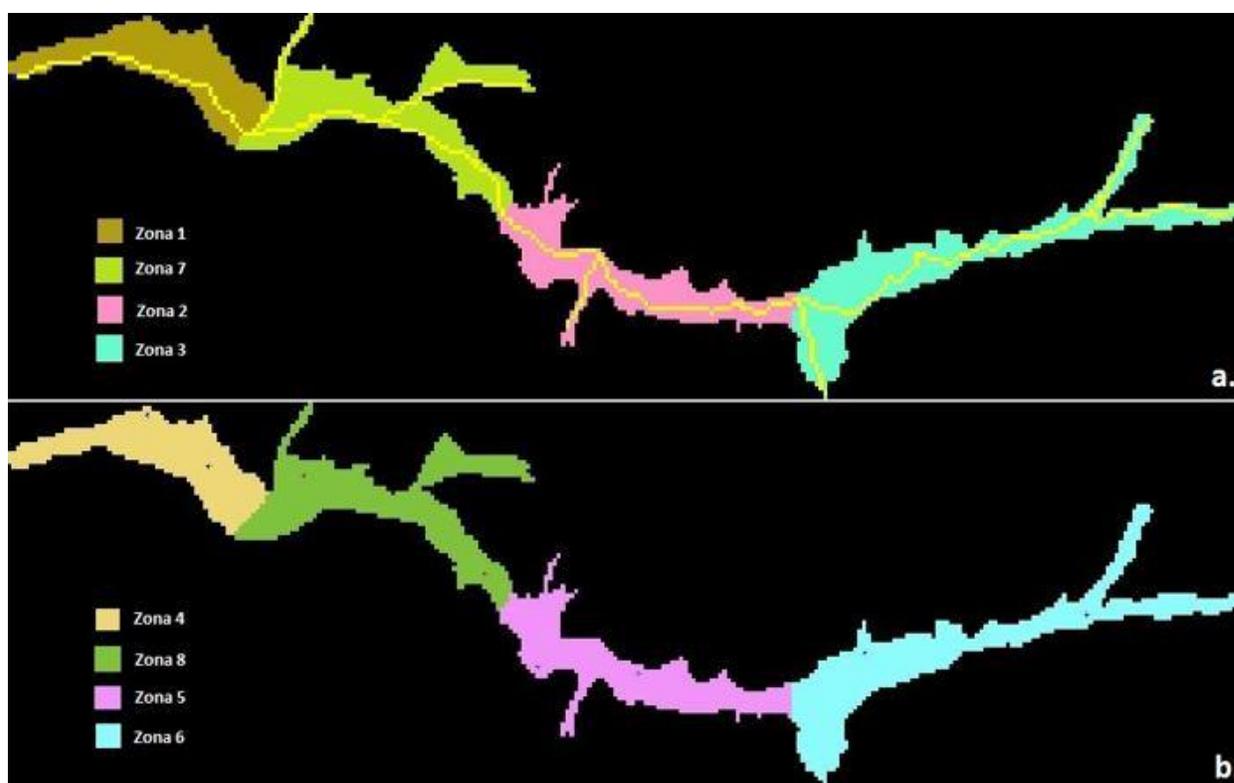


Figura 9. Modelo hidrogeológico del acuífero. a. Capa superior del modelo con zonas 1, 7, 2 y 3. En amarillo el río Rapel. b. Capa inferior con zonas 4, 8, 5 y 6 del modelo. Editado de Véliz (2018).

En la Tabla 3 se exhiben los valores de rendimiento específico y conductividad hidráulica calibrados en el estudio de CAZALAC y Rhodos (2006) proyectados en las zonas definidas por Véliz (2018). Las zonas sin datos corresponden a la capa 2, la cual no se incluye en el estudio de CAZALAC y Rhodos (2006).

Más adelante se definirán los rangos teóricos utilizados por Véliz (2018) para la calibración del modelo utilizado en este estudio, evaluando la existencia o ausencia de una correlación entre los valores obtenidos en ambos estudios.

*Tabla 3. Valores de rendimiento específico y conductividad hidráulica horizontal calibrados en el estudio de CAZALAC y Rhodos (2006).*

<b>Zona del acuífero</b>	<b>Valores calibrados S</b>	<b>Valores calibrados K (m/d)</b>
Zona 1	<b>0,08</b>	<b>120</b>
Zona 2	<b>0,14</b>	<b>200</b>
Zona 3	<b>0,14</b>	<b>200</b>
Zona 4	-	-
Zona 5	-	-
Zona 6	-	-
Zona 7	<b>0,14</b>	<b>160</b>
Zona 8	-	-

#### 5.4.3.- Zonificación y parámetros hidráulicos

Para el modelo Véliz (2018) utilizó el método de zonificación dada la variabilidad lateral de los parámetros, dividiendo el acuífero en un total de 8 zonas como se mencionó anteriormente, cada una correspondiente a una zona hidrogeológica con sus respectivos rangos teóricos de propiedades hidráulicas a calibrar.

Los parámetros que se consideran más variables, y por lo tanto con mayor incertidumbre al momento de calibrar, corresponden a la conductividad hidráulica horizontal y el coeficiente de almacenamiento de acuíferos libres (rendimiento específico). Esta variabilidad se da entre un rango determinado teóricamente según el tipo de material y según ensayos de bombeo en los pozos presentes en la zona.

Véliz (2018) en su trabajo determina un rango teórico de rendimiento específico entre 0,01-0,15 para todas las zonas, utilizando como referencia el rango aceptado para acuíferos libres con material tipo gravas y arenas (SEA, 2012), y para la conductividad

hidráulica determina un rango entre 1-300 metros/día, apoyado en los datos de CALAZAC y Rhodos (2006) y del estudio de la DGA (2008). Los rangos teóricos definidos por Véliz (2018) se presentan en la Tabla 4.

*Tabla 4. Rangos teóricos de conductividad hidráulica y rendimiento específico definidos para cada zona del modelo por Véliz (2018).*

<b>A</b>	<b>Zona 1-8</b>	<b>Unidades</b>
<b>Kx</b>	1-300	m/d
<b>Sy</b>	0,01-0,15	-

#### 5.4.4.- Condiciones de borde

La entrada de agua al modelo se produce por la recarga superficial proveniente de las lluvias y el riego, la cual se ingresa al modelo en cantidades uniformes a lo largo de toda la superficie, y cuya tasa varía para cada uno de los escenarios a modelar, como se mostrará más adelante.

Por un lado, se impone como salida del modelo una condición de “constant head” o altura constante para cada periodo de estrés, para lo cual se utilizan los registros piezométricos documentados entre 1990-2014 por la estación Asentamiento Alborada Juntas (pozo AA) ubicado en el límite occidental del modelo. Esta metodología impone el nivel de agua conocido y variable en el tiempo registrado en el pozo, como condición de borde del modelo.

Por otro lado, el río que recorre la zona de estudio se modela como condición de borde tipo dren, para representar la descarga de agua subterránea producida desde el acuífero hacia la escorrentía superficial.

#### 5.4.5.- Condición inicial

Debido a la falta de información piezométrica en la zona de estudio para imponer una condición inicial asociada a los niveles observados, Véliz (2018) utilizó un periodo de estabilización inicial realizando una simulación para el primer periodo de estrés en régimen transiente para un periodo considerable de tiempo y utilizó su resultado como condición inicial. Todo esto respaldado por la información de la “Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA” (SEA, 2012).

Se obtuvo una condición inicial en base a un periodo de estrés inicial simulado en régimen transiente para un periodo de 2 años. Véliz comenzó el modelo con el nivel freático en la superficie, el cual se logra estabilizar con los flujos promedios para las condiciones de borde en el periodo inicial.

## 5.5.- Calibración del modelo numérico

Una vez construido el modelo numérico se debe someter al proceso de calibración de los parámetros hidrogeológicos, esto para lograr el ajuste esperado de valores que logren reproducir el comportamiento del acuífero, como se explica en el capítulo anterior.

Esto fue realizado por Véliz (2018) utilizando el método de calibración automática con el software PEST, para un periodo histórico de 20 años (entre los años 1993-2014), lo cual generó como resultado los valores de conductividad hidráulica y rendimiento específico que logran el mayor grado de ajuste para cada una de las zonas que componen el modelo, considerando cada una de las 15 recargas calibradas en el modelo hidrológico.

Como resultado de la calibración se obtienen los valores de parámetros que logran una mayor similitud entre la cota hidráulica calibrada por el modelo y la cota hidráulica observada en los pozos Asentamiento Cerrillos y Asentamiento Sol de Pradera ubicados en el área de estudio.

Además, se realizaron comparaciones de los índices de error NRMS<sup>3</sup> obtenidos en cada corrida, y como se observa en la Tabla 5, estos se encuentran dentro del rango aceptable correspondiente a un valor menor a 1%, Véliz (2018). Con lo que se concluye que los valores de los 15 modelos obtenidos cumplen con los criterios de aceptación establecidos en la Guía de la SEA (2012).

---

<sup>3</sup> Normalized Root Mean Squared (Error). Medida utilizada para comprar la diferencia entre los datos observados y los datos simulados. Mientras más pequeño sea el NRMS, implica que existe una mayor similitud entre ambos.

Tabla 5. Valores índices NRMS obtenidos por Véliz (2018) para las 15 series calibradas.

<b>Número Serie</b>	<b>Valor NRMS</b>
<b>#1</b>	<b>0.54%</b>
<b>#2</b>	<b>0.61%</b>
<b>#3</b>	<b>0.47%</b>
<b>#4</b>	<b>0.64%</b>
<b>#5</b>	<b>0.68%</b>
<b>#6</b>	<b>0.78%</b>
<b>#7</b>	<b>0.67%</b>
<b>#8</b>	<b>0.61%</b>
<b>#9</b>	<b>0.52%</b>
<b>#10</b>	<b>0.67%</b>
<b>#11</b>	<b>0.63%</b>
<b>#12</b>	<b>0.46%</b>
<b>#13</b>	<b>0.66%</b>
<b>#14</b>	<b>0.44%</b>
<b>#15</b>	<b>0.42%</b>

La Tabla 6 resume los resultados obtenidos para la calibración de conductividad hidráulica horizontal, vertical y el rendimiento específico para cada una de las 15 series, junto con la recarga promedio ingresada. Se observa también en la última fila de la tabla la recarga promedio ingresada en cada uno de los modelos. Se puede apreciar también, que el valor de la conductividad vertical no es parte de la calibración, si no que corresponde al 10% del valor calibrado de la conductividad horizontal. También se presenta el promedio y la desviación estándar asociado a cada uno de los parámetros.

Tabla 6. Resultados calibración obtenidos por Véliz (2018).

Parámetros Hidráulicos por Zona		Serie de recarga															Promedio	STD
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
Conductividad Hidráulica Horizontal (m/d)	kx1	66.33	155.79	118.54	87.15	150.24	137.43	92.13	164.55	84.19	99.17	98.01	119.52	105.54	60.60	52.08	52.08	52.08
	kx2	31.33	56.68	55.33	180.03	212.79	144.07	21.09	103.58	29.17	91.33	58.08	32.03	124.98	5.89	18.20	18.20	18.20
	kx3	63.50	33.76	35.16	300.00	247.52	55.31	7.40	12.47	57.15	5.48	7.35	70.60	59.71	39.47	34.46	34.46	34.46
	kx4	2.36	2.14	2.51	4.24	5.17	1.00	2.38	2.74	1.95	3.40	2.59	2.31	2.70	4.57	1.00	1.00	1.00
	kx5	1.00	1.22	1.00	1.00	1.00	1.00	3.08	1.00	1.00	1.00	1.68	1.32	1.00	1.55	1.00	1.00	1.00
	kx6	9.15	36.91	119.47	20.57	195.24	9.66	15.17	17.81	10.67	300.00	16.57	13.08	11.39	61.69	40.66	40.66	40.66
	kx7	8.71	12.82	5.73	1.00	9.06	10.10	15.64	1.00	15.01	25.53	45.07	6.16	11.69	25.73	18.36	18.36	18.36
	kx8	11.92	31.60	32.14	2.66	31.94	27.96	26.22	41.22	25.19	18.76	3.24	33.79	10.13	31.36	9.04	9.04	9.04
Conductividad Hidráulica Vertical (m/d)	kz1	6.63	15.58	11.85	8.72	15.02	13.74	9.21	16.46	8.42	9.92	9.80	11.95	10.55	6.06	5.21	5.21	5.21
	kz2	3.13	5.67	5.53	18.00	21.28	14.41	2.11	10.36	2.92	9.13	5.81	3.20	12.50	0.59	1.82	1.82	1.82
	kz3	6.35	3.38	3.52	30.00	24.75	5.53	0.74	1.25	5.72	0.55	0.73	7.06	5.97	3.95	3.45	3.45	3.45
	kz4	0.24	0.21	0.25	0.42	0.52	0.10	0.24	0.27	0.19	0.34	0.26	0.23	0.27	0.46	0.10	0.10	0.10
	kz5	0.10	0.12	0.10	0.10	0.10	0.10	0.31	0.10	0.10	0.10	0.17	0.13	0.10	0.16	0.10	0.10	0.10
	kz6	0.91	3.69	11.95	2.06	19.52	0.97	1.52	1.78	1.07	30.00	1.66	1.31	1.14	6.17	4.07	4.07	4.07
	kz7	0.87	1.28	0.57	0.10	0.91	1.01	1.56	0.10	1.50	2.55	4.51	0.62	1.17	2.57	1.84	1.84	1.84
	kz8	1.19	3.16	3.21	0.27	3.19	2.80	2.62	4.12	2.52	1.88	0.32	3.38	1.01	3.14	0.90	0.90	0.90
Redimiento Específico (%)	sy1	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%
	sy2	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	10.2%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	11.7%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%
	sy3	5.4%	6.0%	11.7%	1.0%	15.0%	5.1%	5.3%	1.5%	5.1%	1.0%	1.9%	1.0%	4.9%	5.4%	5.1%	5.1%	5.1%
	sy4	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%
	sy5	15.0%	15.0%	15.0%	9.6%	15.0%	15.0%	14.7%	10.0%	15.0%	3.6%	5.1%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%
	sy6	5.6%	6.4%	11.8%	1.0%	15.0%	5.1%	9.2%	3.5%	5.1%	3.9%	15.0%	15.0%	5.4%	5.6%	5.4%	5.4%	5.4%
	sy7	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	6.6%	15.0%	15.0%	15.0%	9.9%	11.6%	15.0%	15.0%	15.0%
	sy8	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%	15.0%
Recarga Promedio (L/s)	945.5	1366	1125	1387	1417	1309	948	1340	886.3	1237	1200	1147	1334	533.4	732.4	732.4	732.4	

La conductividad hidráulica muestra un amplio rango de variabilidad, observándose valores de desviación estándar de hasta 86.6 m/d y 84.4 m/d como se observa en la Tabla 6 para la conductividad hidráulica de la zona 3 (kx3) y zona 6 (kx6) respectivamente.

Naturalmente los valores más bajos de conductividad corresponderían a zonas compuestas predominantemente por relleno sedimentario con menor grado de permeabilidad, mientras que los valores de conductividad más altos corresponderían a zonas correspondientes a relleno sedimentario con mayor grado de fractura o con menor grado de consolidación.

También se puede observar de los valores de conductividad promedio presentados en la Tabla 6 que, en la gran mayoría de los escenarios, los valores de conductividad más bajos coinciden con las capas inferiores del acuífero (zonas 4, 5, 6 y 8), mientras que los valores de conductividad más altos coinciden con las capas superiores (zonas 1, 2, 3 y 7), lo cual es congruente con el grado de compactación esperable del sedimento.

Respecto al rendimiento específico, los valores varían entre 1% y 15%, en la mayoría de los casos manteniéndose en 15%, observándose en general un bajo rango de variabilidad, con desviaciones estándar de 0% para las zonas 1 y 8 y una desviación estándar máxima de 5% para la zona 6 como se muestra en la Tabla 6.

Se observa entonces, que existe una sensibilidad mucho mayor de parte de la conductividad hidráulica a la calibración, y una sensibilidad baja de parte del rendimiento específico, el cual calibra en casi todos los casos en el porcentaje máximo del rango asignado.

Queda plasmado en estos resultados que en la mayoría de los casos se calibra un 15% de rendimiento específico, y un amplio rango de conductividad hidráulica, demostrando que esta última es la que tiene mayor relevancia al momento de calibrar el modelo, y que cuyos valores afectan en mayor proporción a los niveles simulados.

A continuación, en las Figura 10 y Figura 11 se muestran los rangos de dispersión experimentados por la conductividad hidráulica y rendimiento específico calibrados por Véliz (2018) en cada una de las 8 zonas del modelo.

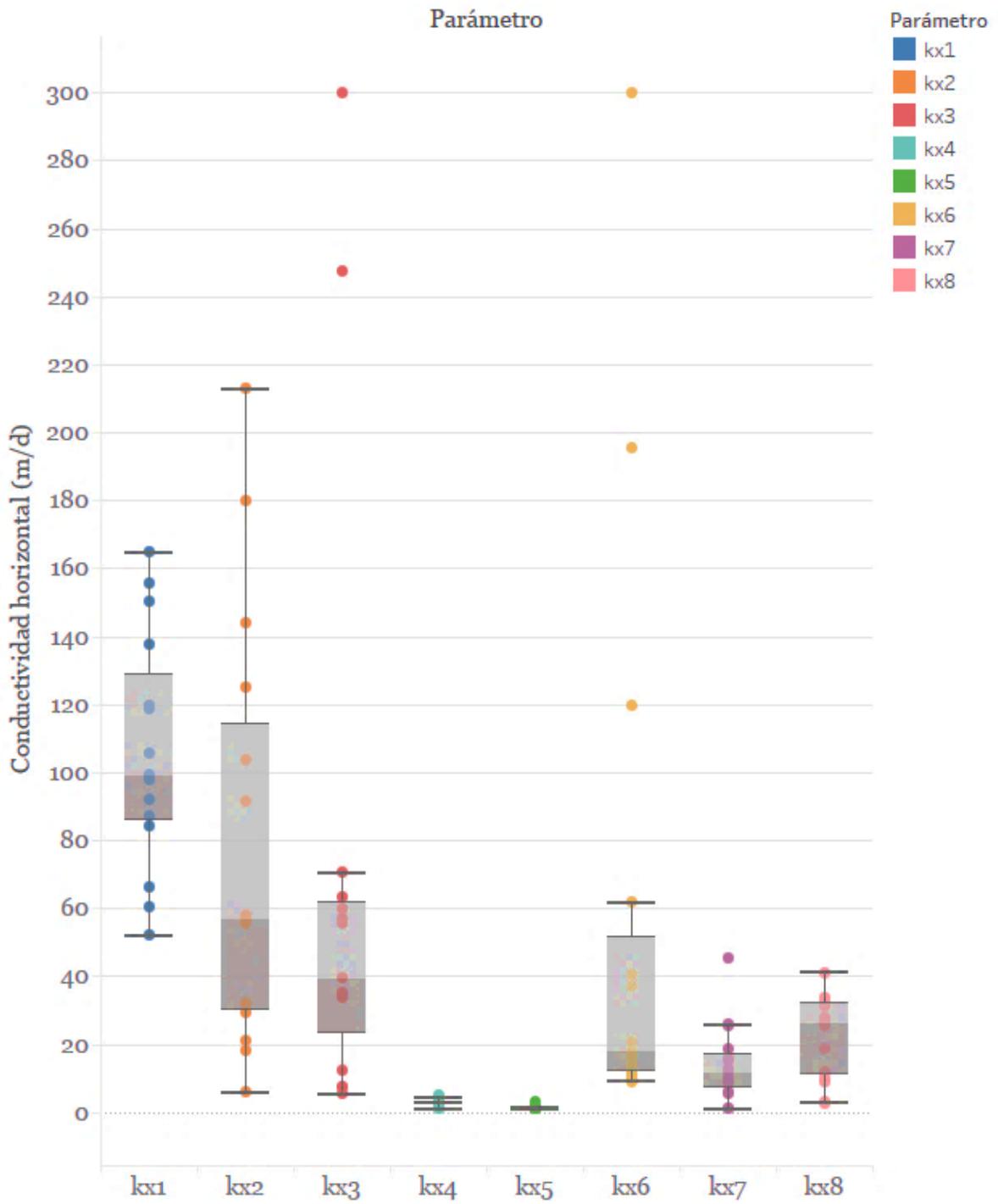


Figura 10. Diagrama de cajas conductividades horizontales calibradas de las 8 zonas. (Véliz, 2018).

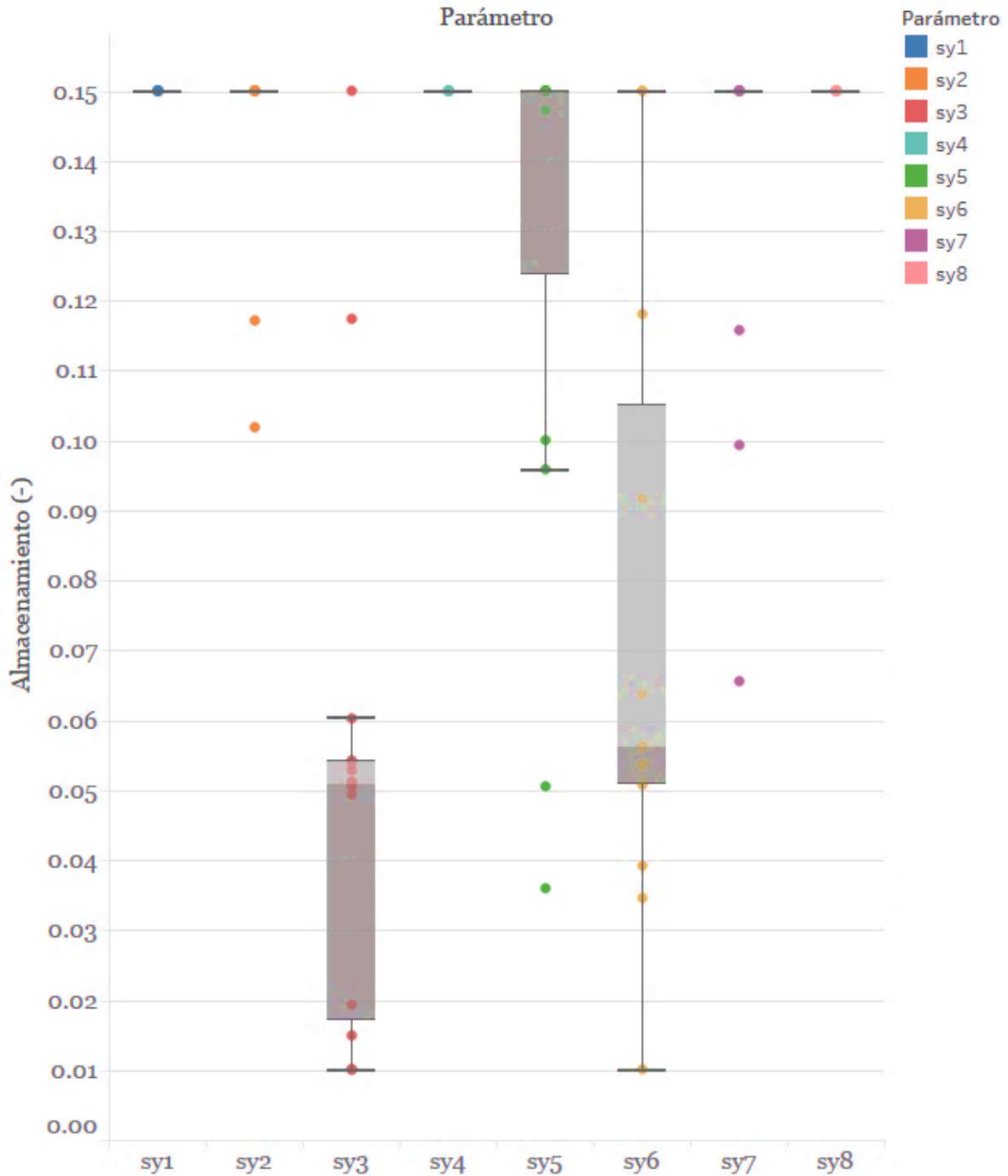


Figura 11. Diagrama de cajas coeficiente de almacenamiento de acuífero libre calibrados de las 8 zonas. (Véliz, 2018).

Los valores graficados fuera de los diagramas de cajas corresponden a aquellos apartados del cuerpo principal de datos, llamados “valores atípicos” y coinciden con los valores más apartados del cuerpo principal de datos, representando la alta variabilidad presente en algunos de los parámetros.

## 6.- ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE

A continuación, se procederá exponer el aporte realizado en el presente trabajo para el caso de estudio. Este trabajo corresponde a una continuación de aquel comenzado por Véliz, en donde se realizará un análisis de incertidumbre de los parámetros calibrados por Véliz, y modelos predictivos utilizando los modelos calibrados preexistentes.

### 6.1.- Evaluación de parámetros y recarga

En primer lugar, se realizaron simulaciones predictivas comparativas con la finalidad de determinar entre la recarga y los parámetros, cuál consiste en la mayor fuente de error en las variaciones de los resultados.

Se plantea que los parámetros corresponden al factor de variación de resultados de mayor envergadura que la recarga, y para demostrarlo se realizaron simulaciones predictivas, utilizando el programa Groundwater Vistas, efectuando variaciones en las 15 series calibradas por Véliz (2018) y utilizando el índice de error NRMS para comparar el nivel de error asociado a cada variación.

Una primera variación consistió en conservar los parámetros utilizados en cada serie, y variar la recarga, de manera de utilizar una única tasa de recarga en las 15 simulaciones predictivas (la recarga utilizada se obtuvo promediando las 15 series de recarga originales), obteniendo 15 series con una recarga única y sets de parámetros independientes.

Y una segunda variación residió en la conservación de las 15 tasas de recargas originales en cada uno de los modelos, y una variación de los sets de parámetros calibrados, utilizando un único set de conductividades y rendimiento específico para las 15 simulaciones predictivas (al igual que con la recarga, este set de parámetros se obtuvo al promediar por zona los 15 set parámetros utilizados en el modelo, este promedio es presentado en la Tabla 6), obteniendo 15 series con un set de parámetros único y recargas independientes.

#### Resultados

Se obtuvo una primera variación donde se modifica el modelo original a un modelo con una única recarga promediada; y una segunda variación en donde se modifica a un modelo con un único set de parámetros promediado.

Ambas variaciones fueron realizadas exclusivamente con el objetivo de realizar un análisis comparativo de los efectos producidos al realizar variaciones de la recarga y de los parámetros sobre los resultados, es decir, comparar qué variable genera un mayor rango de error en los resultados, por lo tanto, el valor de interés obtenido de los resultados de las simulaciones corresponde al índice de error NRMS, para cada una de las 30

simulaciones realizadas (15 variando los parámetros y 15 variando la recarga), cuyos resultados se grafican en la Figura 12, en la que se comparan los valores NRMS obtenidos para ambas variaciones efectuadas, con el valor NRMS obtenido de las simulaciones con los valores de recarga, conductividad hidráulica y rendimiento específico utilizados en la calibración original.

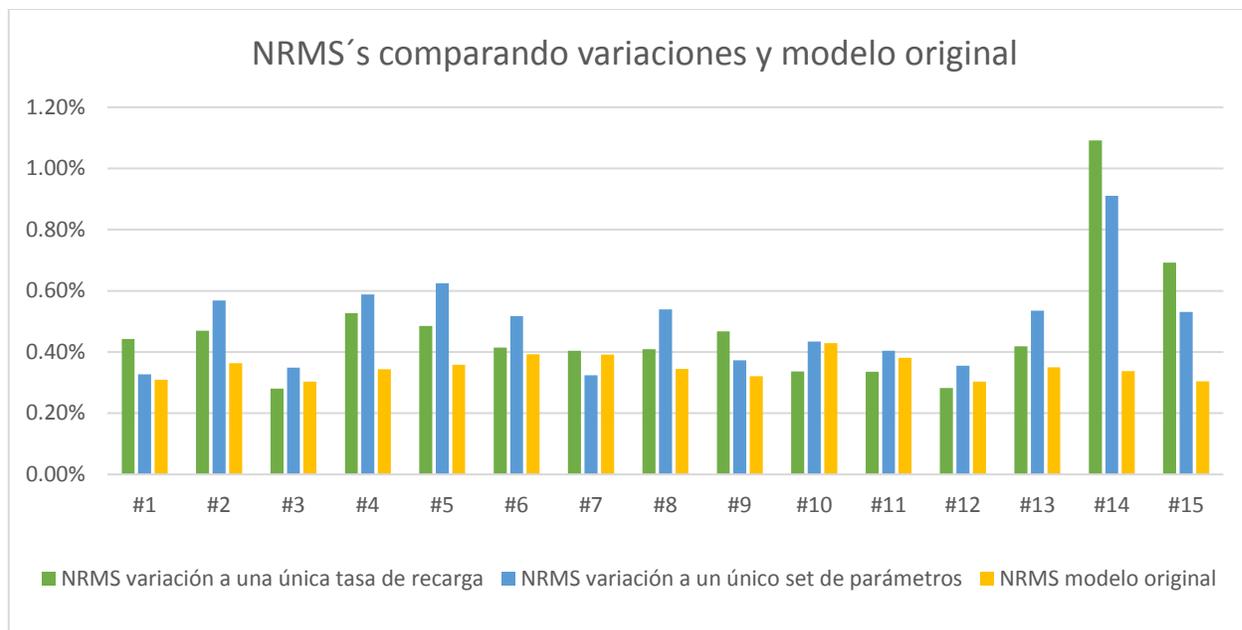


Figura 12. Gráfico comparativo de error NRMS entre las distintas variaciones realizadas.

Se observa que en general las variaciones producen un incremento en el error, especialmente en la serie #14, además se puede ver que, en gran parte de los casos, una variación a un único set de parámetros incide más en el grado de error que una variación a un único set de recarga.

## 6.2.- Análisis de incertidumbre paramétrica

Como se mencionó en la sección 3.7., el análisis de incertidumbre es realizado posteriormente a la obtención del modelo calibrado, con la finalidad de evaluar los rangos paramétricos en los cuales puede variar cada zona del modelo.

Para este análisis se utilizará una única serie de las 15 calibradas por Véliz, específicamente la serie #14, debido a que corresponde a la serie con la menor tasa de recarga promedio y además la que presenta mayor variación de NRMS al varia recarga y parámetros.

En esta serie se comparará la varianza previa y la varianza posterior a la calibración del modelo para los parámetros utilizados en la calibración (conductividad hidráulica y rendimiento específico), utilizando los rangos teóricos de variación de estos parámetros,

presentados en la Tabla 4, y obteniéndose los rangos en los cuales puede variar la serie ya calibrada.

La finalidad del análisis de incertidumbre reside en observar la sensibilidad de estos parámetros posteriormente a la calibración, es decir, si el nuevo rango de variación se acota a un rango muy pequeño, quiere decir que el parámetro es muy sensible a la calibración, y si el rango se mantiene relativamente igual, es poco sensible a la calibración.

## Resultados

Como se presentó previamente en la Tabla 4, se tiene un amplio rango teórico dentro del cual pueden variar los parámetros utilizados en la calibración del modelo, en donde teóricamente la conductividad hidráulica en este modelo puede adquirir valores entre 1 a 300  $m/d$  y el rendimiento específico puede variar entre 1% y 15%. Pero, una vez calibrado el modelo, se pueden realizar análisis para determinar los nuevos rangos de variación para ambos parámetros.

De la serie #14, se observa en la Figura 13 los valores ingresados al modelo previo a la calibración de este (puntos en color morado), junto con los rangos de variación teórica de la conductividad. Debido a que la conductividad hidráulica tiene una distribución log-normal, el Eje Y se presenta en escala logarítmica, en donde 30  $m/d$  corresponde al valor medio de la distribución y, por tanto, el valor ingresado al modelo previo a la calibración, y el rango 1-300  $m/d$  responde a la varianza previa.

Posteriormente, se realiza la calibración y se vuelve a calcular la varianza experimentada por los parámetros, obteniendo el gráfico que se observa en la Figura 14, en el cual se puede notar que presenta los valores calibrados por Véliz para la serie #14 en color morado, y la variación que estos pueden presentar dentro de un rango calibrado.

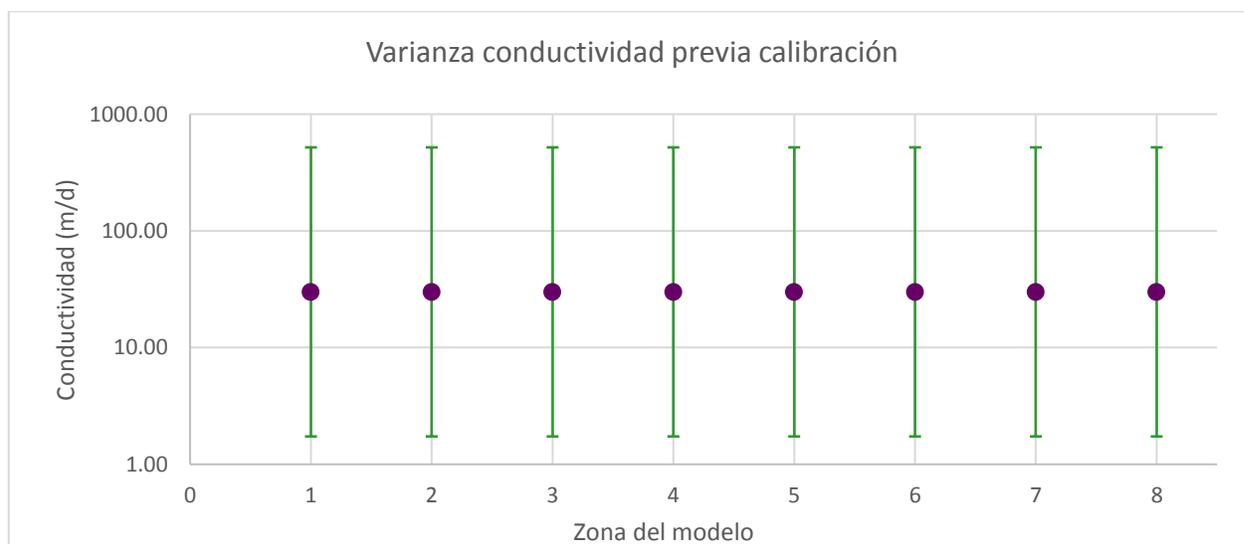


Figura 13. Varianza parámetro conductividad hidráulica previa a la calibración del modelo. Rango de valores teóricos de conductividad.

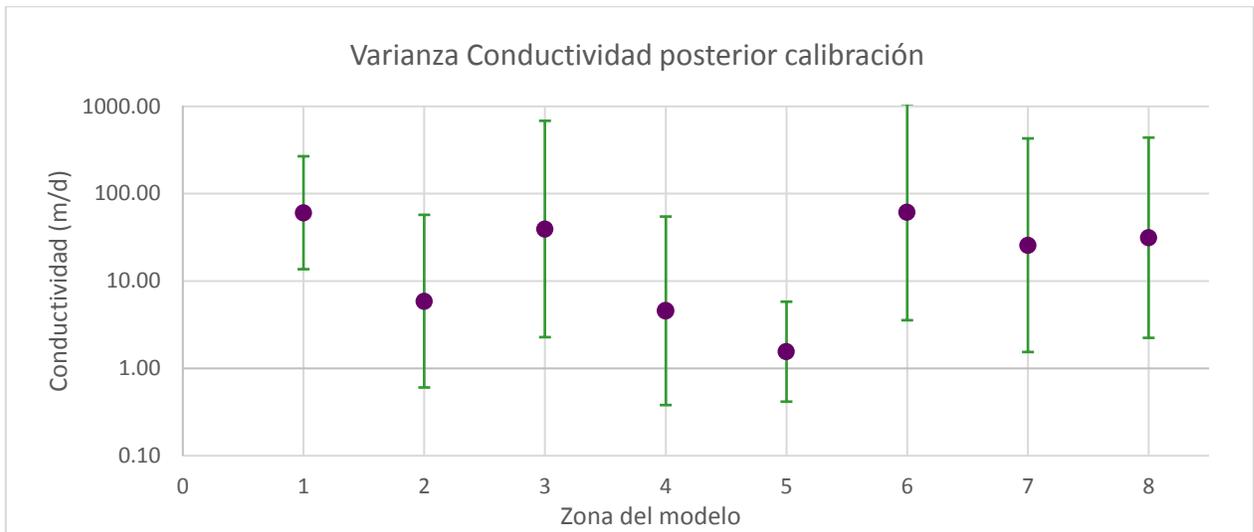


Figura 14. Varianza parámetro conductividad hidráulica posterior a la calibración del modelo. Valores en morado corresponden a los valores calibrados para la serie #14.

El mismo análisis se realizó para el parámetro de rendimiento específico, para el cual en la Figura 15 se presenta la varianza previa a la calibración, observándose el rango teórico utilizado por Véliz (2018) para el rendimiento específico, el cual varía entre 1% y 15%. Y finalmente en la Figura 16 se presentan los resultados obtenidos para la varianza posterior a la calibración. Se observa que este parámetro también presenta una distribución log-normal.

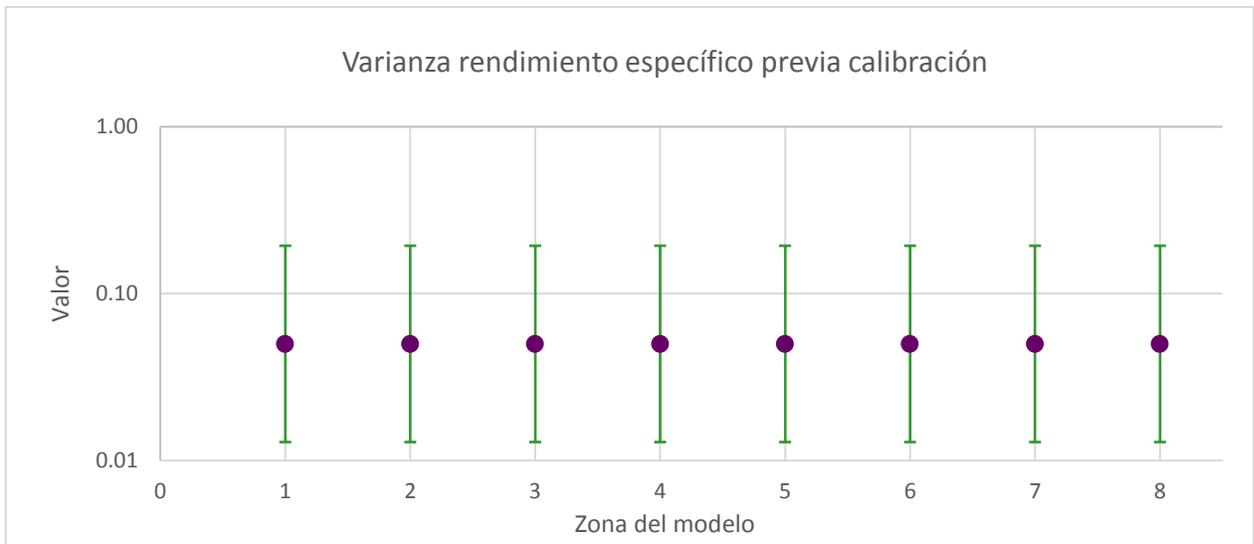


Figura 15. Varianza parámetro rendimiento específico previa a la calibración del modelo. Rango de valores teóricos de rendimiento específico.

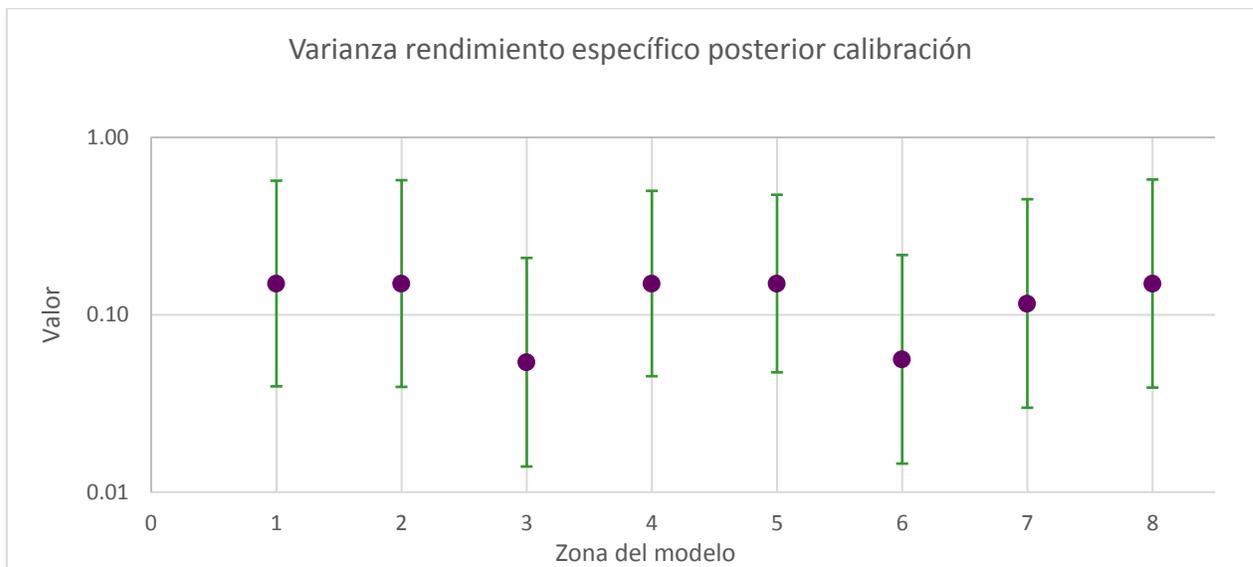


Figura 16. Varianza parámetro rendimiento específico posterior a la calibración del modelo. Valores en morado corresponden a los valores calibrados para la serie #14.

Como se presenta en los gráficos, existe en los resultados una menor sensibilidad a la calibración en el rendimiento específico que en la conductividad hidráulica.

Estos resultados son similares a los obtenidos por Véliz (2018) en el proceso de calibración, en el cual, utilizando 15 series y comparando los resultados, obtuvo rangos dentro de los cuales se observa que varían los parámetros, como se muestra en la Figura 10 y la Figura 11.

A diferencia de los resultados obtenidos por Véliz, en este caso se utiliza una única serie de recarga, específicamente la serie de recarga con la menor tasa de recarga del sistema, obteniéndose rangos para la conductividad hidráulica que en algunos casos son similares a los obtenidos por Véliz, por ejemplo, en la zona 5 se acota significativamente el rango en ambos resultados y para las zonas 3 y 6 en ambos casos se obtienen las varianzas que incluyen los valores más altos del rango aceptado. Y que en otros casos varían, obteniéndose a través de esta metodología rangos más amplios de variaciones que los obtenidos por Véliz.

Por otro lado, respecto al rendimiento específico, los resultados obtenidos por Véliz tienen una varianza muy acotada al considerar las 15 series de recarga, en cambio, los resultados obtenidos en el análisis de incertidumbre, presentan una varianza casi igual de amplia que la presentada en el rango teórico.

Posiblemente este parámetro se ajuste mejor con otras tasas de recarga, debido a que al disminuir la tasa de recarga, aumenta la influencia que tiene el almacenamiento en los resultados, se debiese probar con un valor más bajo en la tasa de recarga, si este parámetro logre calibrar un rango más acotado de varianza posterior a la calibración.

### 6.3.- Exploración de la incertidumbre predictiva

A continuación, se simulará el periodo posterior al año 2014, (año en que termina la calibración del modelo realizado por Véliz), en donde se modelarán dos escenarios futuros para cada una de las 15 series, obteniendo como resultados los valores de cota hidráulica y flujos subterráneos predichos, acorde a los estreses aplicados al acuífero (bombeo) y a partir de estos resultados, realizar comparaciones y analizar el efecto de las variaciones de los parámetros antes mencionados en las predicciones del modelo y el nivel de confianza de los resultados de las mismas.

Para ambos escenarios se impuso una duración de la predicción de 25 años, a partir de enero del año 2015 (año siguiente al fin de la calibración del modelo) y hasta el primero de enero del año 2040, con el fin de obtener así una proyección de los niveles y flujos esperables en la cuenca en los años mencionados.

Además, se utilizarán periodos de estrés de escala mensual, al igual que los utilizados en la etapa de calibración, por lo que para los 25 años de simulación se tendrán un total de 300 periodos de estrés.

Escenario 1: Consiste en pruebas de simulación predictiva utilizando los resultados de los 15 modelos numéricos realizados y calibrados por Véliz (2018) en la zona de estudio, sin efectuar modificaciones, con el fin de analizar las predicciones resultantes para cada uno de los escenarios futuros.

Escenario 2: Se realizará un segundo escenario con la finalidad de obtener nuevos análisis aplicando modificaciones en el modelo original: cambios en la tasa de recarga e implementación de pozos de bombeo en el sector, con el fin de analizar los caudales de agua que podrían ser bombeados y analizando cómo su aplicación podría afectar a la incertidumbre del modelo.

Para la realización de estas simulaciones se utilizará igualmente el software Groundwater Vistas, utilizando la misma versión de MODFLOW utilizada por Véliz: MODFLOW-USG.

#### 6.3.1.- Primer escenario de simulación, sin pozos de bombeo

El primer escenario de simulación predictiva realizado tiene como finalidad observar las variaciones de cota hidráulica que se producen al simular los distintos valores calibrados de conductividad hidráulica y rendimiento específico en cada serie de recarga, para luego analizar estas variaciones, y discutir si tienen un efecto importante en los diferentes resultados que se obtendrán con cada set.

En primer lugar, se deben ingresar al modelo las tasas de recargas esperadas en el acuífero a escala mensual para los 25 años de predicción. Este paso se realizará modificando las tasas de recarga ingresadas por Véliz (2018) en cada una de las 15 series, ingresando como tasa de recarga predictiva los valores promedios mensuales para cada mes de los 20 años que dura la calibración, vale decir, se tomarán todas las recargas del acuífero correspondientes a un mes determinado entre los años 1990-2014, se promediarán dichos

valores y el promedio obtenido corresponderá a la recarga impuesta para el mes designado entre los años 2015-2040.

Este proceso se repetirá para cada mes, y se obtendrá como resultado una serie de recarga nueva con periodicidad anual para cada una de las 15 series, como se exhibe en las Figura 17, Figura 18 y Figura 19.

## Gráfico Recarga Anual

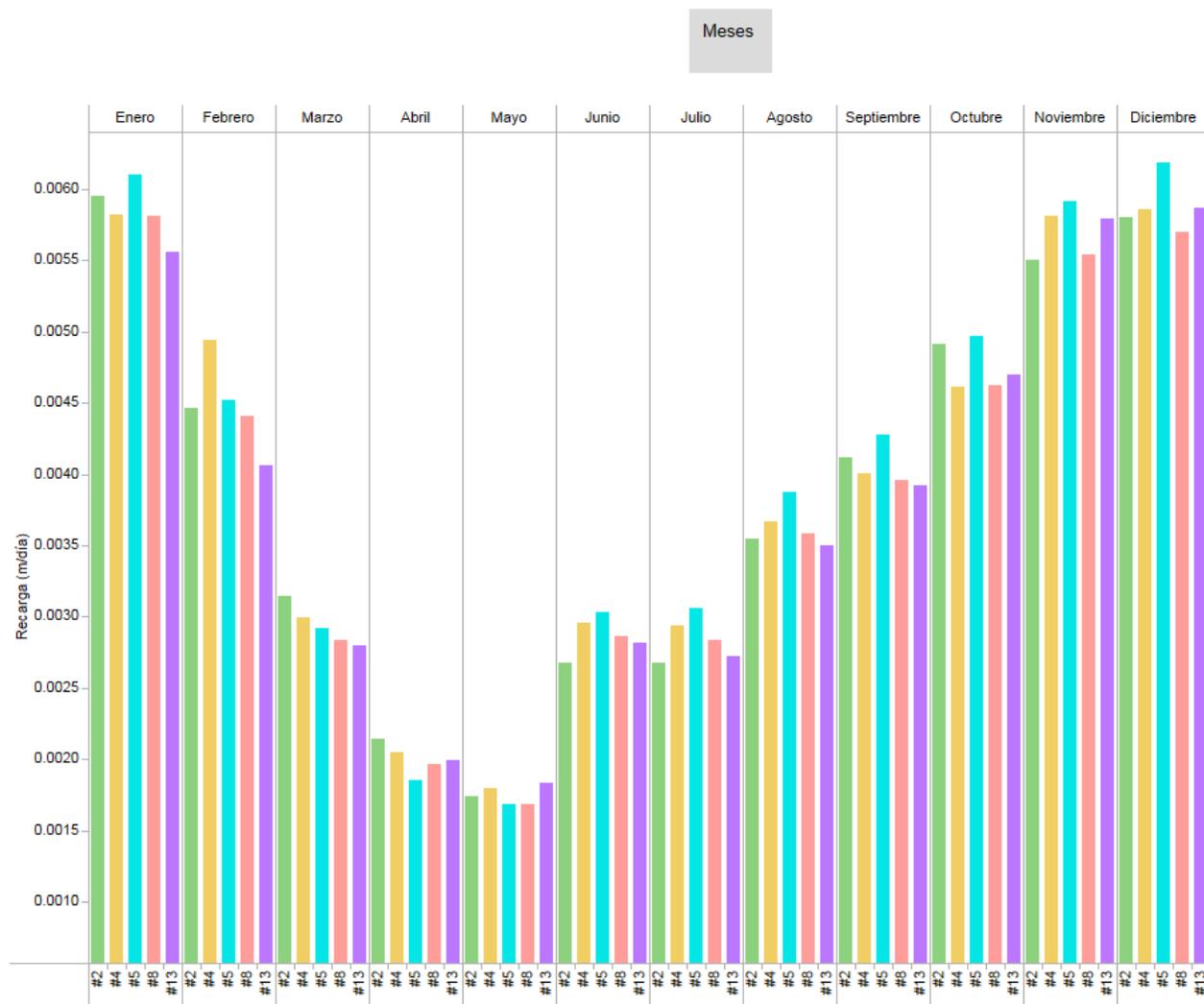


Figura 17. Valores recarga ingresada en simulación predictiva a escala mensual para series #2, #4, #5, #8 y #13. Elaboración propia.

# Gráfico Recarga Anual

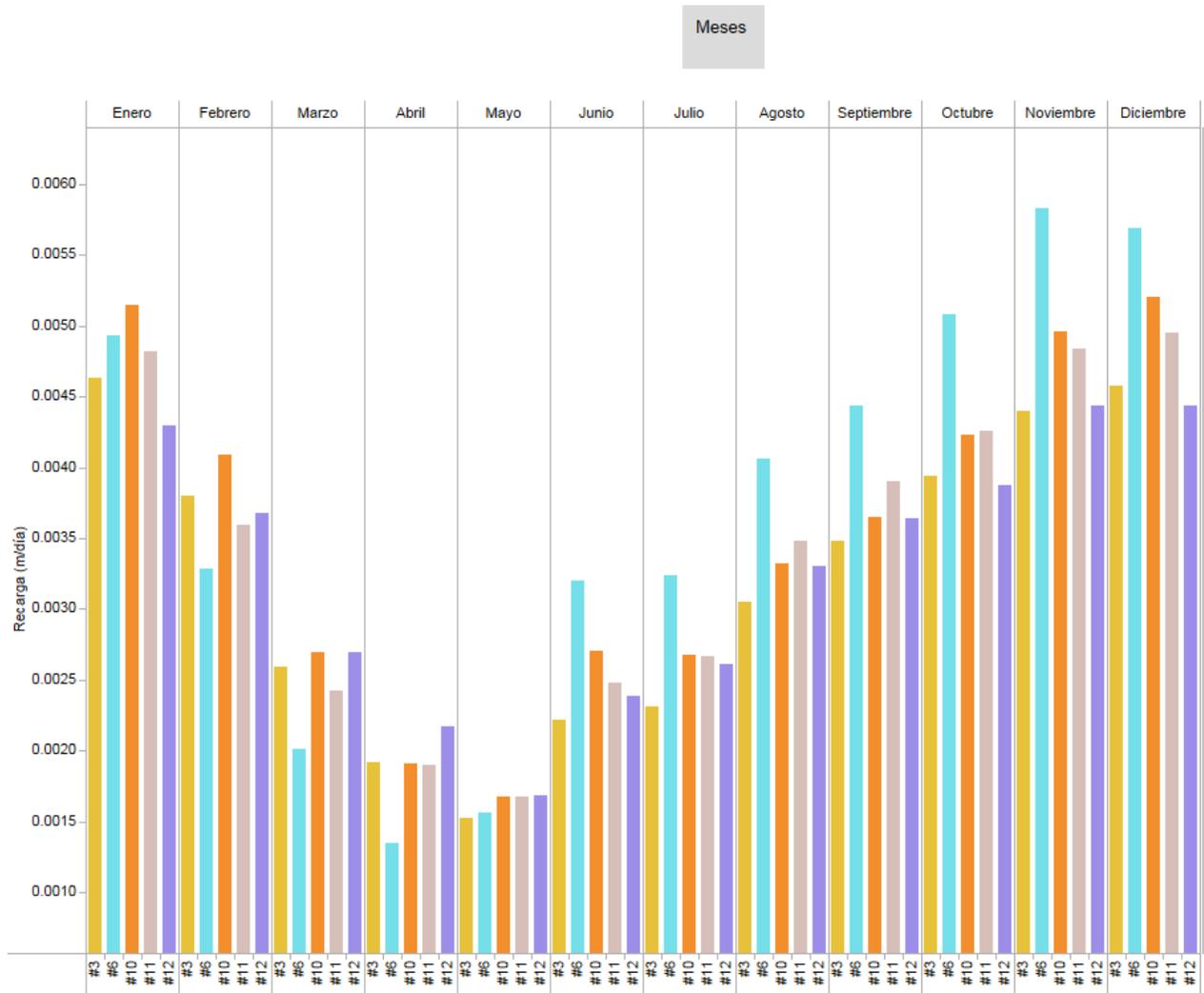


Figura 18. Valores recarga ingresada en simulación predictiva a escala mensual para series #3, #6, #10, #11 y #12. Elaboración propia.

## Gráfico Recarga Anual

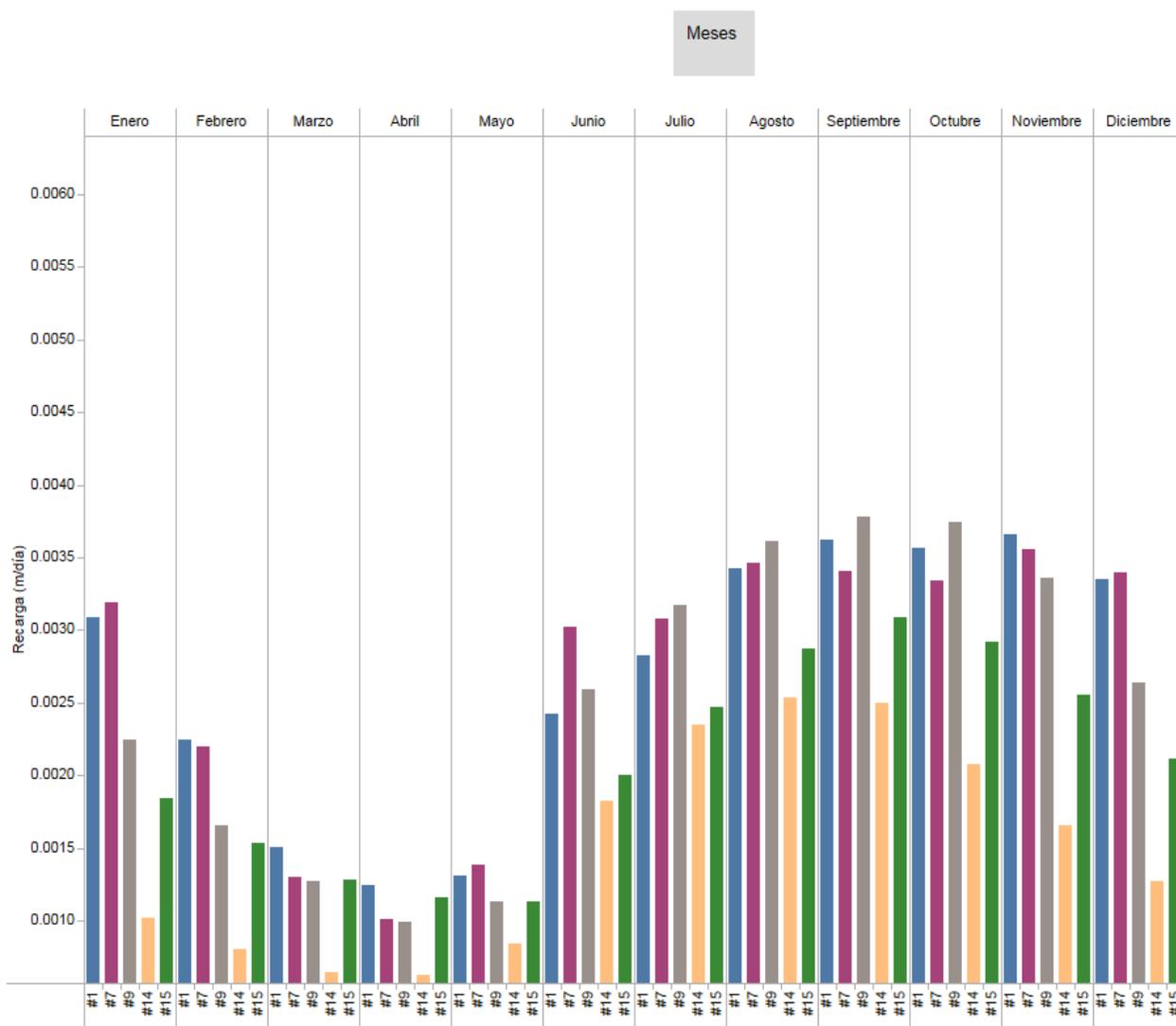


Figura 19. Valores recarga ingresada en simulación predictiva a escala mensual para series #1, #7, #9, #14 y #15. Elaboración propia.

Se observa de estos gráficos una mayor tasa de recarga al acuífero en los meses de octubre a enero, lo que asocia al sistema a un comportamiento nivo-pluvial, es decir, los mayores aportes de agua se presentan a partir de la primavera con el derretimiento de las nieves.

En segundo lugar, se realiza otra adición al modelo original, agregando seis puntos de observación repartidos espacialmente como se aprecia en la Figura 20, además de los dos pozos ya existentes. Estos puntos de observación tienen la finalidad de ser sitios de los cuales se pueden extraer del modelo datos simulados de cota hidráulica a escala mensual.

Los puntos de observación agregados corresponden a los puntos N1, N2, N3, N4, N5 y N6 presentados en la Figura 20; por otro lado, los puntos AC y AS corresponden a los pozos de observación existentes en el acuífero.

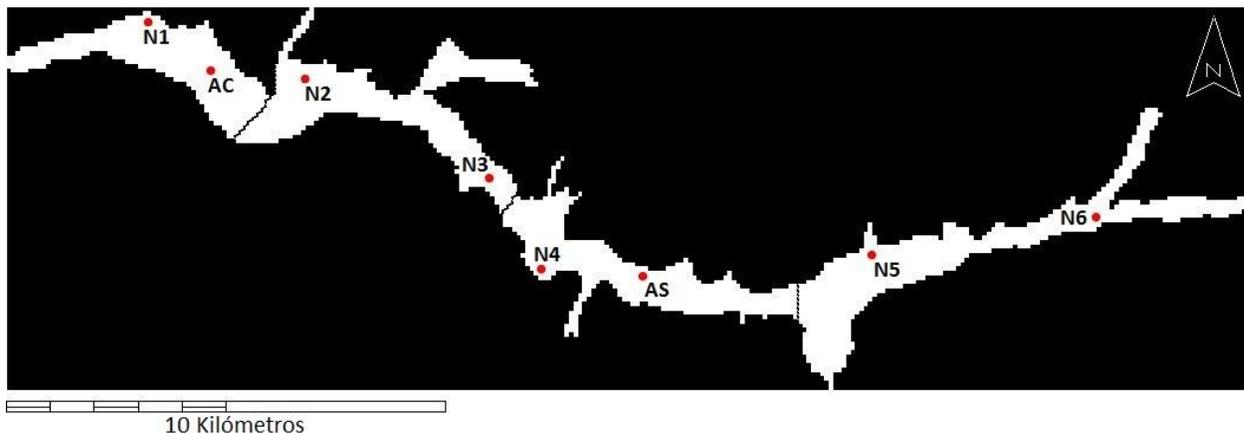


Figura 20. Posición de los pozos y los puntos de observación dispuestos en el modelo. Elaboración propia.

Finalmente, una vez ingresados los datos de recarga actualizados, tiempo a simular y puntos de observación, se procede a realizar las corridas predictivas de las 15 series ahora con características predictivas, cuyos resultados serán presentados a continuación.

### Resultados

En los gráficos a continuación se presentan los resultados de manera comparativa entre los niveles freáticos del acuífero para cada corrida, además del valor correspondiente al percentil 50 de los resultados obtenidos, a modo de comparación.

Para conseguir una mejor visualización de los resultados, estos gráficos presentan únicamente los 5 primeros años de simulación (desde el primero de enero del 2015, hasta el 31 de diciembre del 2020) en lugar de los 25 años para los cuales se realizó esta.

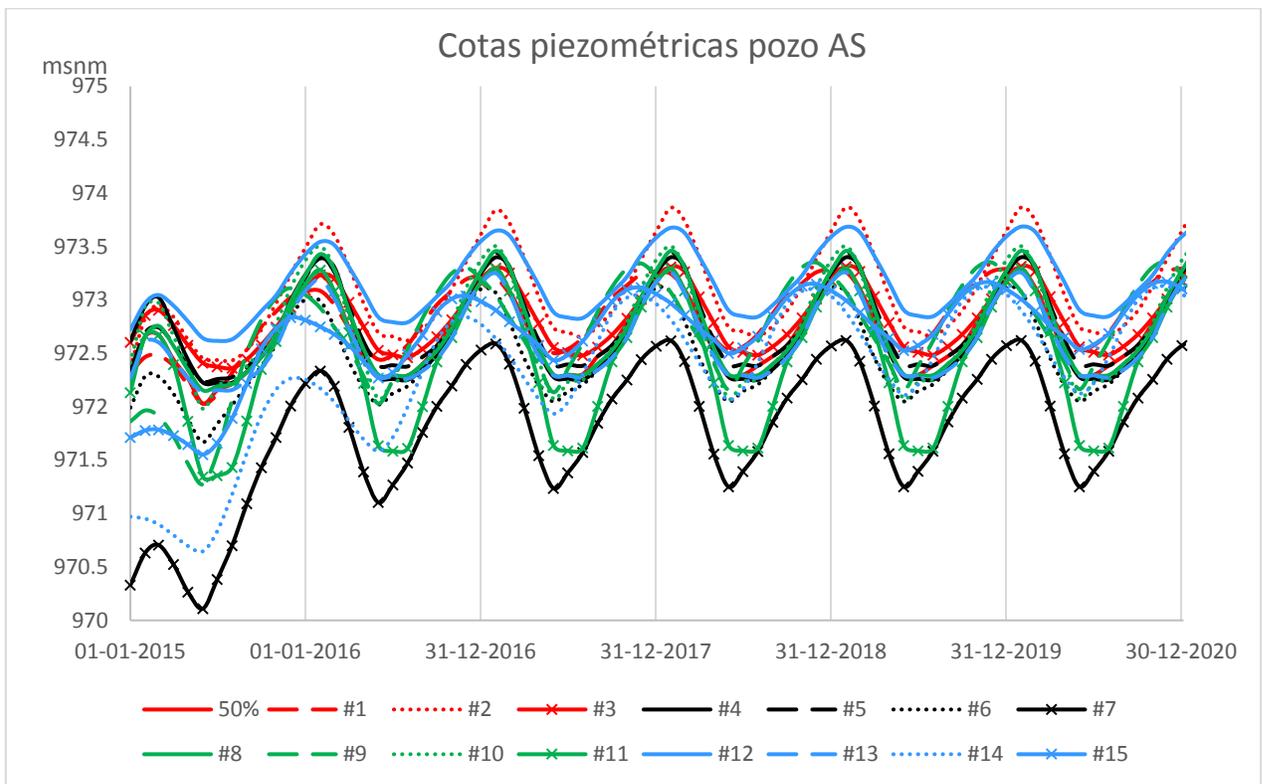


Figura 21. Gráfico de cotas piezométricas simuladas en pozo AS.

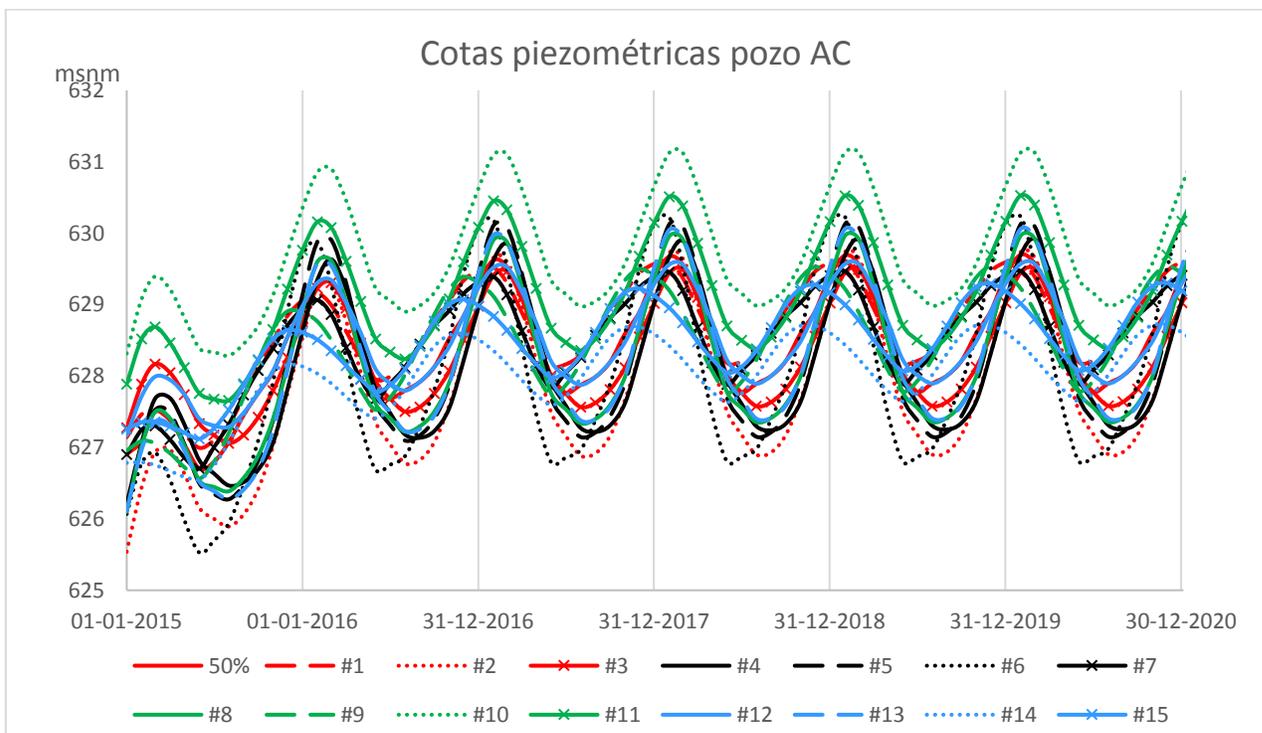


Figura 22. Gráficos de cota piezométrica simulada en pozo AC.

Para el caso de los pozos AC y AS, cuyos resultados se presentan en las Figura 21 Y Figura 22, se observa que las cotas piezométricas se mantienen muy similares en todas las series simuladas, con variaciones estacionales, como consecuencia de la tasa de recarga estacional ingresada.

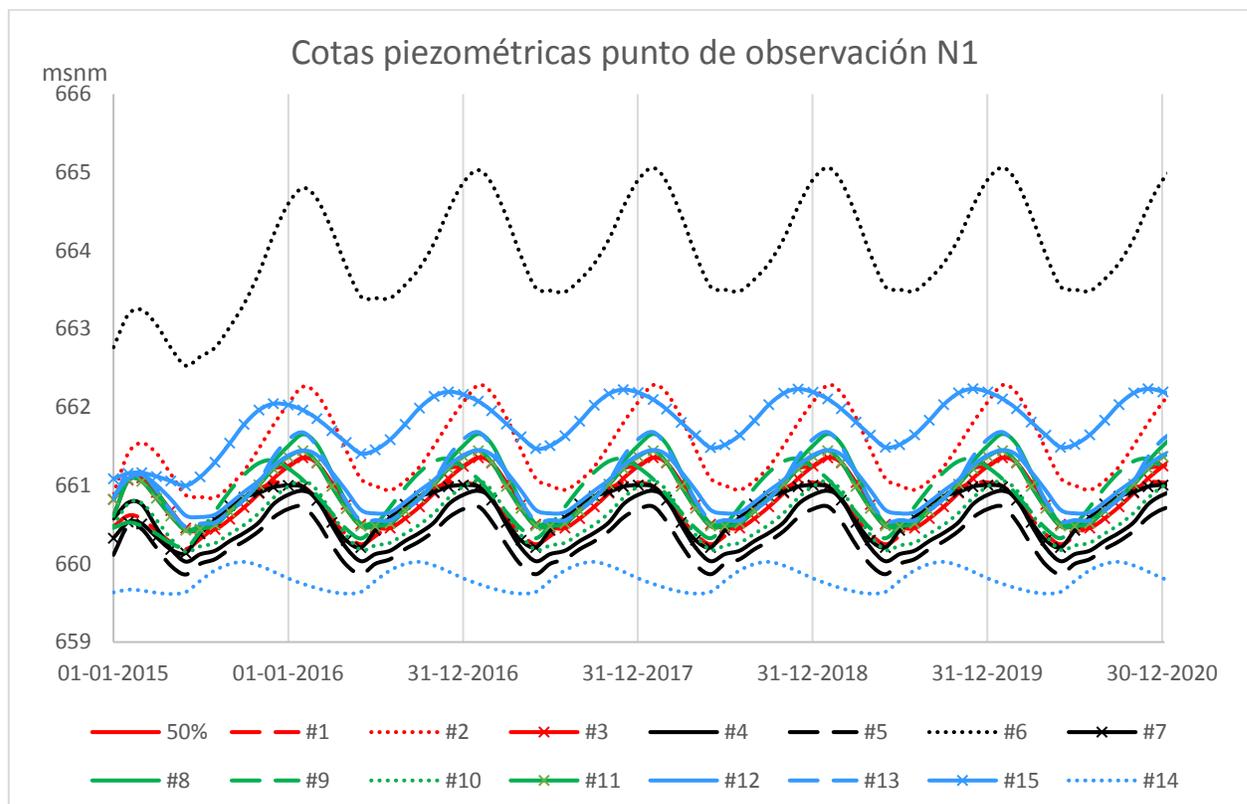


Figura 23. Cotas piezométricas simuladas en punto de observación N1.

De los resultados presentados en la Figura 23, se puede observar que los valores obtenidos en N1 son relativamente similares entre ellos, mostrando, en general, una variación poco notoria.

Este punto de observación se encuentra en la misma zona que el pozo AC, por lo tanto, los niveles piezométricos observados en N1 se encuentran influenciados por los parámetros calibrados en el pozo anteriormente mencionado.

Las excepciones a estos niveles similares corresponden a la serie #6, en la cual los niveles simulados se encuentran aproximadamente 4 metros sobre el nivel promedio, y a la serie #14, en donde los niveles se encuentran a aproximadamente un metro bajo el promedio simulado.

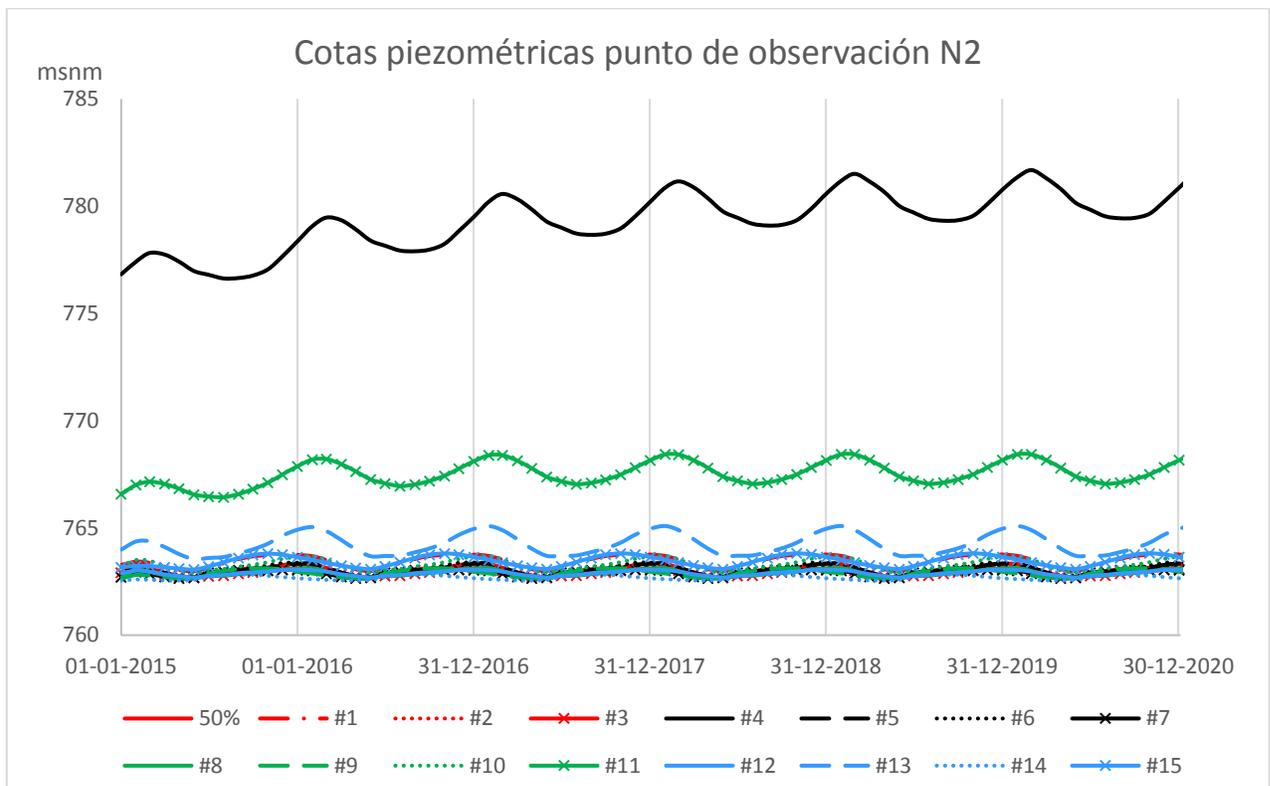


Figura 24. Cotas piezométricas simuladas en punto de observación N2.

La Figura 24 presenta los resultados de niveles simulados obtenidos en el punto de observación N2, el cual como se puede ver en el diagrama del modelo presentado en la Figura 20, se encuentra en una zona del modelo diferente a la del pozo AC, pero cuyos niveles debiesen ser influenciados por la calibración realizada en este punto.

A pesar de lo anterior, en este punto de observación se puede apreciar que la serie #4 se desvía notoriamente de los niveles observados en las demás series, mostrando niveles aproximadamente 12 metros sobre el promedio al igual que la serie #11, la cual se desvía aproximadamente 5 metros sobre el promedio simulado.

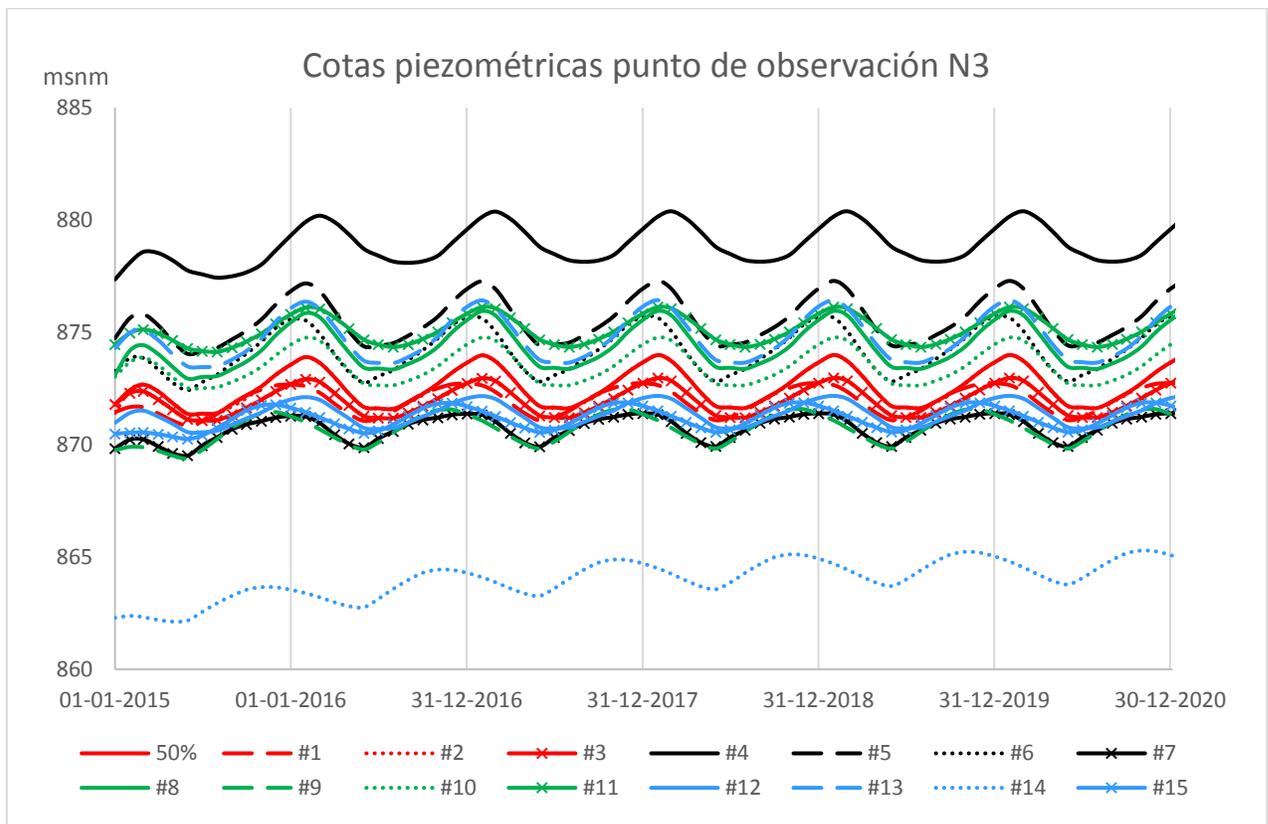


Figura 25. Cotas piezométricas simuladas en punto de observación N3

El punto de observación N3 (Figura 25) se ubica lejos de ambos pozos y en una zona diferente a ambos, por ende, no debiese ser igualmente afectado por la calibración realizada en los pozos.

Se puede observar una notoria variación de niveles entre las distintas series graficadas, presentándose fluctuaciones de hasta casi 15 metros entre los niveles de cota hidráulica obtenidos en cada prueba, siendo la serie #4 la que presenta simulaciones de niveles piezométricos más altos.

La serie #4 también presenta niveles notoriamente mayores que el resto en el punto de observación N2, coincide además que ambos puntos de observación (N2 y N3) se ubican en las mismas zonas del modelo (zona 7 y zona 8) como se puede ver en la Figura 20. Al mismo tiempo se tiene que la serie #4 responde a las menores conductividades presentes entre las 15 series en ambas zonas, presentadas en la Tabla 6.

Además, en el punto de observación N3, se muestra que los niveles simulados de la serie #14 se presentan por lo menos ocho metros por debajo del promedio, y por lo que se puede observar de la Tabla 6, esta serie contiene la menor recarga promedio ingresada.

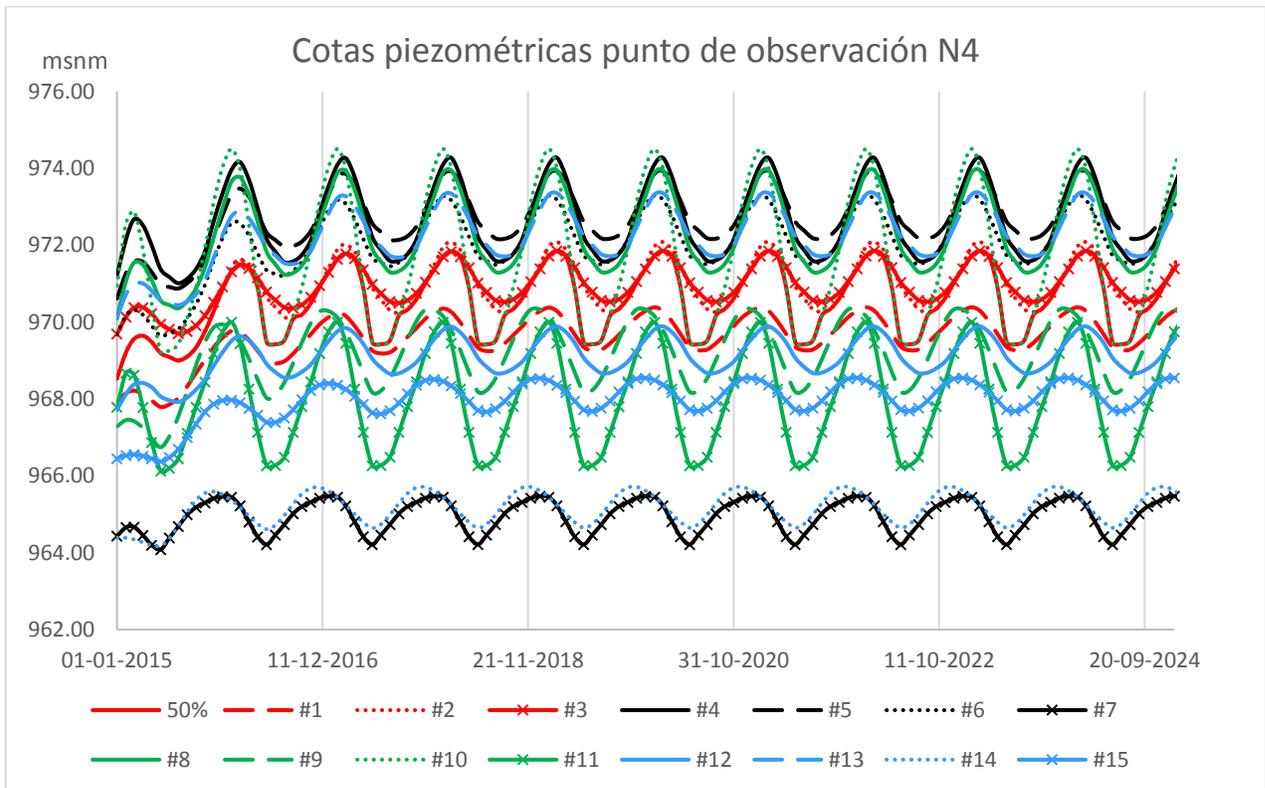


Figura 26. Cotas piezométricas simuladas en punto de observación N4.

Se presenta en la Figura 26 el gráfico con los resultados de la simulación obtenidos en el punto de observación N4, en este se pueden observar fluctuaciones del nivel piezométrico de hasta 10 metros entre cada serie, a pesar de ubicarse en la misma zona que el pozo AS.

Se observa que la serie #7 y la serie #14 muestran resultados similares, presentando ambos resultados ubicados aproximadamente dos metros bajo el promedio simulado.

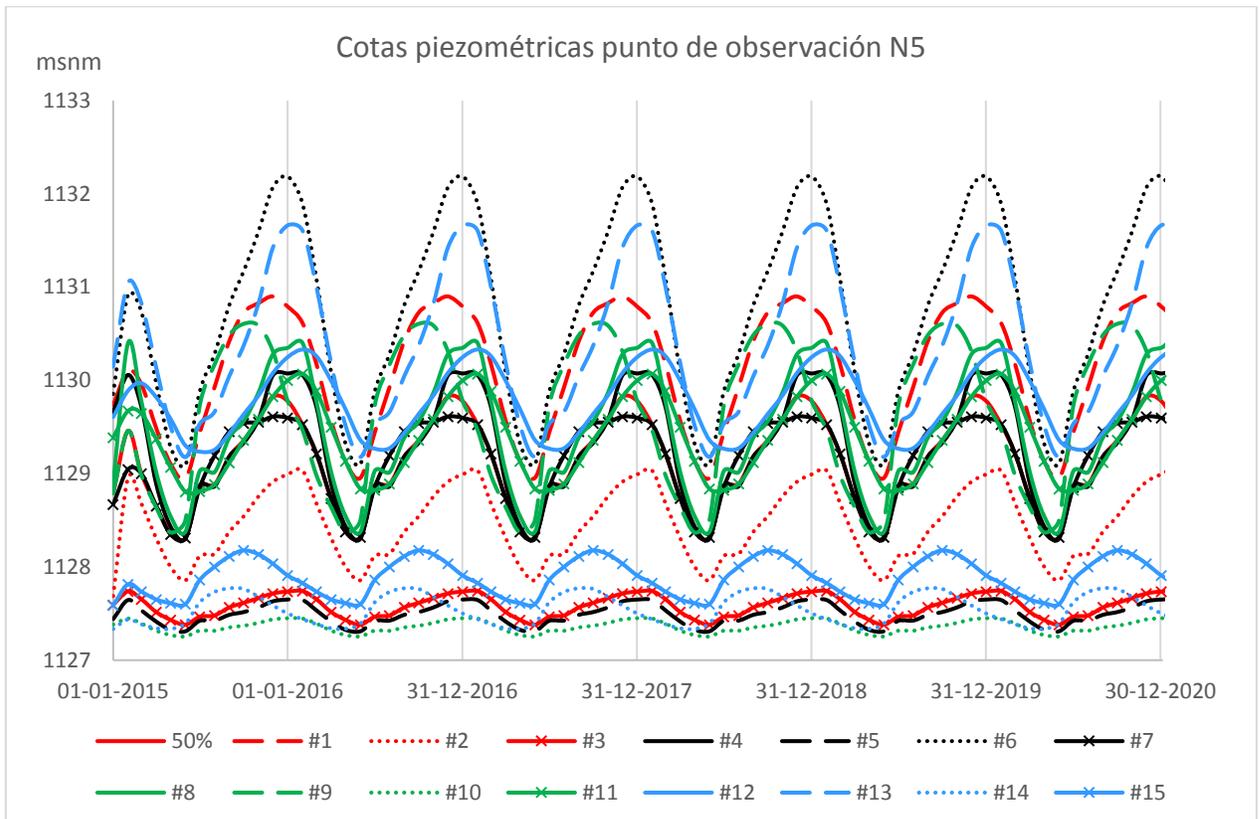


Figura 27. Cotas piezométricas simuladas en punto de observación N5.

En la Figura 27 se observan los resultados de niveles piezométricos simulados correspondientes al punto de observación N5, los cuales presentan fluctuaciones de alrededor de 7 metros entre los niveles piezométricos más bajos y más altos observados entre las diferentes series.

Se observa, además, que las series que simularon niveles piezométricos más bajos en este punto de observación, presentan menores fluctuaciones entre los máximos y los mínimos simulados, en cambio, las series que simularon mayores niveles piezométricos presentan fluctuaciones notoriamente mayores entre los niveles mínimos y máximos simulados.

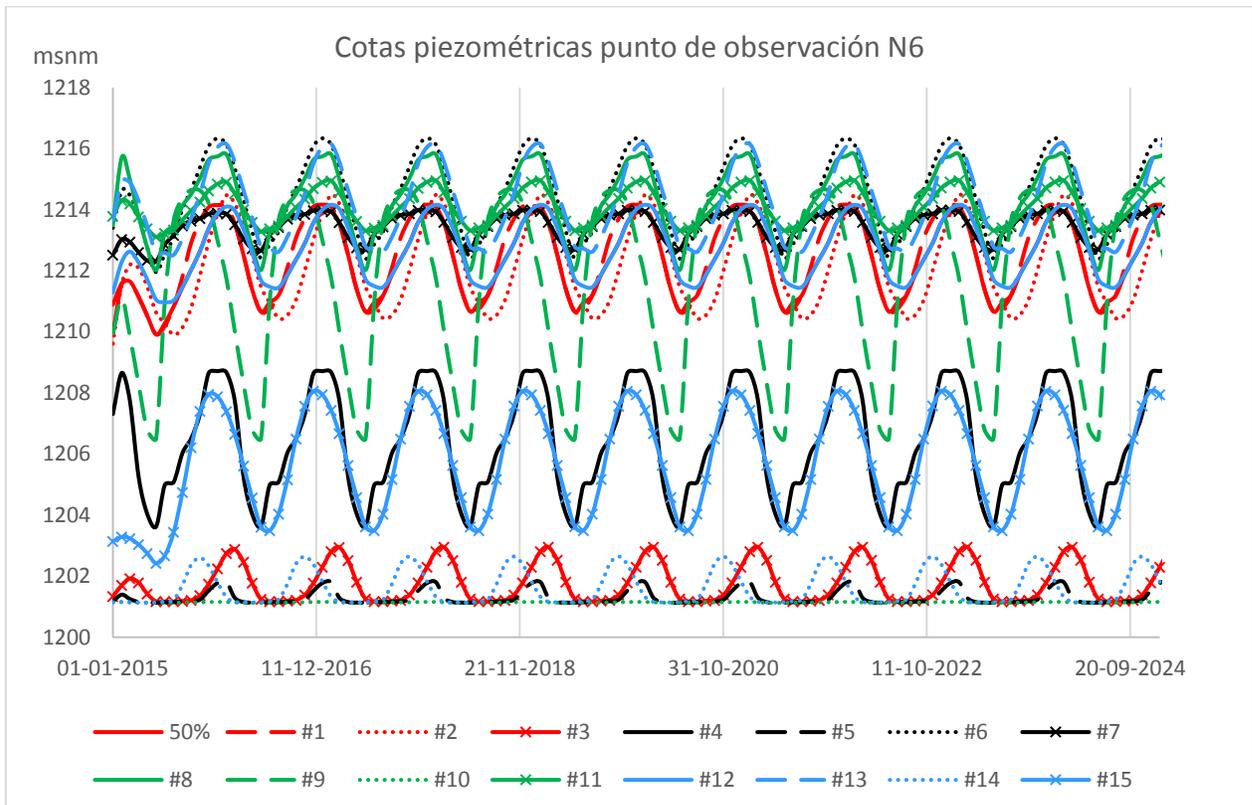


Figura 28. Cotas piezométricas simuladas en punto de observación N6.

Se presenta el punto de observación N6 en la Figura 28. Este corresponde al punto de observación ubicado en la zona más alta del río, como se observa en la Figura 20 y presenta una gran variación de cota hidráulica simulada entre las diferentes series, con un rango de aproximadamente 16 metros entre los niveles piezométricos simulados.

Presenta una distribución similar, pero con un rango más amplio de variación a los resultados expuestos en el punto de observación N5. Ya que en el punto N5 se observa un rango de variación de aproximadamente 7 metros, y en este punto de observación el rango de variación alcanza los 15 metros. Estos dos puntos de observación coinciden en que su ubicación se encuentra en las mismas zonas del modelo.

Finalmente, se tiene que las cotas piezométricas simuladas en los pozos AS y AC presentan un bajo rango de variación entre ellas, en cambio, en los puntos de observación situados aleatoriamente en el modelo (N1, N2, N3, N4, N5 y N6), se presenta una mayor variación de niveles simulados entre cada una de las series, mostrando diferencias de cota piezométrica de hasta aproximadamente trece metros, como se ve en el punto de observación N2 (Figura 24).

Cada una de estas series utiliza un conjunto de parámetros específico, los cuales influyen en las variaciones que presentan los niveles de agua subterránea.

### 6.3.2.- Segundo escenario de simulación, con pozos de bombeo

Para la realización del segundo escenario de simulación, se selecciona una única serie de recarga para los 15 sets de conductividad hidráulica y rendimiento específico presentados en la Tabla 6. La finalidad de este escenario consiste en aplicar un estrés al acuífero, utilizando pozos de bombeo, y observar las distintas respuestas entregadas al variar los parámetros de conductividad hidráulica y rendimiento específico.

Para la construcción de este escenario, en primer lugar, se debe elegir la serie de recarga que se utilizará. Para elegirla, se compararon los valores de error NRMS obtenidos por Véliz (2018) en sus resultados, utilizando aquella recarga que presentara un menor índice NRMS, correspondiente, como se observa en la Tabla 7, a la serie #15, con un NRMS de 0.42% y una recarga promedio de 732.4 litros por segundo, la cual corresponde a la segunda tasa recarga más baja calibrada.

La serie #15 se ingresa al igual que se ingresaron las series predictivas del caso anterior, promediando las recargas correspondientes a cada mes del modelo, resultando igualmente en una recarga periódica anual y aplicando el valor de recarga en cada uno de los 15 sets de parámetros anteriormente calibrados.

En segundo lugar, se comprueba que todos los escenarios a simular se encuentren calibrados con esta nueva serie de recarga. Al obtener los resultados de la simulación para las 15 series, se calculan los valores NRMS para cada una de las series generadas, con la finalidad de constatar que el grado de error generado en cada corrida al cambiar el valor de la recarga ingresada se mantiene dentro del rango de error aceptable para un modelo considerado como calibrado, obteniendo los resultados de índices NRMS mostrados a continuación en la Tabla 8.

Tabla 7. Valores de índice NRMS obtenidos en la calibración por Véliz (2018), junto con las recargas ingresadas en la calibración para cada serie.

<b>Número serie</b>	<b>Valor NRMS</b>	<b>Recarga promedio (l/s)</b>
<b>#1</b>	<b>0,54%</b>	<b>945,5</b>
<b>#2</b>	<b>0,61%</b>	<b>1366</b>
<b>#3</b>	<b>0,47%</b>	<b>1125</b>
<b>#4</b>	<b>0,64%</b>	<b>1387</b>
<b>#5</b>	<b>0,68%</b>	<b>1417</b>
<b>#6</b>	<b>0,78%</b>	<b>1309</b>
<b>#7</b>	<b>0,67%</b>	<b>948</b>
<b>#8</b>	<b>0,61%</b>	<b>1340</b>
<b>#9</b>	<b>0,52%</b>	<b>886,3</b>
<b>#10</b>	<b>0,67%</b>	<b>1237</b>
<b>#11</b>	<b>0,63%</b>	<b>1200</b>
<b>#12</b>	<b>0,46%</b>	<b>1147</b>
<b>#13</b>	<b>0,66%</b>	<b>1334</b>
<b>#14</b>	<b>0,44%</b>	<b>533,4</b>
<b>#15</b>	<b>0,42%</b>	<b>732,4</b>

Tabla 8. Valores NRMS obtenidos de la simulación predictiva al cambiar las recargas de los modelos.

<b>Número serie</b>	<b>Valor NRMS</b>
<b>#1</b>	0,37%
<b>#2</b>	1,02%
<b>#3</b>	0,68%
<b>#4</b>	1,28%
<b>#5</b>	1,06%
<b>#6</b>	0,95%
<b>#7</b>	0,58%
<b>#8</b>	0,97%
<b>#9</b>	0,34%
<b>#10</b>	0,58%
<b>#11</b>	0,79%
<b>#12</b>	0,65%
<b>#13</b>	1,05%
<b>#14</b>	0,43%
<b>#15</b>	0,28%

El rango de error aceptable corresponde a un valor NRMS menor a un 5% (SEA, 2012), por lo tanto, para este escenario todos los valores obtenidos caen dentro del rango de error aceptado, comprobando de esta manera que, al cambiar la recarga original de los modelos a la recarga impuesta, estos continúan calibrados y, por lo tanto, se pueden realizar las pruebas de bombeo con la nueva configuración de recarga.

Luego, se procede a ubicar los pozos de bombeo en el modelo, los cuales superficialmente se presentan en la zona 3 y en profundidad intersectan la zona 6, dispuestos en la ribera del río Rapel, como se presenta en la Figura 29.

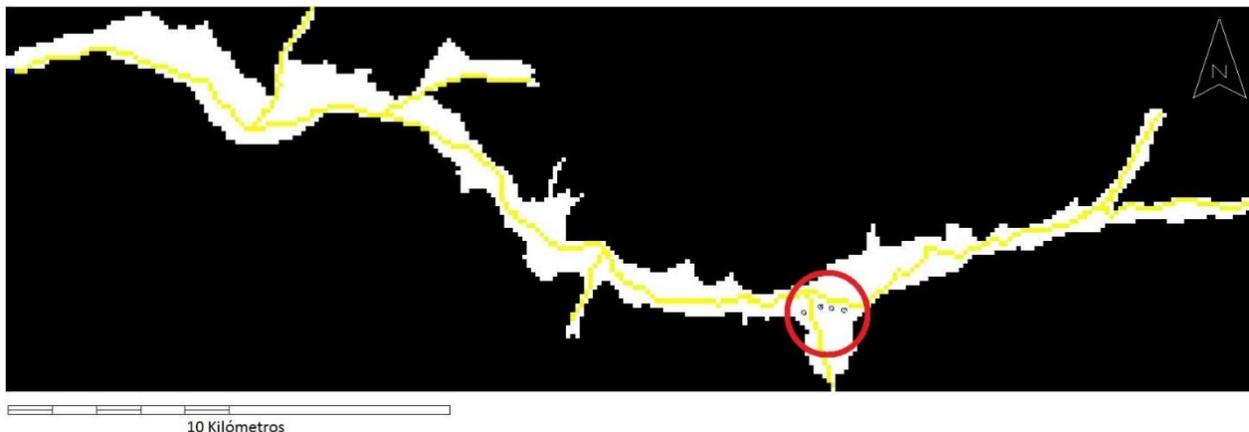


Figura 29. Modelo numérico incluyendo los cuatro pozos de bombeo impuestos en las zonas 3-6, marcados en un círculo rojo. Elaboración propia.

Finalmente, se calcula la tasa máxima bombeable considerando la ubicación espacial de los pozos en el sistema, posicionados a aproximadamente 7 kilómetros del límite oriental, en el sitio correspondiente a aproximadamente un cuarto del largo total del acuífero, en el cual el agua se desplaza de este a oeste y cuya recarga es uniforme en todo el modelo, por lo tanto, la cantidad máxima que debiesen ser capaz de extraer los pozos corresponde a alrededor de 25% de la recarga total del sistema, correspondiente a la cantidad de agua máxima que debiese atravesar esa zona del acuífero.

Para la tasa de recarga impuesta en este escenario, un 25% de la recarga se traduce en 16.000 m<sup>3</sup>/día, los que deben ser repartidos en los 4 pozos, por lo tanto, a cada pozo se le impone un bombeo de 4.000 m<sup>3</sup>/día repartidos en ambas capas, resultando en 2.000 m<sup>3</sup>/día por pozo, por capa del modelo.

Se aplica este bombeo a cada uno de los 15 sets de parámetros anteriormente definidos por Véliz (2018), con el fin de comparar la cantidad de agua que cada uno de ellos es capaz de sustraer del acuífero, y de esta manera, comparar la gama de resultados calibrados que se podrían obtener, cada uno de los cuales corresponde a una solución posible.

## Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el segundo escenario del caso de estudio, en el cual, como se menciona anteriormente, se agregan al modelo cuatro pozos de bombeo y se utiliza una única serie de recarga (correspondiente a asociada a la serie #15 modelada), para los 15 sets de parámetros.

Los caudales bombeados en cada serie y las observaciones de cota hidráulica en el pozo AS se muestran en la Figura 30. El caudal bombeando por cada serie se presenta en color verde, sobre el caudal bombeado se presenta el porcentaje que este representa respecto al

caudal impuesto ( $16000 \text{ m}^3/\text{día}$ ), junto con los niveles mínimos (en rojo) y máximos (en azul) simulados en el pozo AS.

De la misma manera, se presentan las comparaciones de los caudales bombeados por cada serie junto con el porcentaje del total impuesto que representan, además de las cotas hidráulicas mínimas y máximas simuladas en el pozo AC en la Figura 31.

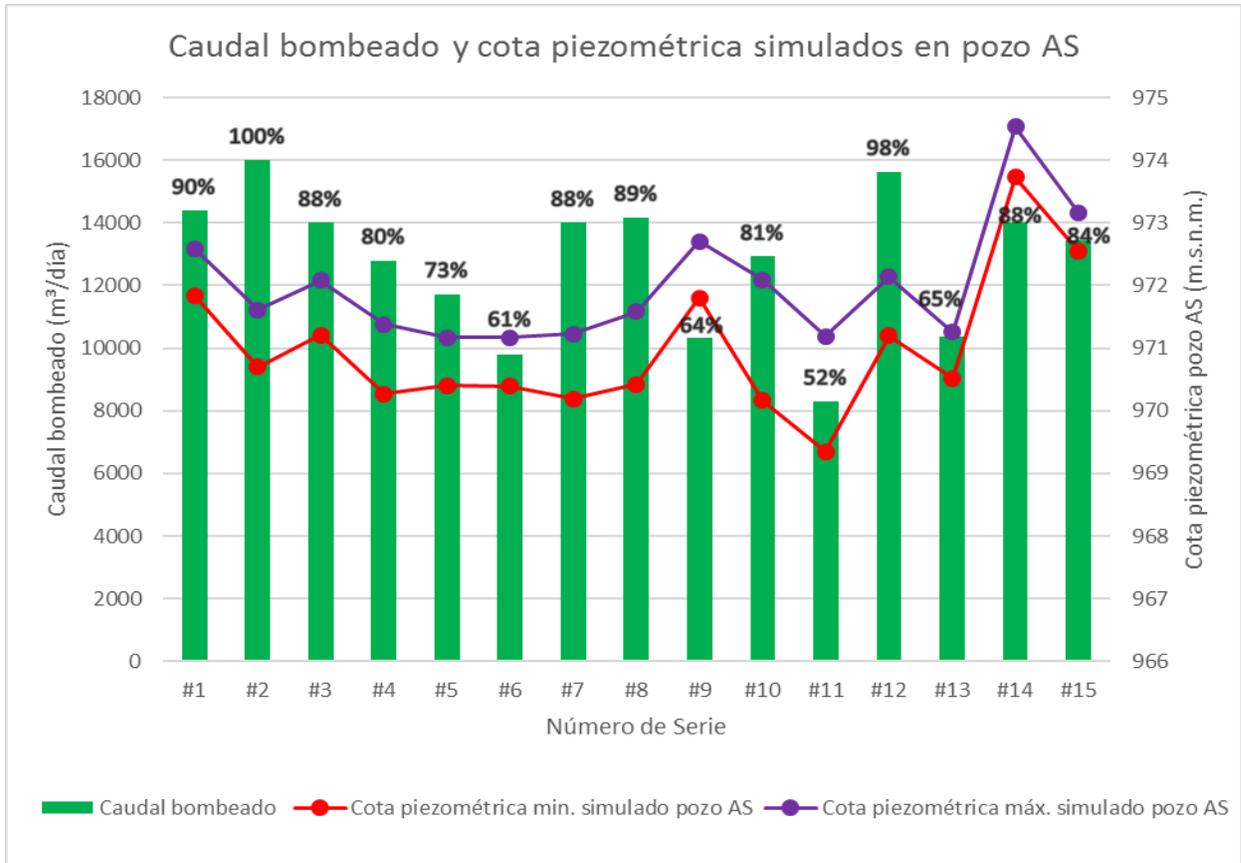


Figura 30. Gráfico comparativo entre los caudales bombeados por los pozos y los niveles simulados por el pozo AS.

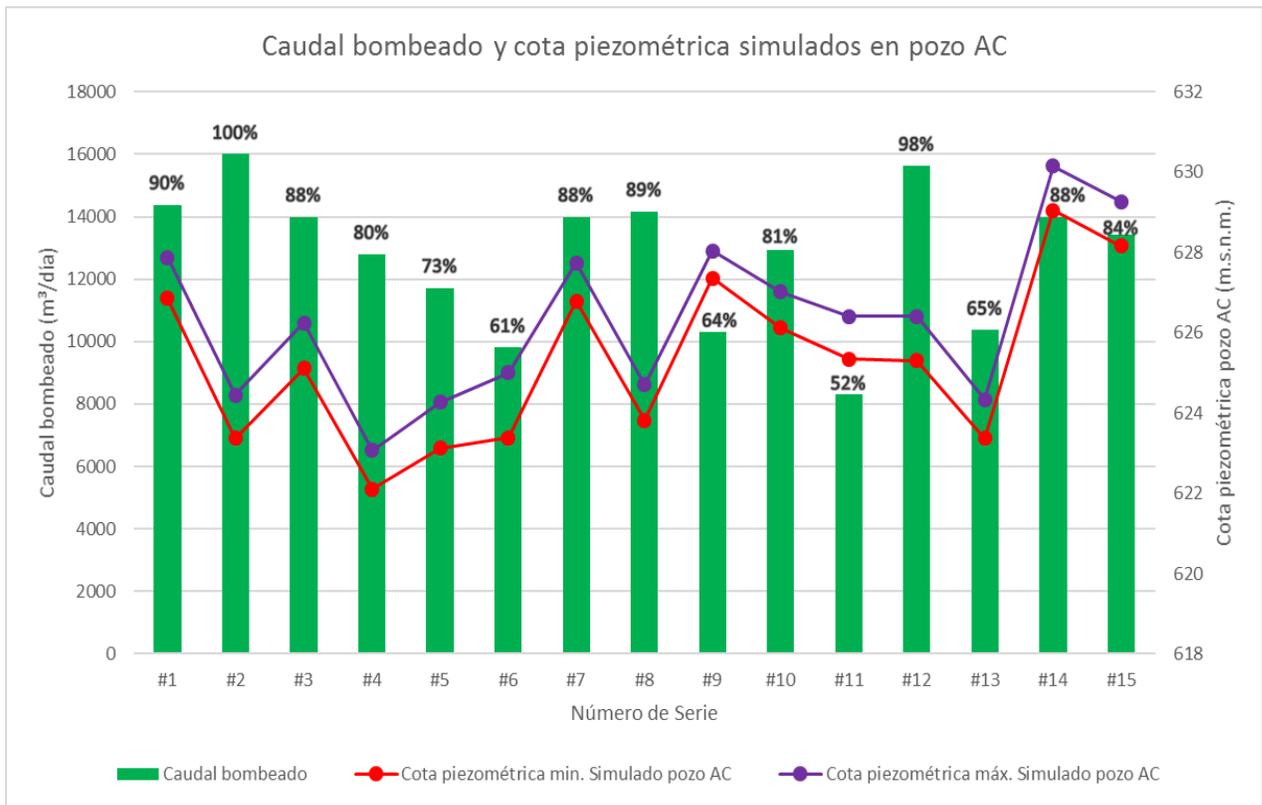
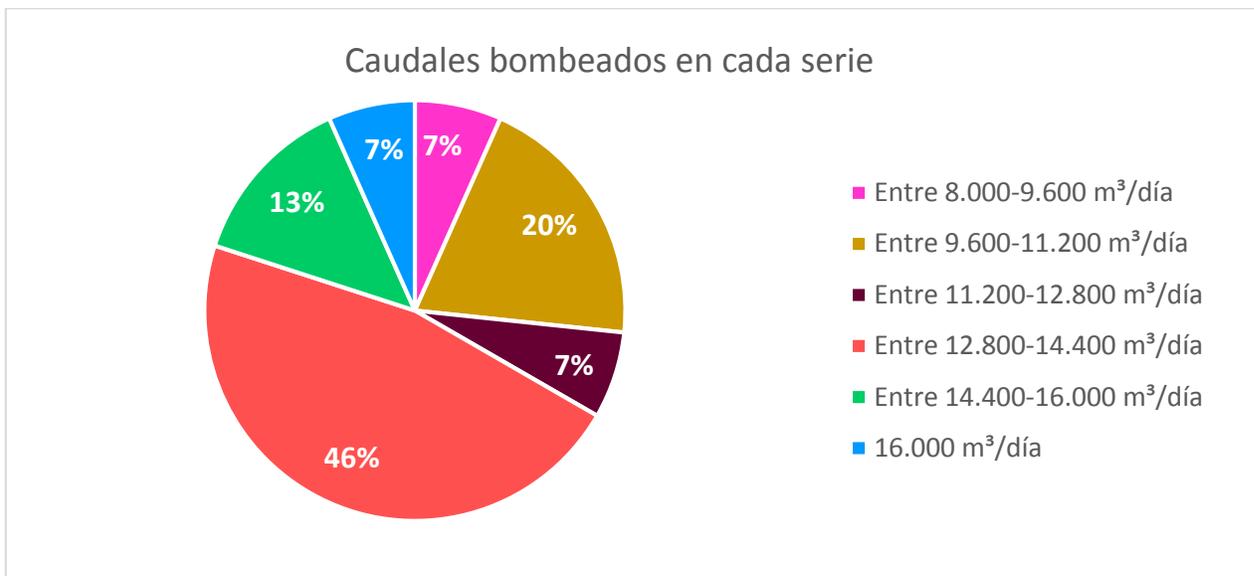


Figura 31. Gráfico comparativo entre los caudales bombeados por los pozos y los niveles simulados por el pozo AC.

Como se mencionó anteriormente, el caudal de bombeo impuesto en la simulación es 16.000 m³/día, pero como se observa en las Figura 30 y Figura 31, esta cantidad de agua únicamente logra ser extraída del acuífero por la serie #2. Se observa que las demás series no tienen la capacidad de igualar la cantidad de bombeo impuesta.

Se advierte que la serie #11 bombea escasamente la mitad de lo impuesto en el modelo, correspondiendo a su vez, a la serie cuya combinación de parámetros presentes en la zona 3 y 6 (zona en donde se ubican los pozos) corresponden a valores de conductividad bajos para ambas capas, además el rendimiento específico en ambas zonas es significativamente bajo como se observa en la Tabla 6, siendo los porcentajes de rendimiento específico de 1.9% y 5.1% para la zona 3 y 6 respectivamente, respondiendo a unos de los valores más bajos dentro de los impuestos en las 15 series.

Además, se observa de los gráficos, que en el 100% de los casos la cantidad de agua bombeada del acuífero es mayor al 50% del caudal de bombeo impuesto, es decir, mayor a 8000 m³/día, y más aún, en un 66% de los casos se extrae más de un 75% del caudal impuesto, correspondiente a 12000 m³/día.



*Figura 32. Resultados para caudales bombeados por cada serie a manera de porcentaje.*

En el gráfico de la Figura 32 se presentan las 15 series simuladas, comparando las cantidades de agua que cada una logra extraer, observándose que en casi la mitad de las series utilizadas (46% de los casos, 7 series), el caudal bombeado se encuentra entre los 12.800 y los 14.400 metros cúbicos día (porción naranja), cantidad de agua correspondiente al rango de 80-90% del caudal impuesto originalmente.

Únicamente en una de las series obtiene la cantidad impuesta de 16.000 metros cúbicos diarios, correspondiendo a un 7% de la muestra de 15 series (porción celeste del gráfico). En ninguno de los casos el caudal bombeado es menor a 8.000 m³/día, es decir, todas las series bombean al menos un 50% del caudal impuesto.

En las Figura 33 y Figura 34, se comparan los valores mínimos y máximos de cota hidráulica simulada para cada pozo con el valor promedio de los datos observados en terreno en los respectivos pozos.

En estos gráficos se aprecia una baja general entre los niveles simulados para los próximos 25 años y el promedio de los niveles históricos observados en los pozos. Por otro lado, se observa una notoria alza en los niveles simulados en ambos pozos en los resultados de la serie #14.

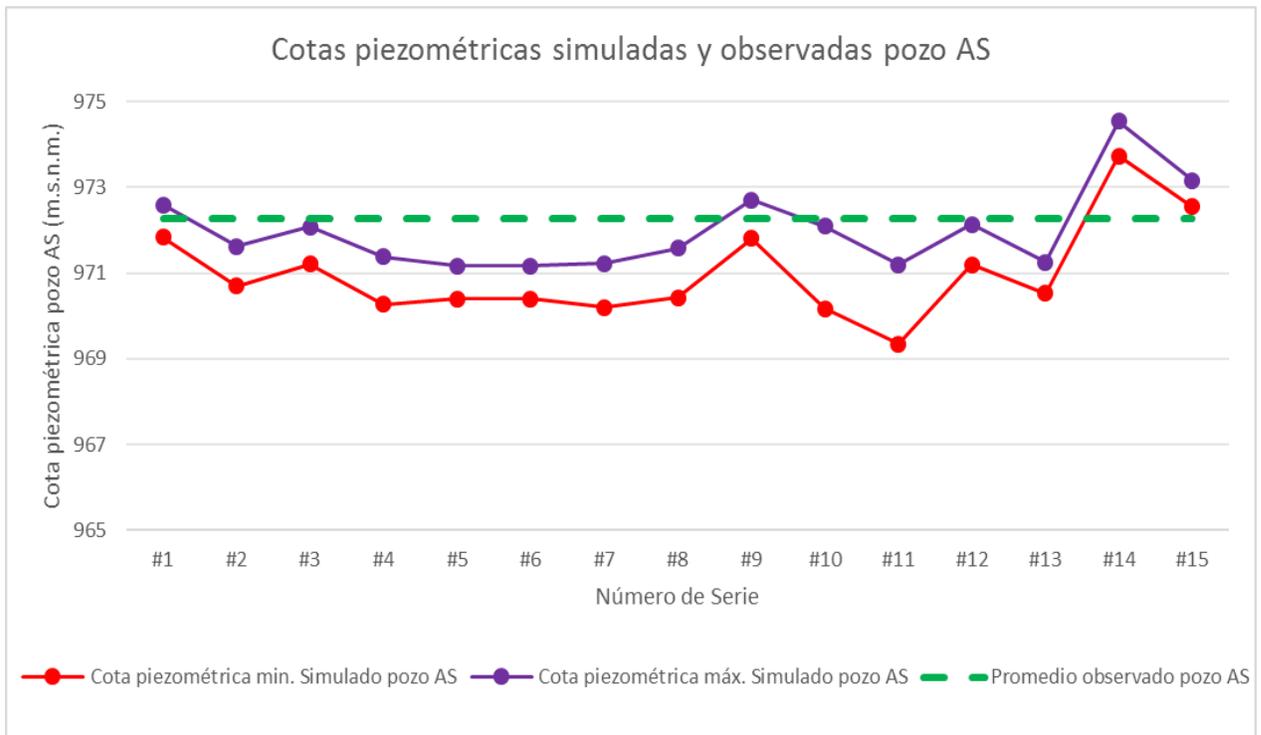


Figura 33. Gráfico comparativo entre los máximos y mínimos de niveles simulados y el promedio de los niveles observados en el pozo AS.

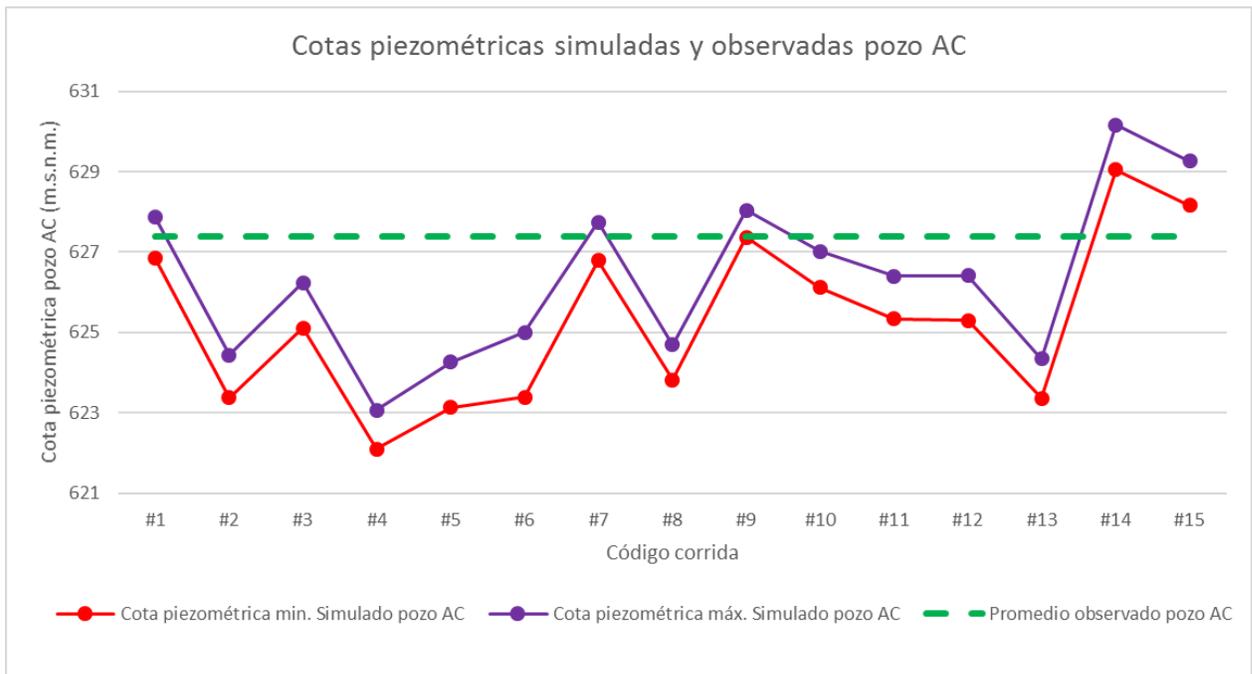


Figura 34. Gráfico comparativo entre los máximos y mínimos de niveles simulados y el promedio de los niveles observados en el pozo AC.

## 7.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se presentará inicialmente un análisis asociado a la incertidumbre previa a la calibración del modelo, es decir, las fuentes de errores asociadas a la obtención de los datos de terreno y a la construcción del modelo. Esto debido a que esta incertidumbre no se debe menospreciar y se debe considerar que influyen en cierto grado a los resultados obtenidos en este trabajo.

Luego, se procederá a analizar y discutir los resultados obtenidos y presentados en el Capítulo 6, con el fin de responder la hipótesis planteada en un principio. Cada uno de estos escenarios fue realizado con la finalidad de analizar principalmente la incertidumbre y sensibilidad relacionada con los sets de parámetros de conductividad hidráulica y rendimiento específico utilizados en cada uno de ellos, y discutir la importancia de la realización de un análisis de incertidumbre para un caso de modelación.

Pero, como se explica en el capítulo 4, la modelación conlleva diversas fuentes de incertidumbre, por lo tanto, a pesar del enfoque de incertidumbre paramétrica que se aplica en este trabajo, se deben considerar todos los factores que tienen relación con el incremento de la incertidumbre del modelo, más que únicamente aquella asociada a los parámetros.

### 7.1.- Incertidumbre previa a la calibración

Actualmente existen diversos autores que centran sus publicaciones en el análisis de la incertidumbre hidrogeológica, proponiendo diferentes maneras de abarcarla. Entre ellos se encuentra Baalousha (2003), quien abarca el tema afirmando que el comportamiento del sistema a modelar dependerá de las variaciones temporales y espaciales de los parámetros, condiciones de borde y estrés sometido, por lo tanto, la eficiencia del modelo dependerá de la precisión de los parámetros ingresados (Baalousha, 2003).

De acuerdo a esta afirmación, mientras más exactas sean las mediciones y los datos ingresados desde la primera etapa del modelo, el comportamiento de este será más fiel a la realidad.

Pero, se debe tener en consideración que los datos obtenidos en terreno (conductividad, rendimiento específico, entre otros), ya contienen en sí mismos algún nivel de incertidumbre, como se mencionó previamente, a pesar que usualmente se tiene poca consideración de ésta.

Los datos medidos son una abstracción de la realidad en que están inmersos, que va a depender del tiempo, técnica, distribución espacial, escala y densidad de muestra (Oreskes, 2018). Por lo que las mediciones de terreno siempre acarrearán un grado de incertidumbre por mínima que esta sea.

Así mismo, los valores de parámetros obtenidos en terreno, representan el sitio puntual donde se realiza el ensayo y el radio afectado por este. Para el resto del área de estudio, donde no se realiza mediciones, los valores serán asumidos utilizando diferentes técnicas (extrapolación, interpolación, etc.) lo que agrega también un grado relevante de incertidumbre.

También parte de la incertidumbre previa a la calibración proviene de la simplificación realizada en el modelo conceptual, el cual para este caso de estudio corresponde a un modelo bastante sintético, que se compone de ocho zonas a calibrar, únicamente dos pozos con niveles medidos, y cuya recarga ingresada fue calculada a partir de un sistema hidrológico con datos limitados, debido a escasez de conocimiento de la subsuperficie. Véliz (2018) en su trabajo apunta como una de las principales problemáticas del modelo la falta de información relativa al modelo conceptual hidrogeológico, el cual constituye la base para el presente trabajo.

Respecto a lo anterior, para realizar un modelo conceptual más preciso en este caso de estudio, con la finalidad de disminuir la incertidumbre asociada y mejorar la rigurosidad de los resultados, será necesario la elaboración de una investigación más detallada, incluyendo como factor más importante el trabajo de terreno que incluya perfilaje geofísico, sondajes hidrogeológicos para descripción estratigráfica, ejecución de ensayos hidráulicos y habilitación de piezómetros para el control de la cota piezométrica en los sectores donde no existe información, así como toma de muestras de calidad que permitan caracterizar el sistema subterráneo. El análisis de nueva información de este tipo permitiría, por un lado, validar o descartar los supuestos realizados en la construcción del modelo conceptual y, por otro, obtener un modelo numérico más realista y con menor grado de incerteza.

También con la adquisición de más información hubiera sido posible la construcción de más de un modelo conceptual, lo cual, como se menciona en el capítulo de incertidumbre, varios autores recomiendan para comparar diferentes interpretaciones de la realidad. Esencialmente, para reducir la incertidumbre y obtener una mayor precisión en los resultados, se debe mejorar la conceptualización del modelo, ya que cambios en el modelo numérico que no se encuentren sustentados en mejoras del modelo conceptual, muy difícilmente generarán resultados más precisos (SEA, 2012).

Otro factor importante de incertidumbre tiene relación con la escasez de pozos, ya que la información de cota hidráulica obtenida de estos se utilizará como dato principal para la calibración del modelo, intentando reproducir en el modelo los niveles de cota hidráulica observados en los pozos, por lo tanto, mientras mayor la densidad de pozos, se tienen más puntos de calibración disponibles. Pero en este caso, se tiene únicamente dos pozos, lo que se traduce en dos puntos de calibración, aumentando la incertidumbre en las zonas del modelo sin información del subsuelo.

Es por esto que los niveles simulados en los puntos que corresponden a los pozos existentes no debiesen variar mucho entre cada prueba, debido a que están basados en datos reales. Efectivamente esto se ve reflejado en las Figura 21 y Figura 22, donde las variaciones de nivel no son tan amplias como en los puntos de observación (de la Figura 23 a la Figura 28).

Los puntos de observación agregados (N1 a N6) corresponden a lugares del modelo en los cuales en la realidad no se tienen datos, por lo que el programa utilizado en la modelación tiene un mayor rango de variación al momento de asignar valores de cota piezométrica posibles en aquellas zonas, como se observa en los resultados presentados en las Figuras anteriormente nombradas.

## 7.2.- Análisis de incertidumbre paramétrica

En primer lugar, se analizará la incertidumbre asociada a los parámetros calibrados en este modelo, para esto, se realizó un análisis de incertidumbre de los parámetros de conductividad hidráulica y rendimiento específico utilizados por Véliz (2018) en la construcción y calibración de este modelo.

La incertidumbre paramétrica se compone de la incertidumbre previa y la incertidumbre posterior (luego de la calibración). La incertidumbre previa se define conceptualmente y la incertidumbre posterior se puede obtener mediante una ecuación (Doherty, 2015). Posteriormente a la obtención de los resultados se realizó un análisis de incertidumbre paramétrica que se examinará a continuación.

Se observa en la Figura 14 la variación de valores que puede experimentar el parámetro de conductividad hidráulica en cada una de las zonas del modelo en la serie #14. Este rango sugiere la incertidumbre que presenta el parámetro de conductividad en cada una de las zonas. Es decir, si el rango de variación después de la calibración es muy amplio implica que el parámetro es poco sensible a la calibración del modelo, ya que su rango de variación posterior a la calibración no varía significativamente con respecto al rango de variación previa a la calibración. Por lo tanto, incluso si el modelo está adecuadamente calibrado, cualquier valor impuesto a este parámetro dentro del amplio rango, no variará significativamente los resultados de niveles y/o flujos obtenidos del modelo.

En este caso particular, son varias las zonas en las que la conductividad hidráulica presenta una baja sensibilidad a la calibración, como se observa de la comparación de las variaciones obtenidas en las Figura 13 y Figura 14, siendo menos sensibles las conductividades hidráulicas presentes en las zonas 3, 4, 6 y 7.

En cambio, se obtiene que las conductividades presentes en la zona 1 y 5 presentan una notoria sensibilidad a la calibración del modelo, es decir, posteriormente a la calibración presentan un rango de variabilidad notoriamente menor, acotando el rango de valores posibles para las conductividades hidráulicas en estas zonas. En estas zonas están presentes los pozos AC y AS respectivamente, por lo que, al tener información de datos observados, existen más posibilidades de acotar el rango de parámetros, aumentando la sensibilidad de los parámetros.

Se puede analizar lo mismo comparando el rendimiento específico graficado en las Figura 15 y Figura 16, que presentan la variabilidad previa y posterior a la calibración de este parámetro. En estos gráficos se observa que la varianza posterior no presenta una notoria disminución con respecto a la varianza previa. Por lo que se puede concluir que el

parámetro de rendimiento específico es en general poco sensible a la calibración de este modelo en específico, pudiendo tener un amplio rango de variabilidad incluso con el modelo ya calibrado.

### 7.3.- Incertidumbre posterior a la calibración

Esta incertidumbre se ve reflejada en los resultados de simulación recientemente presentados, en los cuales se observa claramente la influencia que ejercen los diferentes sets de parámetros calibrados de conductividad hidráulica y rendimiento específico dentro de los distintos escenarios simulados, revelando una clara relación entre los valores asignados a cada parámetro, los niveles de cota hidráulica simulados dentro de la zona de estudio y los caudales de extracción.

La incertidumbre asociada a los parámetros es representada en las simulaciones realizadas en el caso de estudio, donde las variaciones de conductividad y rendimiento específico presentes en las distintas series, implican variaciones importantes en los resultados obtenidos. La repercusión de estas variaciones va a depender mayormente del uso que se pretenda otorgar al acuífero, ya que cada caso simulado responde a una cota hidráulica y a un caudal diferente que se puede extraer de este.

#### 7.3.1.- Primer escenario simulado

La relación existente entre los parámetros y los niveles simulados se presenta en los resultados graficados en las Figura 23 a la Figura 28, en donde variaciones de conductividad y rendimiento específico producen variaciones en la cota hidráulica simulada, por ejemplo, en el punto de observación N2, se aprecia que los niveles de la serie #4 se encuentran aproximadamente 12 metros por sobre el promedio simulado, como se menciona anteriormente, y esta serie presenta la menor conductividad hidráulica en las zonas 7 y 8 (donde se encuentra el punto de observación N2) como se observa en la Tabla 6, lo que puede corresponder a la causa del alza en los niveles de agua, debido a que al disminuir la conductividad disminuiría la capacidad del agua de desplazarse, acumulando parte de esta en las zonas mencionadas.

De la misma manera, en el punto de observación N4 ubicado en las zonas 2 y 5, se observa un amplio rango de variación de cota hidráulica simulada, con variaciones de más de 10 metros presentando un amplio rango de respuestas a la variación de parámetros, ya que como se presenta en la Tabla 6, para la zona 2 los parámetros utilizados en cada serie muestran un amplio rango de variación.

Las variaciones de cota piezométrica resultantes al variar los parámetros, tendrán mayor o menor transcendencia dependiendo del uso que se otorgue al acuífero, como se mencionó anteriormente. Por ejemplo, si en el acuífero se encuentra ubicada una noria de baja profundidad, una variación de cuatro metros en los niveles como se observa en el punto de observación N1 (Figura 23), condicionará si esta tendrá o no la capacidad de extraer agua, dependiendo de su distancia al nivel piezométrico, pero en el caso de la

existencia de un pozo de gran profundidad, una variación en las simulaciones de cuatro metros puede no tener grandes repercusiones. En el caso de sectores ambientalmente sensibles, como son vegas y bofedales, estos se verían claramente impactados por variaciones de esta magnitud e incluso menores.

Además, se puede observar que se obtuvieron variaciones de hasta aproximadamente 12 metros en los niveles simulados (Figura 24), lo que, considerando que la profundidad del acuífero es de 30 metros, corresponde a un rango de error bastante considerable, para cualquier uso que se estime para el acuífero.

No se debe menospreciar, por otro lado, el rol que cumple la recarga en cada escenario. Como se presenta previamente en la Tabla 6, para el primer escenario cada una de las series además de tener un set de parámetros único, tienen una tasa de recarga única. Por lo que, a pesar de referirnos principalmente a la incertidumbre asociada a los parámetros a lo largo del trabajo, se debe evaluar la influencia que tiene la variación de la tasa de recarga ingresada para calibrar cada una de las series y la forma en que esta variación afecta a los resultados.

Con el fin de analizar el rol de la recarga, es que se realiza la evaluación de parámetros y recarga (Figura 12). A partir de los resultados obtenidos, se esclarece la hipótesis en la que se postula que los parámetros tienen mayor influencia que la recarga en cuanto al error asociado a la modelación.

Esto posiblemente se debe a que la cantidad de agua que ingresa a través de la recarga no influye significativamente, ya que esta puede descargar al río y equilibrar el sistema. En cambio, al variar los parámetros varía la velocidad con que el agua se desplaza, determinando si esta se acumula o se desplaza rápidamente en cada zona, afectando fuertemente a los niveles simulados en cada caso y también influyen en la cantidad de agua que se descarga al río.

De acuerdo a estos resultados, al variar los parámetros originales utilizados en cada modelo, a un único set de parámetros, el error NRMS asociado a gran parte de los resultados es mayor que el error NRMS asociado a la variación de la recarga. Esto se correlaciona con las afirmaciones realizadas por Baalousha (2003). En la construcción de su modelo, este autor afirma que los niveles de agua subterránea son más sensibles a variaciones de los parámetros hidráulicos que variaciones realizadas en la recarga.

Pero no todas las series presentan esta tendencia, en 5 de ellas (#1, #7, #9, #14 y #15) el error NRMS aumenta al variar la recarga, y, por otro lado, también en algunas de las series se observa que al realizar una de estas dos variaciones disminuye el error NRMS del modelo original (#3, #7#, #10, #11, #12) lo que igual debería someterse a un análisis más exhaustivo debido a que en teoría, la combinación de parámetros y recarga utilizada originalmente, debiese incurrir en el menor grado de error que cualquiera de las dos variaciones realizadas.

Los acuíferos son caracterizados hidráulicamente por su capacidad de transportar agua, la cual es cuantificada por sus valores de conductividad hidráulica y transmisividad, y de almacenar agua, lo que se expresa en su coeficiente de almacenamiento (Maliva, 2016).

Por lo tanto, debido a que su capacidad de transportar agua es condicionada por la conductividad, es esperable que los cambios en estos valores acarreen cambios en los niveles de cota hidráulica simulados, debido a que las velocidades de transporte por cada una de las zonas condicionarán la cantidad de agua disponible en estas.

### 7.3.2.- Segundo escenario simulado

La finalidad con la que se realizó este escenario predictivo consistió en evaluar la capacidad extractiva del acuífero, para lo cual, se impuso un caudal de extracción de 16.000 m<sup>3</sup>/día, y con los resultados obtenidos se pudo observar que si, por ejemplo, se requiere extraer un caudal de 12000 m<sup>3</sup>/día instalando los pozos presentados anteriormente y se utilizan los parámetros calibrados en la serie #6 para analizar si el bombeo es viable, claramente los resultados de la simulación expondrán que el acuífero no posee la capacidad extractiva de los 12000 m<sup>3</sup>/día, por lo que se descartará la posibilidad de bombear la cantidad impuesta.

Pero si en lugar de utilizar la serie #6, se utiliza el set de parámetros calibrado en la serie #10, los resultados de la simulación mostrarán que el acuífero posee la capacidad de bombear la cantidad requerida, por lo que se podría comenzar la instalación de los pozos.

Existen varios factores que causan la incapacidad de bombeo de los pozos en algunas de las simulaciones, tales como el secado de las celdas superiores del modelo en donde se ubican los cuatro pozos luego de una determinada cantidad de tiempo de bombeo, lo que se traduce como fuertes descensos en el nivel freático debido a que las bajas conductividades no se recuperan en el tiempo de bombeo, es decir, la relación existente entre la velocidad de desplazamiento de agua subterránea con la conductividad hidráulica (a menores valores de conductividad hidráulica, la velocidad de desplazamiento del agua es menor), entre otros factores que influyen en la eficiencia de los resultados.

Además, se observa de los resultados obtenidos del bombeo, una disminución en la cota piezométrica observada en los pozos AC y AS (Figura 33 y Figura 34), causada por la puesta en marcha de los pozos de bombeo y la nueva tasa de recarga ingresada en cada modelo, en donde en la mayoría de las simulaciones la tasa de recarga disminuyó respecto a la calibrada originalmente, a excepción del aumento de nivel observado en la serie #14, lo que coincide con el aumento de recarga ingresada en la serie mencionada, ya que, inicialmente esta serie posee la tasa de recarga promedio más baja ingresada como se observa en la Tabla 6, correspondiente a 533,4 litros por segundo, y en este escenario se aumenta a 732,4 litros por segundo, como se puede observar en la Tabla 7.

## 8.- CONCLUSIONES

Uno de los objetivos de este trabajo corresponde a la evaluación de la incertidumbre predictiva asociada a los parámetros de conductividad hidráulica y rendimiento específico del modelo y para este fin, se realizaron 15 series predictivas, comparando la gama de resultados obtenidos a partir de dos escenarios. Debido a las diferencias observadas en los resultados calibrados, es que se comprueba que se debe realizar un análisis de incertidumbre, ya que con los resultados obtenidos de una única calibración no es suficiente para obtener un resultado confiable.

Se comprueba que la realización de una modelación predictiva considerando únicamente una de las 15 series que calibran el modelo, en cualquiera de los dos escenarios predictivos realizados, deriva en una modelación determinística, la que entrega un resultado único, cuya probabilidad de ocurrencia es desconocida. Esto, en definitiva, podría guiar a la toma de una decisión errónea.

En cambio, al realizar 15 modelos con diferentes parámetros calibrados, a pesar de no haber utilizado el método estocástico como tal, los resultados obtenidos se analizaron de manera probabilística, considerando diferentes escenarios y probabilidades de éxito, y pudiendo analizar la incertidumbre que rodea a los parámetros y a los diferentes resultados. Esto permitiría tomar decisiones más informadas, con base en el conocimiento de la probabilidad de ocurrencia de las condiciones simuladas.

En otras palabras, utilizar el método estocástico, podría ayudar a evaluar la probabilidad de ocurrencia de un evento no deseado (como la sobre explotación de un acuífero).

A pesar de esto, los modelos determinísticos continúan siendo utilizados con mayor frecuencia que los modelos estocásticos, debido principalmente a que requieren un menor consumo de tiempo y menor costo computacional, y, por lo tanto, más económicos monetariamente.

En cambio, al utilizar el análisis de incertidumbre, se requiere de mayor tiempo para la realización de varios modelos y un mayor análisis de los resultados obtenidos de los mismos, y, por lo tanto, una mayor inversión. Sin embargo, como se presenta en los resultados de este trabajo, corresponde al método más adecuado por cuanto permite una toma de decisiones informada y con más certezas.

A partir de los resultados obtenidos se concluye que ninguna las simulaciones anteriormente expuestas contienen el resultado exacto al problema por si sola y la manera correcta de abordar los modelos predictivos corresponde a lo planteado en la modelación estocástica, lo que generará un resultado probabilístico.

Muchos sets de parámetros diferentes pueden proveer un ajuste de datos satisfactorios, pero algunos de estos parámetros estimados pueden ser muy diferentes a los reales y estos resultados pueden guiar a predicciones erróneas del comportamiento futuro del reservorio. En otras palabras, esto responde al propósito de la modelación probabilística, cuya finalidad es encontrar la probabilidad de falla o incertidumbre del modelo. Como

resultado de este tipo de modelación se presentará el efecto de la variabilidad de los parámetros ingresados en el modelo a modo de probabilidades de éxito o falla.

Queda demostrada la necesidad de un proceso de modelación adecuado y cuyo estudio previo a la realización del modelo debe ser exhaustivo. Además, la realización del modelo no debe centrarse en una única calibración o una única idea de modelo conceptual, se deben probar varias posibilidades, obteniendo finalmente una probabilidad de éxito o falla a partir de todos los resultados obtenidos de varios procesos de calibración, teniendo en cuenta la incertidumbre que implica la construcción de un modelo que utiliza información inherentemente incompleta del subsuelo.

Para este caso de estudio específico, se recomienda la realización de un modelo conceptual con mayor información, efectuando trabajo de terreno, con la finalidad de obtener más datos para una construcción más detallada y con menor incertidumbre del acuífero, en donde se logren definir con mayor exactitud las unidades hidrogeológicas.

También se debe considerar la influencia que tiene el método con el cual se realizó la parametrización; en este ámbito existen dos principales: el método de zonación y el de los puntos piloto, como se mencionó en el Capítulo 3.4., en este caso de estudio particular se utilizó la zonación, pero existen opiniones controversiales acerca de cuál constituye el mejor método para modelos hidrogeológicos.

Por lo tanto, debido a que este modelo corresponde a un modelo sencillo, podría resultar de utilidad para fines comparativos, una realización futura del mismo utilizando el método de puntos pilotos, para comparar ambos resultados, realizando un análisis paramétrico de ambos.

Finalmente, y a partir de todo lo anterior, se recomienda la realización de una modelación estocástica y análisis de incertidumbre asociado como metodología obligatoria al momento de construir modelos hidrogeológicos, para de esta manera, garantizar la realización de modelos que logren representar y simular las condiciones del medio de la manera más correcta posible, logrando evitar situaciones poco sustentables y así asegurar un uso responsable y sostenible del recurso hídrico.

## 9.- BIBLIOGRAFÍA

- Ajami, N. K., Duan, Q., Sorooshian, S. (2007). "An integrated hydrologic Bayesian multimodel combination framework: Confronting input, parameter, and model structural uncertainty in hydrologic prediction". *Water Resources Research*, vol. 43, W01403, doi:10.1029/2005WR004745.
- Anderson, M., Woessner, W., Hunt, R. (2015). "Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport". Segunda edición, Elsevier, Inc., Londres.
- Baalousha, H. M. (2003). "Risk assessment and uncertainty analysis in groundwater modelling". Disertación doctoral, Bibliothek der RWTH Aachen.
- Bear, J. (1972) "Dynamics in Porous Media". Dover publications, Inc. New York.
- Bear, J. Verruijt, A. (1987). "Modeling Groundwater Flow and Pollution". D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.
- Betancur, T. Palacio, C. (2009). "La modelación numérica como herramienta para la exploración hidrogeológica y construcción de modelos conceptuales (Caso de aplicación: Bajo Cauca Antioqueño)". *DYNA*, Volumen 76, Número 160, p. 39-49, 2009. ISSN electrónico 2346-2183. ISSN impreso 0012-7353.
- Bredehoeft, J. (2005). "The conceptualization model problem-surprise". *Hydrogeology journal*, 13(1), 37-46.
- Calderón, M.; Pineda, G. (1999). Área Condoriaco-Rivadavia. Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Minería, Mapas Geológicos 12, 1 mapa escala 1:100.000.
- Calderón, M.; Pineda, G. 2006. Geología del Área Andacollo-Puerto Aldea, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 96: 85 p., 1 mapa escala 1:100.000.
- CAZALAC, Rodhos Asesorías y Proyectos LTDA. (2006). "Aplicación de metodologías para determinar la eficiencia del uso del agua. Estudio de caso en la región de Coquimbo". Gobierno regional – Región de Coquimbo.
- Custodio, E., Llamas, M. R. (2001). "Hidrología Subterránea". Segunda Edición. Ediciones Omega, Barcelona.
- Davis, W. M. (1899). "The Geographical Cycle". *The Geographical Journal* 14: 481-504.
- Dediós, P. (1967). Cuadrángulo Vicuña, Provincia de Coquimbo. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile 16: 65 p.

- DeLaurentis, D.A.; Mavris, D.N. (2000): “Uncertainty Modeling and Management in Multidisciplinary Analysis and Synthesis”, Technical report, American Institute of Aeronautics & Astronautics, Aerospace Systems Design Laboratory (ASDL). School of Aerospace Engineering, Georgia Institute of Technology Atlanta, GA 30332-0150.
- DGA (2008). “Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del río Limarí”. Informe técnico. S.D.T. N° 268.
- Doherty, J. (2015). “Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models”. Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia. ISBN: 978-0-9943786-0-6.
- Doherty, J., Hunt, R. (2009) “Two statistics for evaluating parameter identifiability and error reduction”. *Journal of Hydrogeology* 366 (2009) 119-127.
- Emparan, C.; Pineda, G. (1999) “Área Condoriaco-Rivadavia. Región de Coquimbo”. Servicio Nacional de Minería, Mapas Geológicos 12, 1 mapa escala 1:100.000.
- Emparan, C.; Pineda, G. (2006) “Geología del Área Andacollo-Puerto Aldea, Región de Coquimbo”. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 96: 85 p., 1 mapa escala 1:100.000.
- Heath, R. C. (1987). “Basic Ground-Water Hydrology”. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2220.
- Kaludjerovic, D. (2018) “Building better groundwater models – Calibration is not enough anymore”. [Webinar]. Obtenido de DEz
- Kitanidis, P. K. (1997). “Introduction to geostatistics: applications in hydrogeology”. Cambridge University Press.
- Klass, D., Imteaz, M.A. (2018). “Investigating the impact of the properties of pilot points on calibration of groundwater models: case study of a karst catchment in Rote Island, Indonesia” *Hydrogeology journal* 25 (6), 1703-1719.
- Krzysztofowicz, R. (1999). “Bayesian theory of probabilistic forecasting via deterministic hydrologic model”. *Water Resources Research*, vol. 35, No. 9, p.2739-2750.
- Leblanc, Y. (1999). “Prédiction de l’effet du décapage d’une mine à ciel ouvert sur l’hydrogéologie locale à l’aide de la modélisation numérique”. *Systèmes Geost. International*, Laval, Québec: 23.
- Maliva, R. G. (2016). “Aquifer Characterization Techniques: Schlumberger Methods in Water Resources Evaluation Series (No. 4)”. Springer.

- Marsily, G. (1978). “De l'identification des systèmes hydrogéologiques”. Tesis de doctorado. Paris, Universidad de Paris VI.
- Oreskes, N., Bokulich, A. (2017). “Models in the Geosciences” Springer Handbook of Model-Based Science. Springer. Pp. 891-911.
- Pineda, G., Calderón, M. (2008). “Carta Geológica del Área Monte Patria-El Maqui”. Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geológica Básica No 116. 1 mapa escala 1:100.000.
- Rivano, S. (1980). Cuadrángulos D-86, Las Ramadas, Carrizal y Paso Río Negro. Región de Coquimbo. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile 41-44: 68 p.
- Rojas, R., Feyen, L., Dassargues, A. (2008). “Conceptual model uncertainty in groundwater modeling: Combining generalized likelihood uncertainty and Bayesian model averaging”, Water Resource. Res., 44, W12418, doi:10.1029/2008WR006908.
- Santibañez, F. (2017). “El Cambio Climático y los Recursos Hídricos de Chile”. Agricultura Chilena Reflexiones y desafíos al 2030. Segunda Sección: Reflexiones y desafíos al 2030: Perspectiva de especialistas externos. p. 147-178.
- Sepúlveda, N., Doherty, J. (2015). “Uncertainty Analysis of a Groundwater Flow Model in East-Central Florida”. Groundwater 53, no. 3: 464-474.
- SERPLAC, DGA, ONU, CORFO (1979). “Investigación de recursos hidráulicos de la IV Región”.
- Servicio de Evaluación Ambiental (2012). “Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA”.
- Véliz, E. (2018). “Confeción de un modelo integrado con análisis estocástico de la recarga al acuífero de la subcuenca del Río Rapel, IV Región”. Memoria de ingeniero civil. Santiago. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Wu, J., Zeng, X. (2013). “Review of the uncertainty analysis of groundwater numerical simulation”. Chinese Science Bulletin, 58(25), 3044-3052.