



Universidad
de Alcalá



Universidad
Rey Juan Carlos

**MODELACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO Y
TRANSPORTE DEL SISTEMA HIDROGEOLÓGICO
DEL RIO ELQUI**

**NUMERICAL MODELING OF THE FLOW AND
TRANSPORT OF THE ELQUI RIVER
HYDROGEOLOGICAL SYSTEM**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

Presentado por:

D. EDMUNDO GONZALEZ ORTUYA

Dirigido por:

Dr. FRANCISCO MONTALVAN TOALA

Dr. FRANCISCO CARREÑO CONDE

Alcalá de Henares, 28 de junio de 2023

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a Francisco Montalván por su dirección, apoyo, buena disposición y voluntad de colaboración en el desarrollo de este trabajo. A Francisco Carreño, como profesor revisor y director del máster.

Por último, deseo expresar mi agradecimiento a mi querida esposa y familia.

ÍNDICE

1. RESUMEN.....	1
2. INTRODUCCIÓN	2
3. JUSTIFICACIÓN.....	5
4. OBJETIVOS.....	8
5. METODOLOGÍA	9
5.1. Área de estudio	9
5.2. Geomorfología área de estudio.....	10
5.3. Geología área de estudio.	11
5.4. Hidrogeología área de estudio.	12
5.1. Aspectos climáticos	14
5.2. Aspectos hidrológicos	14
5.3. Actividad Económica	15
6. MODELO NUMÉRICO	16
6.1. Modelo conceptual	16
6.2. Límites y capas del acuífero	18
6.3. Constantes elásticas del acuífero	18
6.4. Límites del Modelo y discretización espacial y temporal del acuífero	19
6.5. Pozos piezométricos y de bombeo	21
6.6. Zonas de recarga y descarga del sistema.....	22
6.7. Condiciones de Contorno del Modelo de Flujo.....	22
6.8. Condiciones de Contorno del Modelo de Transporte.....	23
7. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN DE FLUJO Y TRANSPORTE	24
7.1. Calibración del modelo numérico	24
7.2. Balance de masas.....	26
7.3. Modelo de flujo	26
7.4. Modelo de transporte	33
8. DISCUSIÓN.....	35
9. CONCLUSIONES	37
10. BIBLIOGRAFÍA.....	39

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: DISMINUCIÓN DE LAS PRECIPITACIONES EN LA CIUDAD DE LA SERENA.	5
FIGURA 2: RETROCESO GLACIAR EL TAPADO.	6
FIGURA 3: VARIACIÓN PIB Y DERECHOS DE AGUA SUBTERRÁNEOS.	7
FIGURA 4: UBICACIÓN CUENCA DEL RÍO ELQUI.	9
FIGURA 5 : PRINCIPALES UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS CUENCA DEL RÍO ELQUI.	10
FIGURA 6 : MAPA GEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO ELQUI.	12
FIGURA 7: SENTIDO DE FLUJO CUENCA DEL RÍO ELQUI (ESCALA 1:1.000.000).	13
FIGURA 8: CAUDALES MEDIOS MENSUALES.	15
FIGURA 9: MODELO CONCEPTUAL.	17
FIGURA 10: LIMITES Y ZONIFICACIÓN DEL ACUÍFERO.	20
FIGURA 11: MALLADO DE ELEMENTOS FINITOS EN EL DOMINIO.	20
FIGURA 12: UBICACIÓN POZOS PIEZOMÉTRICOS Y DE BOMBEO	21
FIGURA 13: AJUSTE ENTRE NIVELES PIEZOMÉTRICOS MEDIOS Y CALCULADOS.	25
FIGURA 14: HIDROGRAMA POZO PZ1, SECTOR AQ3.	27
FIGURA 15: HIDROGRAMA POZO PZ2, SECTOR AQ3.	27
FIGURA 16: HIDROGRAMA POZO PZ3, SECTOR AQ3.	28
FIGURA 17: HIDROGRAMA POZO PZ5, SECTOR AQ2.	28
FIGURA 18: HIDROGRAMA POZO PZ6, SECTOR AQ2.	29
FIGURA 19: HIDROGRAMA POZO PZ7, SECTOR AQ2.	29
FIGURA 20: HIDROGRAMA POZO PZ8, SECTOR AQ2.	30
FIGURA 21: HIDROGRAMA POZO PZ9, SECTOR AQ1.	30
FIGURA 22: HIDROGRAMA POZO PZ10, SECTOR AQ1.	31
FIGURA 23: REPRESENTACIÓN DEL MODELO DE FLUJO, PERIODO 1.	31
FIGURA 24: REPRESENTACIÓN DEL MODELO DE FLUJO, PERIODO 19.	32
FIGURA 25: REPRESENTACIÓN DEL SENTIDO DE FLUJO, PERIODO 1.	32
FIGURA 26: REPRESENTACIÓN DEL SENTIDO DE FLUJO, PERIODO 19.	33
FIGURA 27: REPRESENTACIÓN DEL CONTAMINANTE, TIEMPO 6.	34
FIGURA 28: REPRESENTACIÓN DEL CONTAMINANTE, TIEMPO 19.	34

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: CONSTANTES ELÁSTICAS EN DISTINTAS SECCIONES DE LA CUENCA DEL RÍO ELQUI. (FUENTE CORFO, 1955).....	19
TABLA 2: PARÁMETRO CALIBRADOS.....	25

1. RESUMEN

En muchas zonas semiáridas del planeta, la principal reserva de agua dulce líquida proviene de las fuentes subterráneas. En las últimas décadas, su uso ha aumentado considerablemente, lo que ha llevado a un mayor riesgo de agotamiento a nivel mundial.

La cuenca del río Elqui, situada en el norte de Chile, una región semiárida con una alta producción agrícola, no es ajena a esta problemática, ya que ha sufrido una disminución de sus recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos.

En este contexto, la modelización numérica se ha convertido en una herramienta fundamental para mejorar el conocimiento sobre el comportamiento dinámico de una masa de agua en un acuífero. Al considerar los gradientes hidráulicos y las condiciones del medio físico, es posible modelar la capacidad de almacenamiento y transmisión del flujo de agua.

En este estudio, se presenta un modelo numérico de flujo y transporte en 2D de un sector del río Elqui, utilizando la herramienta computacional Visual Transin. Las ecuaciones diferenciales de flujo y transporte se resuelven mediante la técnica de elementos finitos.

Para la elaboración del modelo, se utilizaron datos de 10 pozos de niveles piezométricos medidos entre el 28-02-2017 y 17-11-2021.

Los resultados de la piezometría calculada muestran una tendencia disminución en estos años lo que es concordante con la piezometría observada. De lo anterior se puede concluir que el modelo de flujo representado logra reproducir la realidad del sistema hidrogeológico.

Palabras clave: Hidrogeología, modelo numérico de flujo y transporte, acuífero aluvial, transmisividad y contaminación.

2. INTRODUCCIÓN

El Centro Internacional de Evaluación de Recursos Hídricos Subterráneos (IGRAC) de la UNESCO señala que el agua subterránea constituye un 97% del agua dulce líquida existente en la superficie terrestre, siendo la más abundante. De hecho, al menos la mitad de la población global depende de este recurso vital, de acuerdo con la UNESCO (Hatch, 2018).

Este hecho establece la necesidad de gestionar adecuadamente el agua subterránea, considerándola una prioridad para la humanidad. En diversas partes del mundo, este recurso se ha transformado en un bien no renovable que se explota en exceso.

En zonas áridas y semiáridas, la principal fuente de agua para el consumo humano, y las actividades agrícolas e industriales proviene de los acuíferos (Liu, 2021). Su aprovechamiento ha aumentado notablemente en los últimos años, lo que genera un riesgo de agotamiento a nivel mundial. Cerca del 20% de los acuíferos están en peligro por excesiva explotación (Mosso, 2019).

Este aumento en su uso, o sobreexplotación, ha creado conflictos y preocupaciones debido a la potencial reducción de los acuíferos y el deterioro de la calidad del agua (Findikakis, 2020). La explotación intensa se debe a su escasez, provocada por un crecimiento desmesurado de la demanda, en comparación con la recarga natural (Chen, 2020).

El agua subterránea juega un rol vital en el ciclo del agua y es un recurso crucial para gran parte de la población global. En un mundo donde la demanda de este recurso crece, los aspectos de cantidad y calidad son una preocupación primordial para muchas regiones. La calidad del agua puede verse comprometida por la sobreexplotación del agua subterránea y la contaminación resultante de ciertas actividades económicas (Luczaj, 2016).

La capacidad del agua subterránea para equilibrar las fluctuaciones en la precipitación y complementar los recursos de agua superficiales durante los periodos de sequía es fundamental, aunque son vulnerables a las crecientes actividades humanas y las inciertas consecuencias del cambio climático (Taniguchi y Hiyama, 2016).

El agotamiento de los acuíferos es una preocupación creciente ya que el agua subterránea es una fuente importante para el riego, a menudo de forma insostenible (Grogan y Wisser, 2015). En la agricultura, este recurso ha aportado beneficios para el riego en los países

semiáridos de la OCDE, pero su uso intensivo más allá de la recarga es un problema, ya que en algunas regiones se ha agotado generando impactos ambientales negativos significativos (OECD, 2015).

En Chile, el uso del agua subterránea ha crecido exponencialmente en las últimas décadas, lo que genera preocupación por su sostenibilidad a largo plazo, sin que exista aún una política clara para su solución (Donoso et al., 2020).

La cuenca del río Elqui, tampoco está exenta de esta problemática. Actualmente, se está enfrentando a incrementos en los niveles de estrés y demanda de agua, junto con una inversión infraestructural insuficiente. Esto está sometiendo a prueba su capacidad para abastecer de agua para múltiples propósitos sin perjudicar el medio ambiente (Delorit et al., 2017).

Por este motivo, resulta esencial adquirir un conocimiento sobre la dinámica del agua en esta región, considerando las proyecciones de un aumento en la demanda de agua. Surge la necesidad de entender el funcionamiento hidrogeológico de la cuenca para obtener una visión sobre la disponibilidad del agua subterránea.

La modelización de las aguas subterráneas se convierte entonces en una herramienta clave para entender esta dinámica y para la gestión efectiva de estos recursos (Iglesias et al., 2021).

Un modelo de agua subterránea se construye sobre una representación simplificada de un sistema hidrogeológico natural (Montalván, 2018). En este contexto, se emplean ecuaciones que rigen el flujo y conservación de la masa para simular el flujo de agua y transporte en el medio poroso. Como resultado, se obtiene la distribución de los niveles piezométricos, lo que permite determinar la magnitud y dirección del escurrimiento del agua subterránea (Espinoza, 2008).

Para alcanzar los objetivos propuestos en este trabajo, se ha utilizado el software de simulación hidrogeológica Visual Transin en el acuífero de la cuenca del río Elqui.

Visual Transin, es un modelo numérico que utiliza las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el flujo y conservación de la masa para simular flujo de agua y transporte en el medio poroso. La técnica numérica utilizada en este modelo corresponde al método de elementos finitos. Los parámetros del modelo se estiman utilizando el problema inverso (Grounwater Hydrology Group, 2008).

La ecuación de flujo genérica que se resuelve está dada por:

$$\nabla(K\nabla h) + q = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{en } \Omega$$

donde h (L) es el nivel piezométrico ($h = p/\gamma + z = \psi + z$); p [F/L²] es presión de agua, γ [F/L³] peso específico del agua; ψ cabeza de succión, ([L]) y z [L] es la posición vertical desde un nivel de referencia; S es el coeficiente de almacenamiento; Ω es el dominio bidimensional; ∇ el operador diferencial; K es el tensor de conductividad hidráulica; q [T⁻¹, L/T, L²/T] es una recarga instantánea y t es el tiempo.

La ecuación de transporte corresponde a:

$$\theta R \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla(D\nabla C) - q\nabla C + qr(C - C') - \theta\lambda RC - \sigma_m \phi_m D_m \frac{\partial C_m}{\partial Z} \Big|_{z=0} \quad \text{en } \Omega$$

donde: θ es el contenido volumétrico de agua, ϕ es la porosidad del acuífero, c [M/L³] concentración del soluto, t es el tiempo, q [L/T] es el flujo de Darcy, c' es la concentración externa de soluto en fuentes o sumideros, λ [T⁻¹] es la reacción de primer orden, ϕ_m es la porosidad de la matriz, D_m [L²/T] es la difusión molecular de la matriz, σ_m [L⁻¹] es la superficie específica de la matriz, z es el eje de coordenadas perpendicular a la dirección de flujo y R es el coeficiente de retardo debido a los fenómenos de adsorción (Grounwater Hydrology Group, 2008).

3. JUSTIFICACIÓN

Ubicada en la región de Coquimbo en Chile, la cuenca del río Elqui es conocida por su importancia tanto en la agricultura como en el sector turístico. Sin embargo, en los últimos años se ha notado una disminución significativa en los recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos.

Esto se evidencia (Figura 1) en la disminución de las precipitaciones anuales a lo largo del último siglo, donde se ha registrado una caída cercana al 30% en la ciudad de La Serena (Santibañez, 2016).

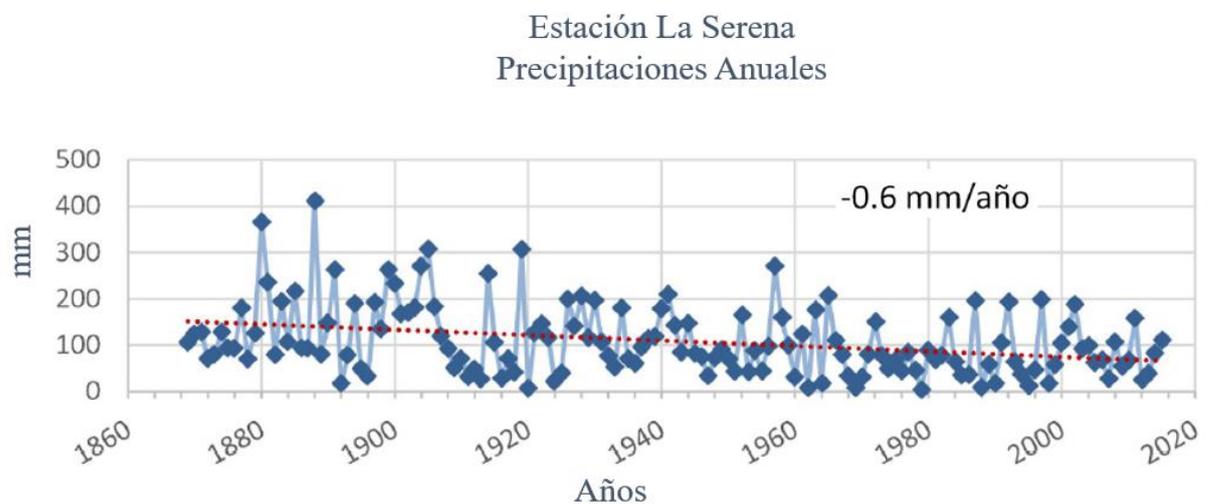


Figura 1: Disminución de las precipitaciones en la ciudad de La Serena.

Además, el cambio climático ha exacerbado estos problemas, manifestándose en la forma de una variabilidad climática más notoria y la ocurrencia de eventos extremos como sequías y olas de calor con mayor frecuencia.

Este fenómeno se ha hecho evidente desde el 2010, cuando la región comenzó a experimentar una sequía extrema que ha tenido efectos directos y perjudiciales en la agricultura, el suministro de agua potable, el turismo y la biodiversidad de la zona. Este evento ha amenazado la estabilidad de los recursos hídricos, ocasionando problemas de seguridad hídrica tanto por la disminución en la cantidad de agua disponible como por la degradación de su calidad (MMA, 2016).

Estos sucesos tienen el potencial de disminuir aún más la disponibilidad de los recursos hídricos y elevar la demanda de agua para el consumo humano y la agricultura (Pizarro et al., 2022), lo cual puede conducir a una mayor presión sobre la oferta y a una sobrexplotación de los acuíferos.

El cambio climático también está impactando los glaciares de la región, que constituyen una fuente crucial de agua dulce. El glaciar El Tapado, uno de los más relevantes, situado en la cabecera de la cuenca, ha evidenciado un retroceso significativo en su manto de nieve en los últimos años. Como se puede observar en la Figura 2, este retroceso se ha documentado entre los años 1956 y 2020 (Robson et al., 2022).

Esto sugiere que la contribución de agua del glaciar al río Elqui está disminuyendo, lo cual podría tener repercusiones serias en la disponibilidad y seguridad del agua en la cuenca en el futuro.

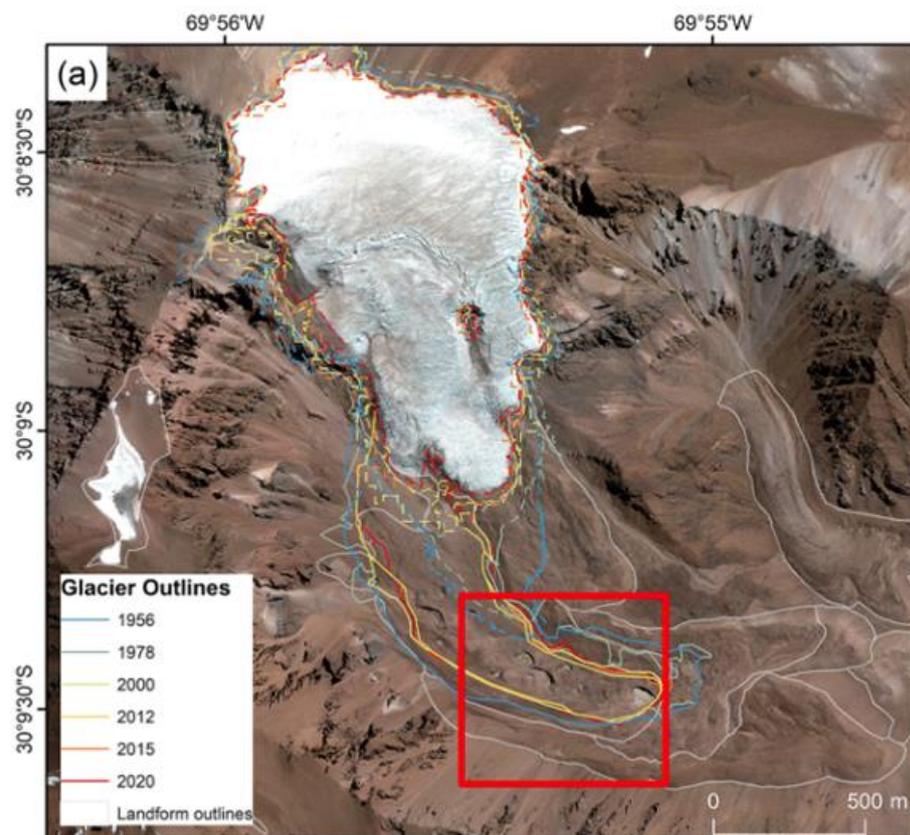


Figura 2: Retroceso Glaciar El Tapado.

La agricultura, que representa una de las actividades económicas fundamentales de la cuenca, ha experimentado impactos significativos. Los productos agrícolas típicos de la región, como la papaya, la palta, la chirimoya, el higo, el durazno y la uva, entre otros, dependen en su mayoría de una provisión constante de agua.

Como se menciona en párrafos anteriores, la precipitación ha disminuido en los últimos años, pero este efecto al parecer no sería el único factor responsable de la disminución del recurso hídrico, sino más bien un exceso de la demanda como se refleja en el aumento del PIB (Producto Interior Bruto) (Fig. 3), producto de las actividades que consumen agua, principalmente agricultura. También, se ha experimentado en los últimos años producto de la sequía, un aumento en el otorgamiento de derechos de aguas subterráneas, lo que se traduce en un mayor estrés hídrico del acuífero (Pizarro et al., 2022).

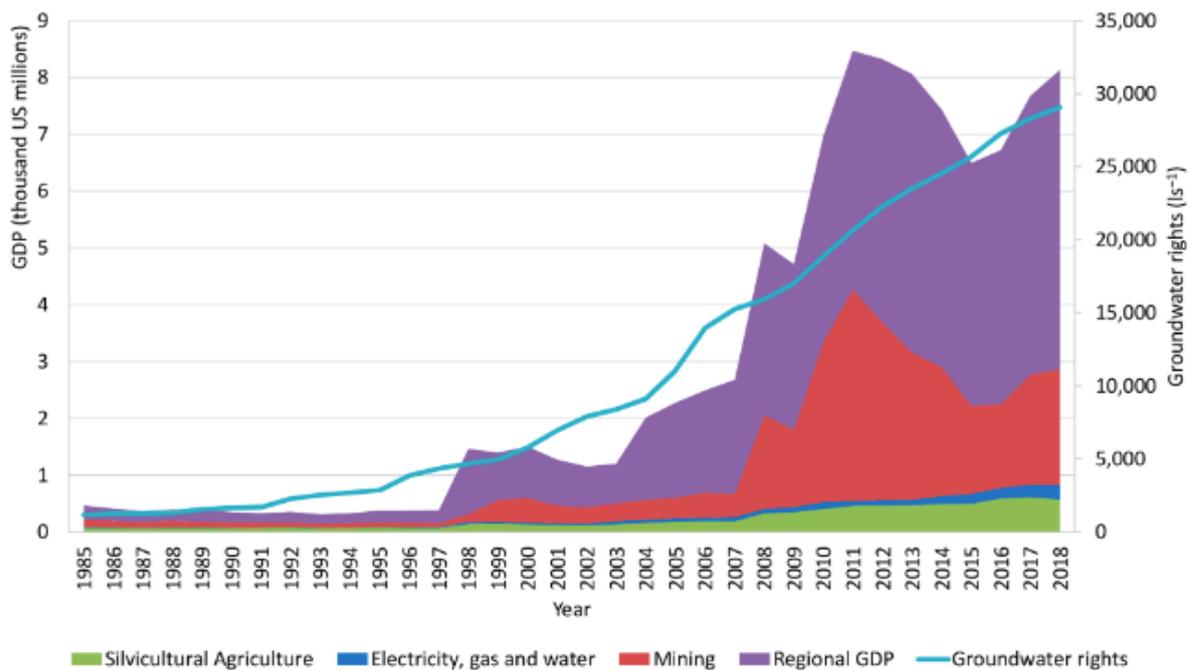


Figura 3: Variación PIB y derechos de agua subterráneos.

La actividad agrícola puede contribuir a la contaminación del agua a través de la dispersión de solutos, especialmente nitratos. Los fertilizantes, que a menudo contienen altas concentraciones de nitratos, pueden infiltrarse tanto en las aguas superficiales como subterráneas. Esta situación puede deteriorar la calidad del agua, con posibles repercusiones dañinas para la salud humana y la biodiversidad.

Por consiguiente, resulta importante realizar un estudio sobre el flujo y el transporte de solutos en las aguas subterráneas de la cuenca del río Elqui. Este análisis permitirá comprender de mejor manera la dinámica de los recursos hídricos subterráneos y el impacto que el cambio climático y la agricultura pueden tener sobre la calidad del agua. Los hallazgos de este estudio podrían ser utilizados para formular estrategias de manejo de recursos hídricos que sean sostenibles y que mitiguen los efectos del cambio climático.

4. OBJETIVOS

El objetivo general de este estudio es realizar un modelo de simulación de flujo y transporte de agua subterránea de la cuenca del río Elqui, frente a la explotación actual del recurso hídrico.

Objetivos específicos:

- Generar un modelo conceptual del acuífero en estudio
- Caracterizar los parámetros relevantes del modelo conceptual
- Generar el modelo numérico y calibrar los parámetros mediante el software Visual Transin.
- Conocer el patrón de flujo y de transporte en la cuenca del río Elqui, bajo las condiciones actuales.

5.2. Geomorfología área de estudio

La cuenca del río Elqui destaca por sus notables características geomorfológicas, las cuales se pueden categorizar en tres zonas: la franja litoral, la media montaña y la alta montaña (Cepeda et al., 2008).

En primer lugar, la franja litoral o costera, que es la región más occidental y de menor elevación. Esta zona se caracteriza por sus terrazas marinas, formadas tanto por depositaciones como por procesos de erosión de las rocas litorales.

En segundo lugar, se encuentra la media montaña, que incluye las áreas interfluviales o cadenas montañosas presentes en la cuenca hidrográfica. Esta región se define como un conjunto montañoso de altitud moderada, notablemente desgastado por la erosión fluvial.

Finalmente, la alta montaña es la región más oriental y de mayor altitud. Esta se corresponde fundamentalmente con la sección elevada de los Andes, donde se originan los cursos de agua que forman el río Elqui (Figura 5), motivo por el cual se le conoce también como la Cordillera de Elqui (Romero et al, 1988).

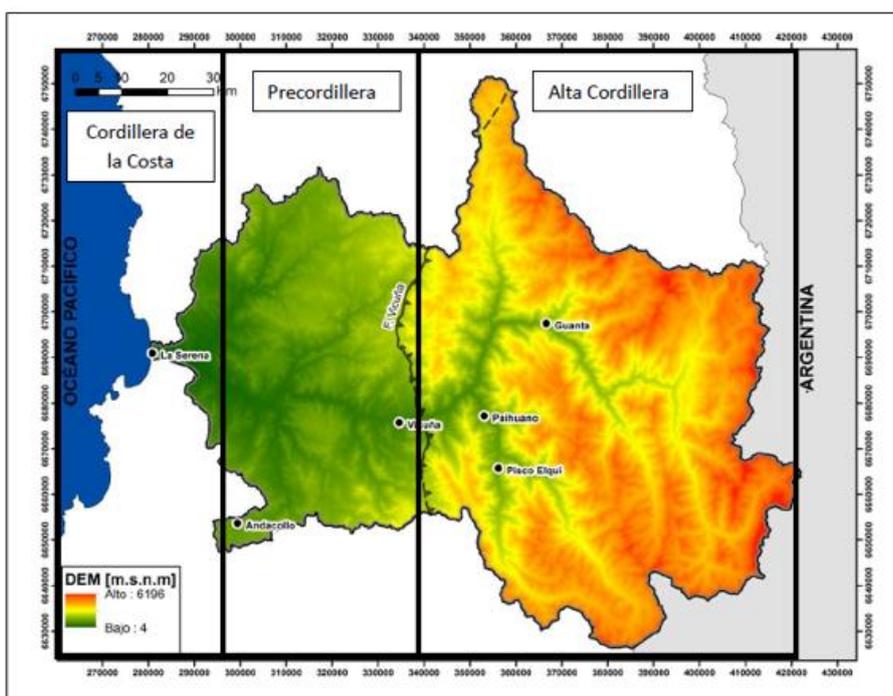


Figura 5 : Principales unidades geomorfológicas cuenca del río Elqui.

5.3. Geología área de estudio.

La composición geológica de la cuenca del río Elqui es diversa y se caracteriza principalmente por la prevalencia de rocas volcánicas de carácter calcoalcalino, pertenecientes a las eras Mesozoica y Cenozoica, y se encuentran entremezcladas con rocas sedimentarias de características similares (Guevara, 2003). Estas formaciones albergan variados depósitos hidrotermales ricos en diferentes metales (Oyarzún et al., 2007).

La geología superficial en las principales corrientes de agua se compone de formaciones geológicas que consisten en depósitos no consolidados y rellenos de material fluvial. Estos incluyen gravas, arenas y limos en el actual curso de los ríos, así como en sus terrazas y planicies de inundación subyacentes. La geología circundante a estos cauces fluviales muestra una variedad considerable de formaciones (DGA, 2004).

Los depósitos fluviales conforman el material de relleno predominante en estos valles. La profundidad de estos rellenos puede llegar a los 200 metros en áreas más bajas y sus características granulométricas cambian a lo largo de su extensión. Las fracciones de limo y arcilla no exceden el 20% del volumen total de relleno (Collao y Gutiérrez, 2009).

En resumen, se puede afirmar que la cuenca del Elqui está compuesta por tres principales tipos de rocas: graníticas, volcánicas o sedimentos volcánicos, y sedimentos cuaternarios que se encuentran en los valles (Figura 6).

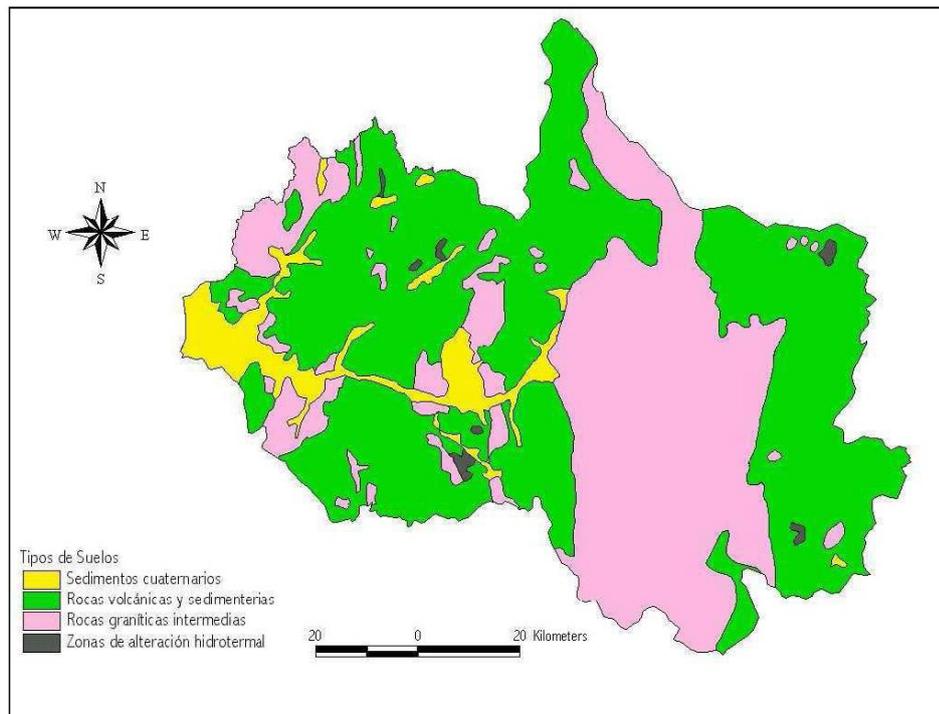


Figura 6 : Mapa geológico de la cuenca del río Elqui.

5.4. Hidrogeología área de estudio.

La región bajo análisis se compone principalmente de rellenos fluviales, que forman una unidad hidrogeológica de notable permeabilidad, con un origen aluvial. Se identifican materiales granulares, predominantemente grava y arenas, entrelazados con capas de arcilla y limo, sin superar los 200 metros de espesor total.

Esta unidad permite la identificación de un acuífero superior libre, que se encuentra en los primeros 10 metros del relleno y sobrepone a acuíferos más profundos de naturaleza libre, semiconfinada y confinada.

La sedimentación de esta unidad puede dividirse en tres capas principales. La más superficial, correspondiente a los primeros 15 metros de profundidad, está formada por depósitos de grava y arenas, ripio, y rocas más grandes, con una presencia mínima de sedimentos finos. Esta capa presenta baja compactación y excelente capacidad hídrica.

La capa intermedia varía en espesor entre 30 y 120 metros y está compuesta por arenas de variados tamaños, grava, rocas más grandes, y arcilla, con inclusiones de arcilla de tamaño variable. La capa más profunda, con espesores también variables entre 30 y 120 metros, se

compone de niveles arenosos y de grava y niveles arcillosos con rocas característicamente grandes. Esta capa muestra mayor compactación y menor granulometría, por lo tanto, su capacidad hídrica es inferior a la de la capa superior. Bajo esta capa se ubica el basamento rocoso en el acuífero.

Estos rellenos sedimentarios a lo largo del río Elqui presentan una considerable variación en los coeficientes de permeabilidad y transmisividad. La permeabilidad fluctúa entre 2 y 5 m/día hasta valores de 45 a 65 m/día, mientras que la transmisividad varía entre 130 m²/día y 5300 m²/día. Estas variaciones podrían estar influenciadas por la cercanía al río, lo que podría dar lugar a valores de transmisividad excepcionalmente altos (DGA, 2003). El coeficiente de almacenamiento se estima en torno al 7% (CORFO, 1955).

La Figura 7 ilustra el flujo subterráneo, que se mueve de oeste a este, siguiendo el curso del río, con un gradiente que varía a lo largo del trayecto. En promedio, el gradiente de la capa freática desde Rivadavia hasta La Serena es de aproximadamente 1% (DGA, 2004).

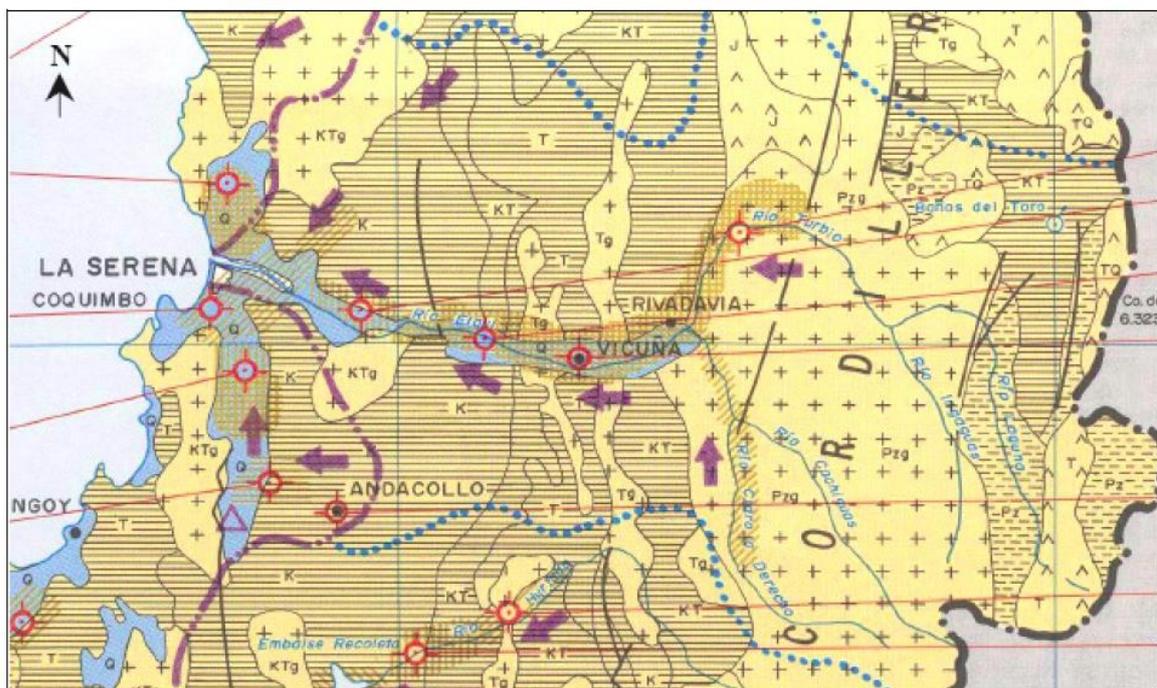


Figura 7: Sentido de flujo cuenca del río Elqui (Escala 1:1.000.000).

5.1. Aspectos climáticos

La cuenca del río Elqui se caracteriza por la diversidad de sus climas, predominando principalmente tres tipos: Estepárico Costero o Nuboso, Estepa Cálido y Templado Frío de Altura (Dirección General de Aguas (DGA), 2004).

El clima Estepárico Costero o Nuboso se extiende a lo largo de toda la línea costera, llegando hasta 40 km hacia el interior a través de los valles transversales y quebradas. Este clima se distingue por su abundante nubosidad, humedad y temperaturas moderadas. Posee un periodo seco que dura entre 8 y 9 meses y una precipitación promedio anual de 130 mm.

Por otro lado, el clima Estepa Cálido se encuentra en el valle del río Elqui, a altitudes superiores a los 800 metros. Se caracteriza por la escasez de humedad en el aire y ausencia de nubosidad. Sus temperaturas son más elevadas que en la zona costera, las precipitaciones son menos frecuentes y los períodos de sequía son una constante.

Por último, el clima Templado Frío de Altura se localiza en la cordillera de los Andes, por encima de los 3000 metros de altitud. Es característico por sus altas precipitaciones, bajas temperaturas y la presencia de nieve permanente, lo cual constituye una contribución significativa de agua durante el periodo estival a través del deshielo.

5.2. Aspectos hidrológicos

El comportamiento hidrológico de la cuenca del río Elqui es de naturaleza exorreica, es decir, sus ríos terminan en el mar. Además, tiene un régimen mixto, recibiendo caudal tanto de las precipitaciones invernales como del deshielo en los periodos más cálidos.

El sistema hídrico de la cuenca exhibe un régimen nivopluvial, desembocando en el Océano Pacífico. Se extiende aproximadamente 240 km y presenta una pendiente media de 1,1%. No hay rápidos ni saltos en su curso. Algunos afluentes contribuyen con volúmenes significativos de agua, especialmente durante eventos de lluvia intensa (Cepeda et al., 2008).

El caudal promedio del río Elqui es de 7,1 m³/s, con variaciones interanuales pronunciadas. Su patrón de crecida varía con la altitud. En el segmento medio-alto (aguas arriba de Vicuña), las crecidas más intensas, tanto en volumen como en caudal máximo instantáneo, ocurren en la primavera y el verano. En el tramo medio-bajo (aguas abajo de Vicuña), aunque los

caudales máximos instantáneos se originan por lluvias (en otoño e invierno), los volúmenes de crecida más altos ocurren en la primavera y el verano. Los afluentes del Elqui, los ríos Turbio y Claro, tienen caudales promedio de 4,3 m³/s y 3 m³/s, respectivamente (Honores y Alfaro, 2002).

La Figura 8 muestra la fluctuación estacional en las estaciones fluviométricas del río Elqui en Algarrobal y en Almendral, situadas a 760 m.s.n.m y 395 m.s.n.m, respectivamente. En ambas estaciones se observa un régimen nival, con los caudales más elevados entre noviembre y febrero debido al deshielo. En años de sequía, los caudales se distribuyen de manera uniforme, sin variaciones significativas.

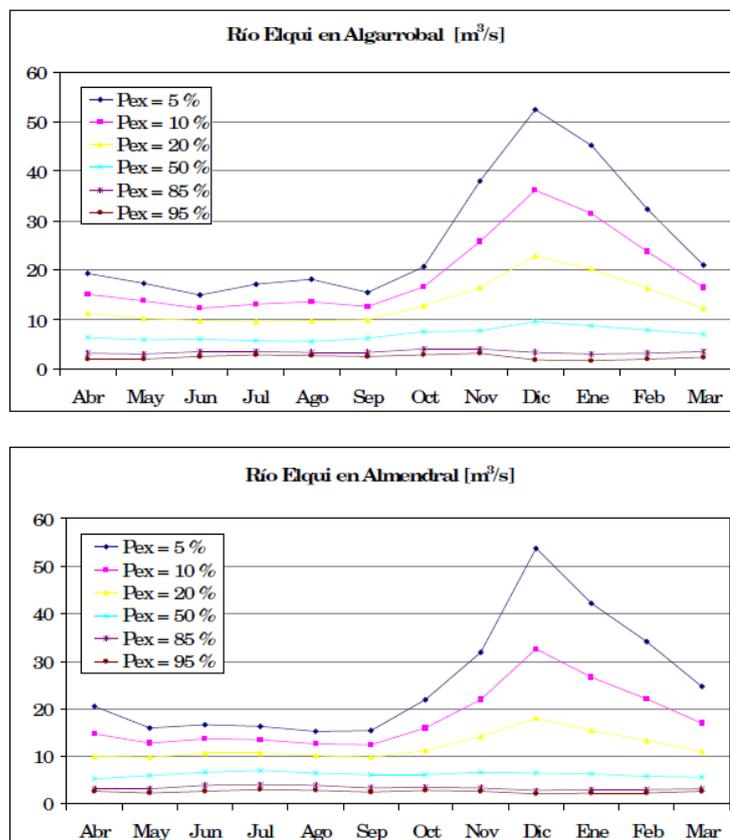


Figura 8: Caudales medios mensuales.

5.3. Actividad Económica

Las actividades económicas predominantes en la cuenca del río Elqui consideran la agricultura y la minería.

Este valle, se considera un centro agrícola importante y dispone de una superficie cultivable de 23000 hectáreas. Según el Censo Agropecuario del año 2007, aproximadamente 20479 hectáreas de este total se dedican a la producción de cultivos anuales y perennes. El resto se utiliza para pastizales (Dättwyler, 2008).

6. MODELO NUMÉRICO

En el presente capítulo se detallan los pasos y procedimientos que tienen como objetivo generar un modelo hidrogeológico de un sector del río Elqui. Para tal efecto en una primera parte se realizará un modelo conceptual que ayude a comprender el comportamiento y variables que influyen dentro de nuestra zona de estudio. Posteriormente, con esta información generar los datos de entrada que se utilizarán en el modelo numérico para finalmente, con esta información, modelar con el software Visual Transin.

6.1. Modelo conceptual

Con un modelo conceptual se determinan cuáles son las variables y parámetros que se requieren, para lograr una representación simple del sistema real con la ayuda del conocimiento científicos del lugar en estudio.

Para el caso del río Elqui, el modelo conceptual hidrogeológico incorpora datos específicos y conocimiento científicos tomado de los distintos estudios para lograr discretizar el dominio y comportamiento de la zona para representar el transporte de flujo y contaminantes.

Es así, como en la Figura 9 se presenta el modelo conceptual utilizado para aproximar la modelación numérica.

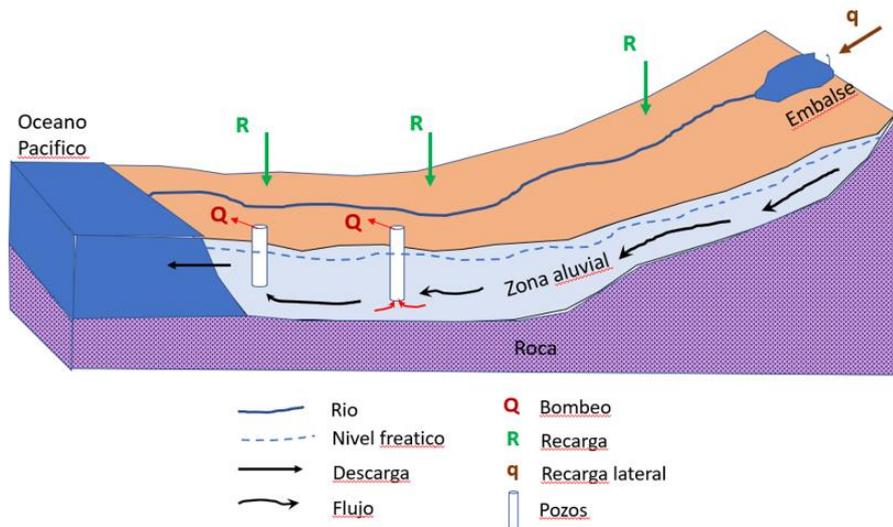


Figura 9: Modelo conceptual.

La conceptualización considera la delimitación de una zona de recarga del acuífero, los cuales corresponden al suelo permeable con una considerable capacidad hídrica correspondientes en gran parte a zonas de agricultura. Para este caso en particular se ha considerado una capa acuífera, información recogida del estudio (CORFO, 1955)

Adicionalmente, se considerarán dos tipos de recargas, una pluvial y otra por efecto del río el cual sigue un trayecto paralelo el recorrido de toda la zona. En cuanto a las descargas, serán consideradas la evapotranspiración y la descarga del acuífero en el sector bajo hacia borde costero. Es importante mencionar que en este caso particular no se considera la influencia de la cuña salina, por lo que la descarga del acuífero se consideró alejada a unos 8 km del borde costero, para evitar los efectos de este tipo de contaminación.

Finalmente, en la parte superior del acuífero, se considera delimitado por un embalse que será ingresado dentro del sistema influenciando las recargas del acuífero.

Con todas estas variables y parámetros considerados en el modelo conceptual se procederá a caracterizar y determinar los datos de ingreso al modelo numérico computacional.

6.2. Límites y capas del acuífero

Los rellenos aluviales situados en la zona de estudio constituyen la principal unidad hidrogeológica formando un medio capaz de almacenar y transferir el agua. Los límites del acuífero se tomaron según el mapa geológico de la cuenca (Fig. 6), donde los rellenos aluviales que forman la zona permeable corresponden al borde del modelo, limitado desde el embalse Puclaro por el Este hasta el punto de salida cercano al borde costero por el Oeste.

La zona exterior a los rellenos aluviales está conformada por rocas graníticas, rocas volcánicas/sedimentarias y los sedimentos cuaternarios los cuales generan el confinamiento del acuífero considerado borde impermeable en este caso. En general, los límites físicos considerados en el acuífero corresponden al basamento rocoso que se observa en ambos lados del río Elqui en los márgenes de las planicies con potencias variables de 100 m y llegando en la parte más profunda a 200 m aproximadamente (Romero et al., 1988).

Al elaborar el modelo conceptual, los materiales de relleno aluvial en el área de estudio se consideran como una capa de espesor variable, delimitada en la parte superior por el nivel de la superficie y en la parte inferior por la capa de roca base.

6.3. Constantes elásticas del acuífero

Para la construcción del modelo hidrogeológico, se consideran las constantes elásticas propias de la zona de estudio, que corresponden a la transmisibilidad y al coeficiente de almacenamiento. La transmisibilidad se refiere a la habilidad del acuífero de permitir el paso de agua a través de su espesor (b) y está directamente relacionada con la conductividad hidráulica o permeabilidad (K) de los materiales de relleno que lo componen ($T = k \cdot b$). Por otro lado, el coeficiente de almacenamiento hace referencia a la capacidad que posee el acuífero para guardar y/o liberar agua (Custodio y Llamas, 2001).

Los valores utilizados como referencia inicial en esta investigación se derivaron de los datos publicados previamente (CORFO, 1955) y se presentan de manera resumida en la Tabla 1.

Tabla 1: Constantes elásticas en distintas secciones de la cuenca del río Elqui. (Fuente CORFO, 1955).

Sección Geofísica	Pozo	K [m/min]	K [m/día]	S [-]	T [m ² /min]	T [m ² /día]	b [m]	Acuífero
3	B3	0,0180	25,9	0,0002	0,18	259	10	inferior
		0,0033	4,7	0,0008	0,27	389	82	ambos
4	B5'	0,0021	3,0	0,0007	0,17	245	114	ambos
				0,0020	0,13	187		ambos
				0,0083	0,24	346		ambos
6	B7	0,0015	2,2	0,0016	0,11	158	113	inferior
				0,0001	0,09	130		medio
				0,0007	0,16	230		superior
				0,0002	0,17	245		todos
6'	B7	0,0014	2,0		0,18	259	129	ambos
11	C6	0,0029	4,8		0,28	403	97	ambos
	C7'	0,0019	2,7		0,18	259	95	ambos
					0,17	245	ambos	
18	B8	0,0450	64,8	0,0005	3,70	5.328	64	ambos
				0,0005	3,10	4.464		ambos
				0,0006	2,90	4.176		ambos
26'	B9	0,0310	44,6	0,0017	1,76	2.534	57	inferior
		0,0170		0,0007	1,98	2.851		ambos

6.4. Límites del Modelo y discretización espacial y temporal del acuífero

Como se mencionó en apartado 4.4, el límite del acuífero se obtuvo con la ayuda de la información geológica y corresponde a las zonas aluviales. Esta zona a su vez se discretizó espacialmente considerando la información presentada en Tabla 1 del punto 5.3. El resultado de este análisis generó cuatro zonas definidas como Aq1, Aq2, Aq3 y Aq4, orientadas de Este a Oeste, para representar las distintas características de transmisibilidad, permeabilidad, coeficiente de almacenamiento, potencias, etc. (Figura 10).

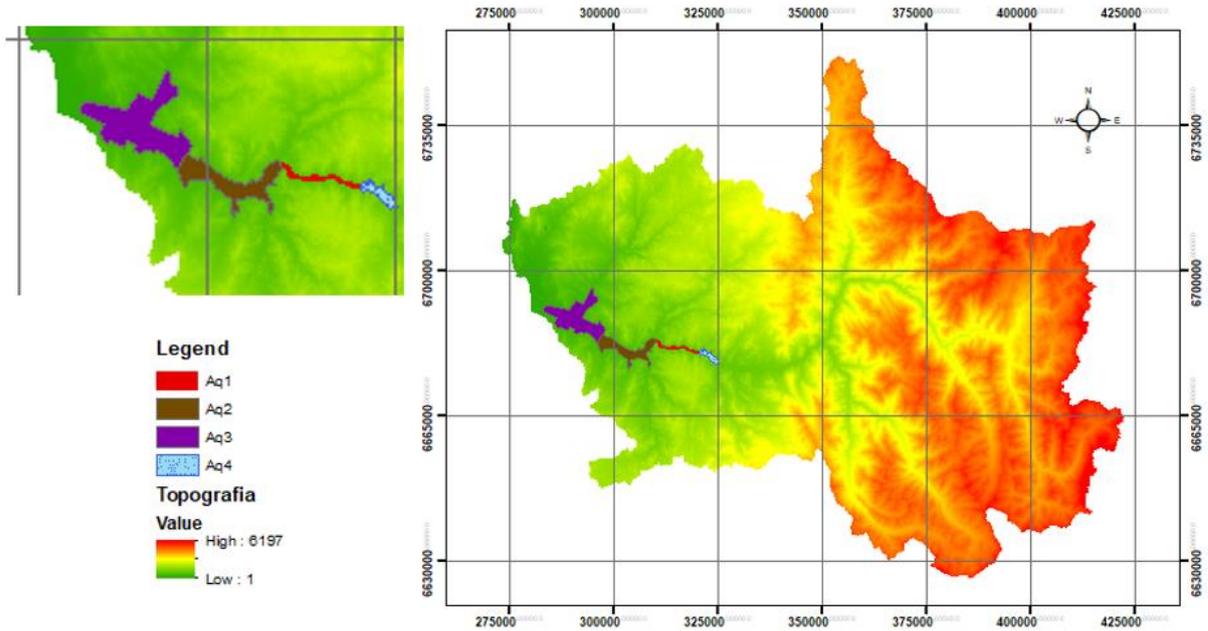


Figura 10: Límites y zonificación del acuífero.

Por otra parte, para resolver las ecuaciones de flujo y transporte, la zona en estudio se discretizó mediante una malla de elementos finitos ajustada a los límites e interfaz de los materiales. Para obtener los resultados esperados, este dominio se subdividió en 8387 elementos finitos agrupados en 4544 nodos (Figura 11).

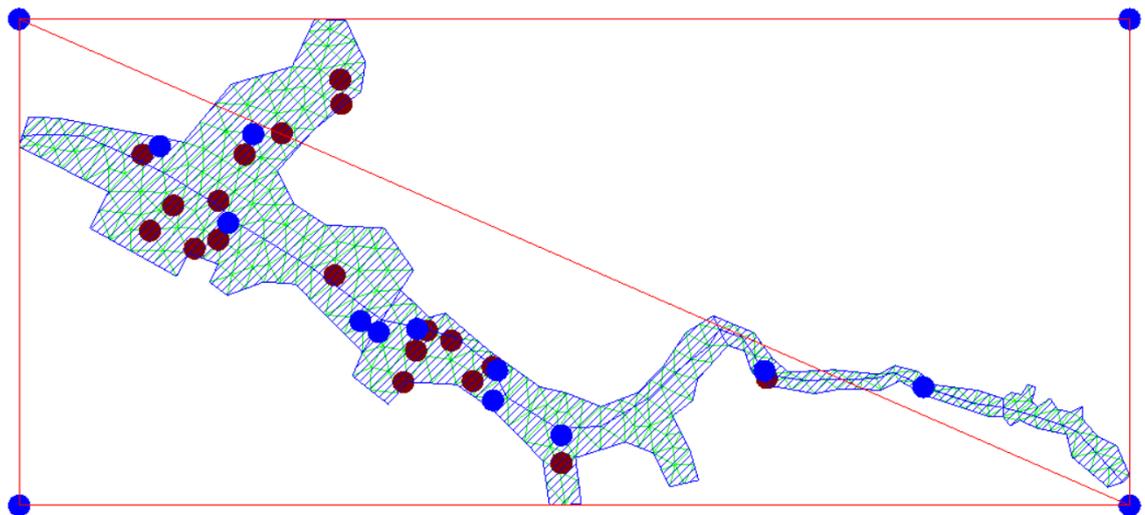


Figura 11: Mallado de elementos finitos en el dominio.

La discretización temporal en el modelo transitorio se consideró en 1723 días desde el 28 de febrero de 2017 hasta el 17 de noviembre de 2021 en un periodo de 4 años y ocho meses, de acuerdo con la información recogida de los pozos.

6.5. Pozos piezométricos y de bombeo

Los pozos de observación o piezométricos y de extracción o de bombeo utilizados en la modelación, corresponden a un conjunto de pozos reportados en (RODOS y CAZALAC, 2006). La información piezométrica pertenece a la red de pozos monitoreados por la DGA del Ministerio de Obras Pública y publicados a su portal web (www.dga.cl) donde se entrega información del nivel estático medido durante distintos periodos del año.

Los pozos seleccionados tanto para la piezometría como las extracciones corresponden solo a los que pertenecen al dominio de la zona en estudio (Figura 12).

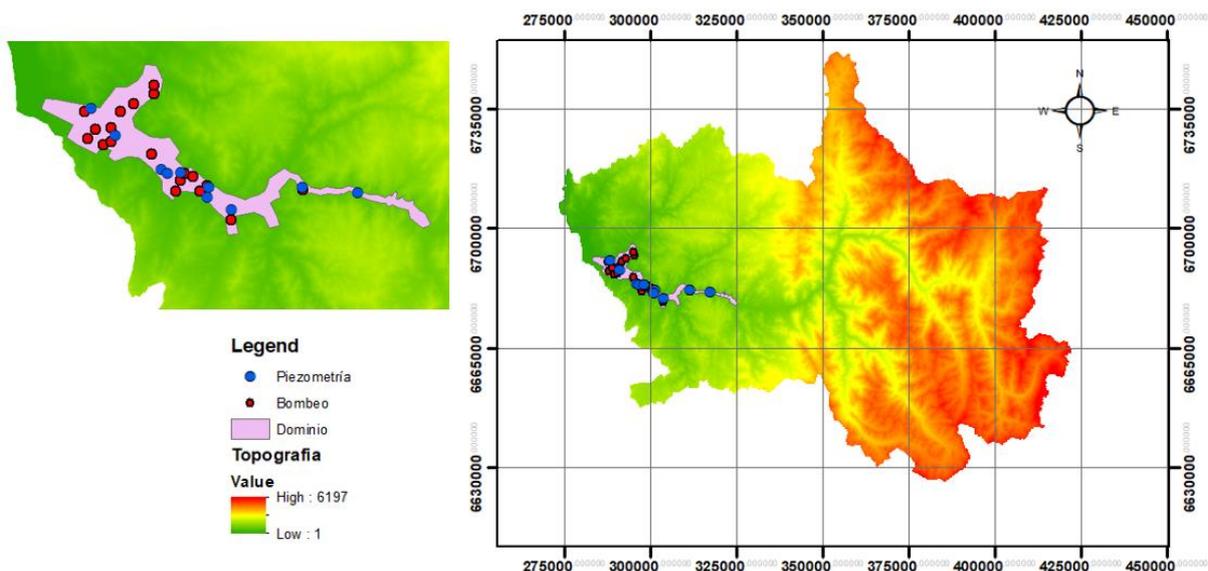


Figura 12: Ubicación pozos piezométricos y de bombeo

Las áreas de riego obtienen su suministro de agua a través de varias fuentes: aguas superficiales provenientes de canales administrados por el embalse, precipitaciones, y en caso de que estos recursos no sean suficientes, a través de pozos que extraen agua subterránea. Estos pozos de explotación o bombeo, se incluyeron en base al estudio de

(RODOS y CAZALAC, 2006), desde donde se recopiló información sobre los caudales de bombeo autorizados por la Dirección General de Aguas (DGA), de acuerdo con los derechos de agua concedidos a cada usuario.

6.6. Zonas de recarga y descarga del sistema

El análisis de los datos disponibles indica que la recarga actual del acuífero se genera principalmente por la infiltración durante el riego, el embalse, la recarga proveniente del río y la infiltración directa de las precipitaciones.

Para calcular la recarga, se asumió que las fuentes principales serían las precipitaciones que caen directamente sobre el acuífero, el embalse ubicado en el límite este y las contribuciones generadas por el río.

En cuanto a las precipitaciones, esta recarga se aplica de manera uniforme en cada sector del acuífero. Para este efecto, se utilizó información recopilada de las estaciones meteorológicas de la DGA, y se contó con el apoyo del software EASY_BAL 4.0. Los parámetros del suelo se obtuvieron a partir del estudio realizado por (Nuñez, 2006).

Por otro lado, la descarga del sistema se debe principalmente a la evapotranspiración (ETP) y a la condición impuesta aguas abajo del acuífero mediante un nivel prescrito. Para calcular la ETP, se utilizaron datos mensuales de las estaciones meteorológicas de la DGA.

6.7. Condiciones de Contorno del Modelo de Flujo

Las condiciones de contorno aplicadas en el modelo están determinadas por el embalse Puclaro, el río Elqui y la zona de descarga próxima a la costa.

El embalse Puclaro se representa a través de una condición de nivel constante (nivel prescrito) que simula la cantidad de agua que ingresa al acuífero.

En el caso del río Elqui, esta condición de recarga se incorpora considerando la conductancia del lecho del río y la altura del agua (Condición de goteo o mixta) durante el periodo de simulación. El río se modela con una conductancia constante a lo largo de toda su extensión.

El límite inferior del acuífero (próximo a la costa) se modeló a través de una condición de altura constante (nivel prescrito) para representar el flujo de agua que sale del mismo.

6.8. Condiciones de Contorno del Modelo de Transporte

Las condiciones de contorno del modelo de transporte se establecieron mediante concentraciones externas que aportan contaminación al acuífero. Se consideró una concentración prescrita de flujo másico en todo el dominio y en cada nodo. De manera similar, se asignó una concentración de flujo másico en las zonas del embalse, el río y los pozos de bombeo. A todas estas condiciones se les asignó un valor de cero. Sin embargo, para analizar la movilidad de sustancias fertilizantes como los nitratos, se introdujo una concentración externa en el sector superior de la cuenca, denominado Aq1, así como en los pozos de observación. La concentración utilizada en el modelo fue de 50 mg/l de nitrato.

En el caso del sector Aq1, se consideró una concentración prescrita de flujo másico asociada a los elementos, mientras que en los pozos, se asoció a los nodos. Se eligió el valor de 50 mg/l de nitrato debido a que es el límite aceptable para el consumo humano establecido por legislaciones internacionales como el Real Decreto 140/2003, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), la Unión Europea y muchos países, incluyendo Chile.

7. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN DE FLUJO Y TRANSPORTE

Para obtener resultados satisfactorios del modelo numérico del acuífero, se procede a calibrar el modelo. El proceso consiste en ajustar (o modificar) los parámetros hidrogeológicos (K, T, S) para que los resultados reproduzcan variables de estado medidas en terreno (niveles piezométricos de agua) tanto espacial como temporal.

Con el modelo calibrado es posible determinar la magnitud y dirección del escurrimiento de flujo subterráneo, condición necesaria para representar posteriormente problemas de transporte.

7.1. Calibración del modelo numérico

La calibración del modelo para este caso se realiza teniendo en cuenta lo siguiente: el mejor ajuste posible entre los datos de niveles piezométricos calculados por el modelo y los observados, consistencia entre los valores de los parámetros hidráulicos considerados y su rango de incertidumbre y finalmente, consistencia con los balances de masa que se dispone de la zona de estudio.

La estrategia de calibración utilizada para este caso consistió en una combinación de una etapa manual basada en criterios de prueba y error y otra automática proporcionada por el software Visual Transin 4.0.

En la Figura 13, se muestra el ajuste obtenido con los niveles piezométricos calculados y medidos.

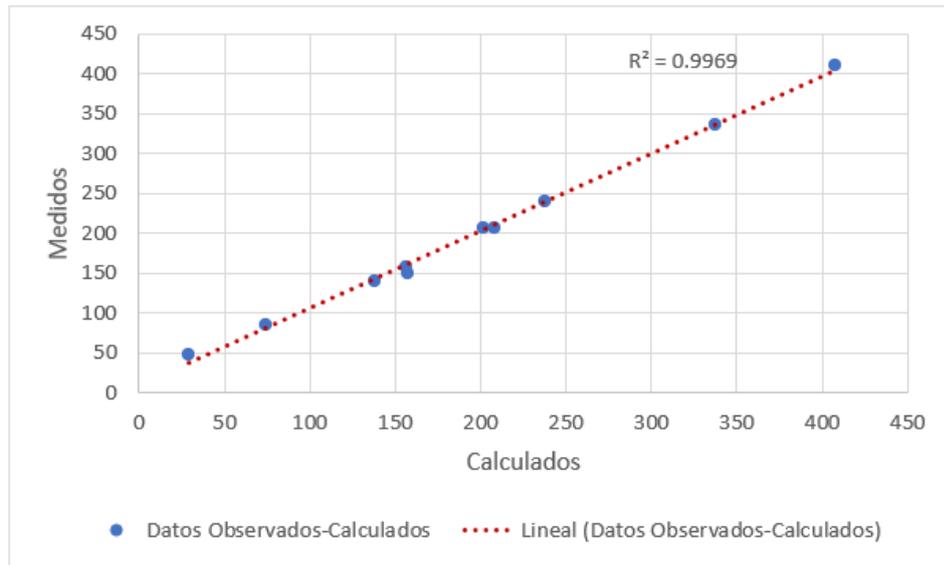


Figura 13: Ajuste entre niveles piezométricos medios y calculados.

Como se observa la calibración de los parámetros presenta un buen ajuste, con un coeficiente de correlación lineal de 0,99 lo que se traduce además en una correlación coherente con la información hídrica e hidrogeológica existente obteniendo una buena representación numérica de las condiciones de contorno de la zona en estudio.

Aunque se presenta un buen ajuste, las mayores desviaciones se producen en zona baja del acuífero asignada como Aq3 donde existe una mayor potencia.

El resultado de los parámetros calibrados de transmisividad y coeficiente de almacenamiento en el modelo de flujo, se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetro calibrados

Zona	Transmisibilidad (m ² /día)	Coficiente de Almacenamiento
Aq1	1150	0,059
Aq2	300	0,01
Aq3	350	0,0509
Aq4	3500	0,0589

Se puede mencionar que estos valores son coherentes con el rango de valores previamente considerados, obteniendo valores cercanos a los indicados por cada zona en Tabla 1 del apartado 6.3 ajustándose a la realidad.

Durante el proceso de calibración del modelo de flujo, uno de los parámetros con mayor incertidumbre se refiere a la recarga del acuífero. Aunque, la estrategia de calibración contemplo ajuste manual y automático, finalmente se consideró una recarga mensual en todas las zonas (Aq1, Aq2, Aq3 y Aq4) según la precipitación calculada.

Por último, en el modelo de transporte, la calibración se realizó manualmente en base a criterios de prueba y error. Los parámetros de calibración fueron la dispersión hidrodinámica y la porosidad, que se mantuvieron constante en 0,1.

7.2. Balance de masas

De los resultados de la modelación se obtiene un balance de masa global donde se puede observar el estado de flujos por zonas de recargas, almacenamiento, nivel prescrito y flujo por goteo entregados por el modelo. Las entradas para este caso corresponden a la recarga directa con una cantidad de 27891 Hm³/año, nivel prescrito en la parte alta de la cuenca 4315 Hm³/año y por goteo 13632 Hm³/año. Las salidas están asociada a bombeo y la ETP con un valor 127735 Hm³/año.

7.3. Modelo de flujo

A partir de los resultados de la calibración se observa en la piezometría que los ajustes se consideran aceptables en general y el modelo logra reproducir las características hidráulicas obtenidas de estudio de terreno. Sin embargo, existen diferencias en algunos puntos explicables probablemente por la existencia de sectores con pozos de explotación.

Los pozos más cercanos a la salida del acuífero, PZ1, PZ2 y PZ3, ubicados en el sector Aq3, no fue posible reproducir la tendencia de la piezometría observada (Fig. 14, 15 y 16).

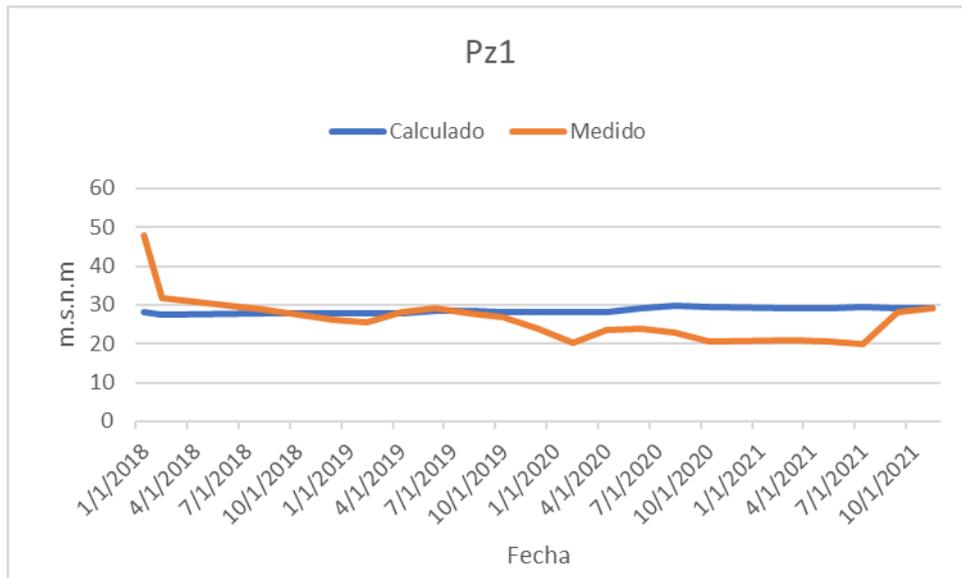


Figura 14: Hidrograma pozo PZ1, sector Aq3.

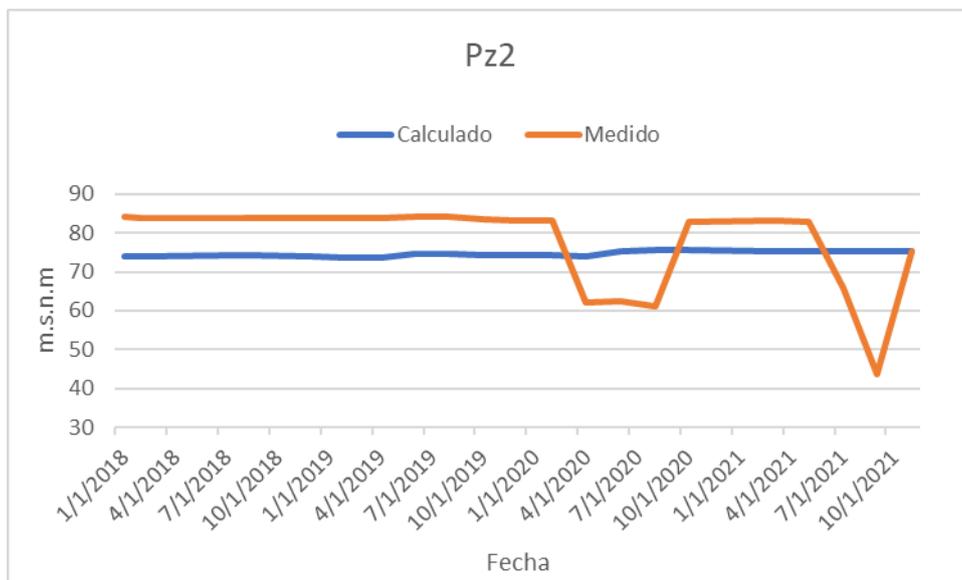


Figura 15: Hidrograma pozo PZ2, sector Aq3.

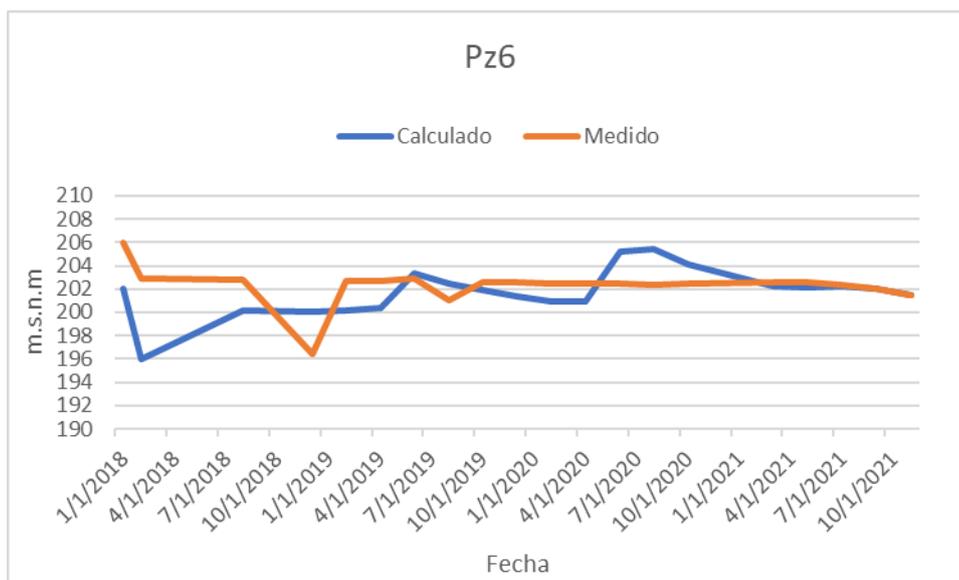


Figura 18: Hidrograma pozo PZ6, sector Aq2

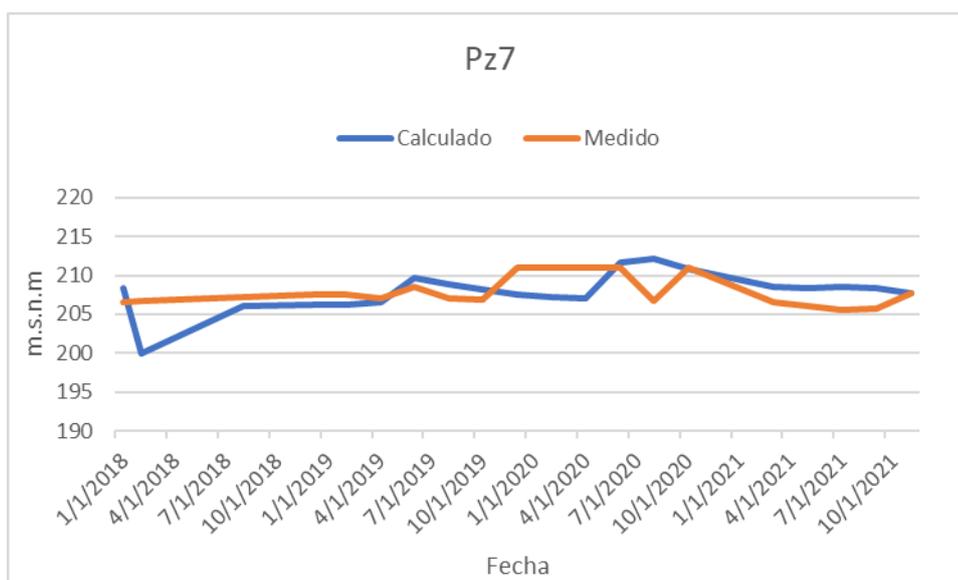


Figura 19: Hidrograma pozo PZ7, sector Aq2.

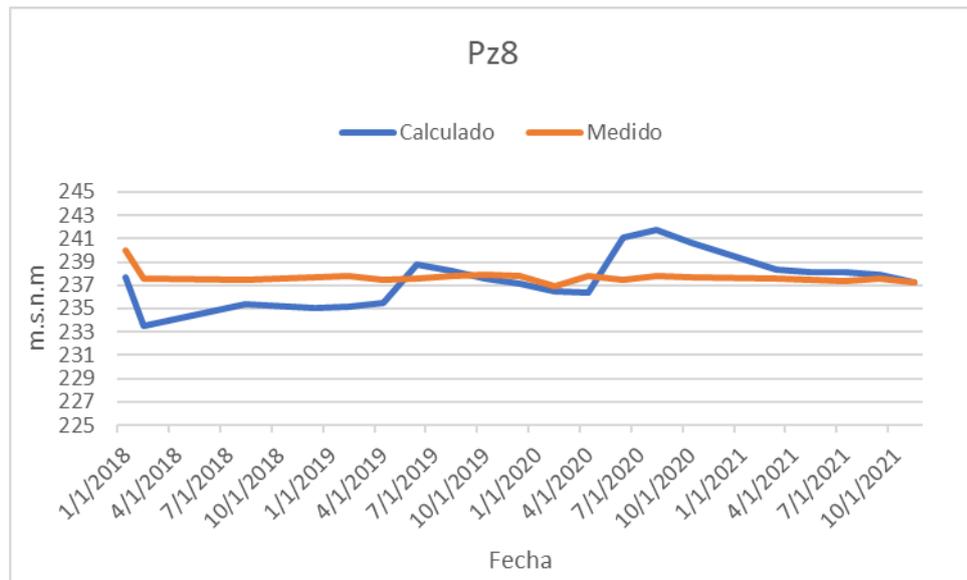


Figura 20: Hidrograma pozo PZ8, sector Aq2.

Finalmente, los pozos con mejor ajuste corresponden a los ubicados en el sector alto del acuífero Aq1, pozos PZ9 y PZ10 (Fig. 21 y 22). En este sector no hay influencia de los pozos de extracción y por lo tanto la generación de la piezometría está controlada por la carga hidráulica en régimen natural.

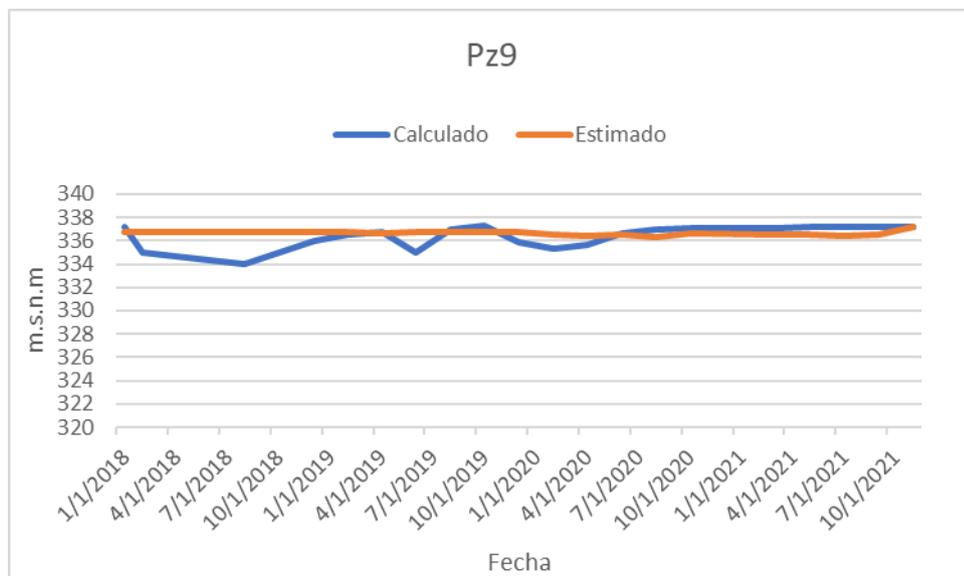


Figura 21: Hidrograma pozo PZ9, sector Aq1.

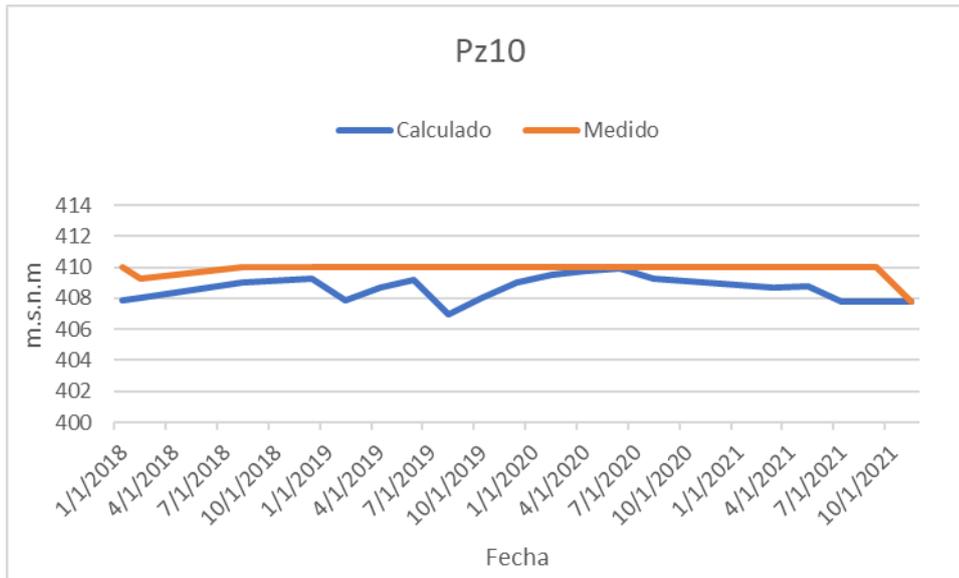


Figura 22: Hidrograma pozo PZ10, sector Aq1.

La Figura 23 y 24 presentan el resultado del modelo de flujo transitorio obtenido mediante la piezometría calibrada para los intervalos inicial y final, que corresponden a las fechas 28-02-2017 y 17-11-2021, respectivamente. Se observa un patrón claro de la tendencia piezométrica del acuífero. En las áreas de menor permeabilidad, los gradientes hidráulicos son más pronunciados debido a una mayor pérdida de energía. La dirección del flujo se alinea con la tendencia del gradiente hidráulico, desplazándose desde las zonas más altas (Aq4) hacia las más bajas (Aq3), siendo guiado e influenciado por las condiciones de contorno establecidas.

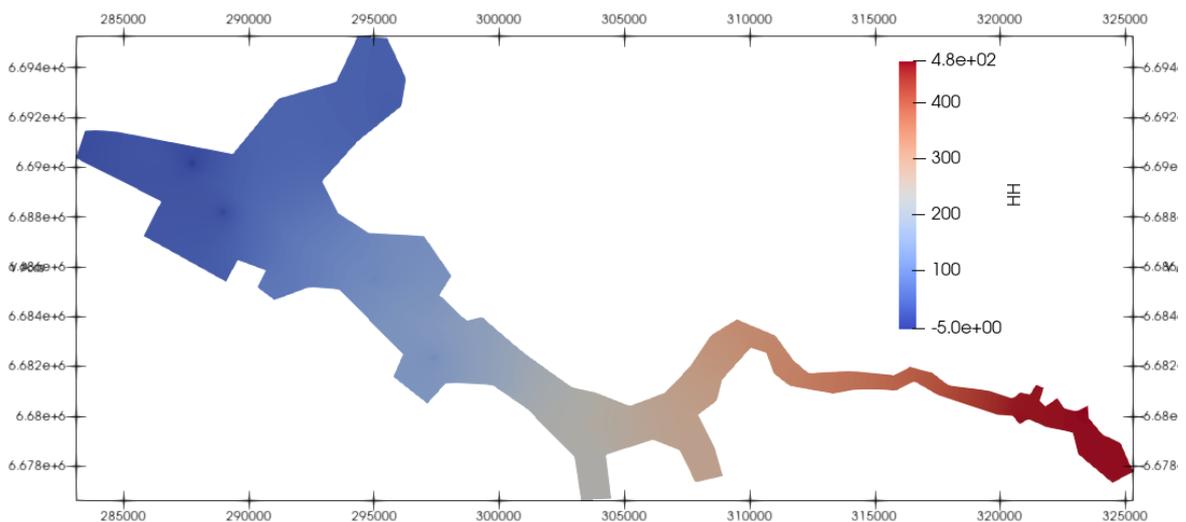


Figura 23: Representación del modelo de flujo, periodo 1.

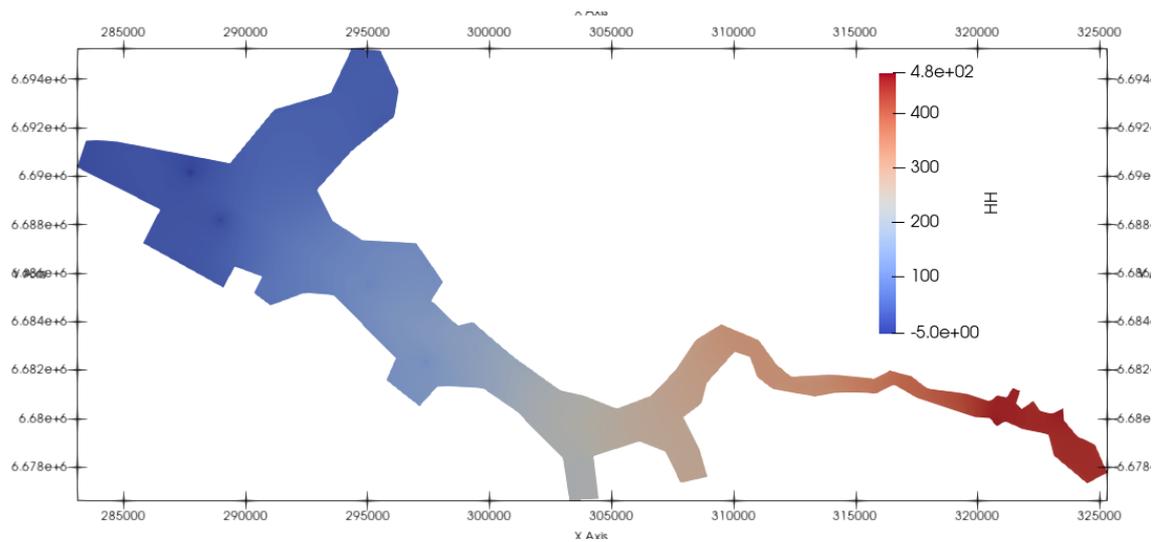


Figura 24: Representación del modelo de flujo, periodo 19.

Para verificar el movimiento del agua en régimen transitorio, se muestra en la Figura 25 y 26 la dirección de flujo en todo el acuífero. La dirección principal del flujo es de Este a Oeste, siendo coherente con la piezometría. Nuevamente la tendencia obedece al acuífero modelado, esto es, flujo en movimiento siguiendo el gradiente hidráulico representado en el modelo lo que se traduce en un resultado consisten a lo esperado.

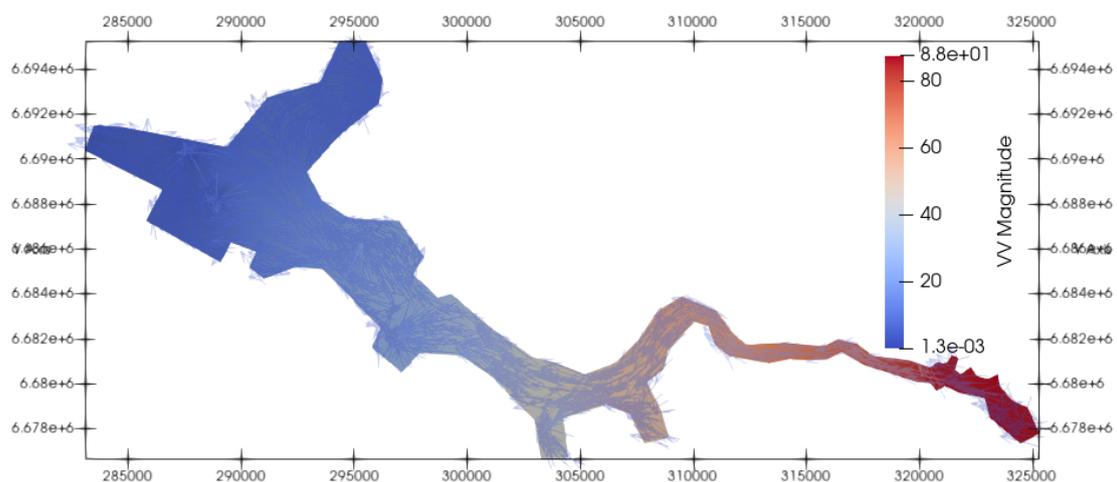


Figura 25: Representación del sentido de flujo, periodo 1.

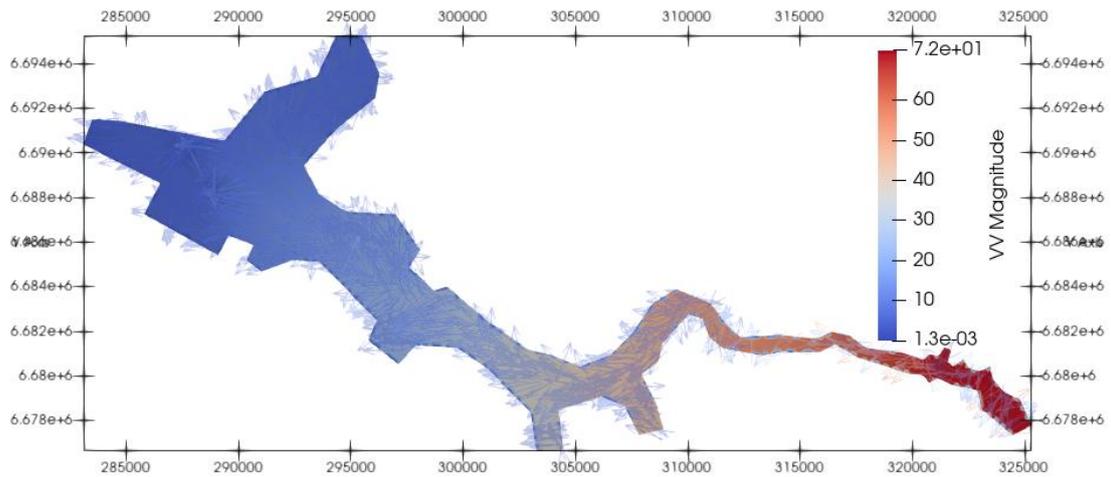


Figura 26: Representación del sentido de flujo, periodo 19.

7.4. Modelo de transporte

Tras calibrar el modelo de flujo, se ejecutó el modelo de transporte. En este caso, se introdujeron los parámetros de dispersividad, difusión molecular y porosidad para los sectores Aq1, Aq2, Aq3 y Aq4. En cuanto a la dispersividad, se consideró un valor longitudinal de 100 y un valor transversal de 10, ambos constantes en todas las zonas. De igual manera, la porosidad se mantuvo constante en todas las zonas con un valor de 0,1.

Como se mencionó en la sección 5.8, se aplicó una concentración de 50 mg/l de nitrato en el sector Aq1 para modelar los posibles impactos de las actividades antropogénicas y para determinar, desde una perspectiva hídrica y ambiental, el posible destino y la movilidad de este soluto. Las Figuras 27 y 28 muestran los niveles de concentración a lo largo del acuífero para los periodos 6 y 19 de la modelación. Se puede observar claramente la movilidad del soluto, su alcance, avance en el tiempo y su área de influencia. Notablemente, el soluto alcanza el sector Aq2 con concentraciones de alrededor de 11 mg/l y el sector Aq3 con valores aproximados de 4 mg/l, concentraciones que están dentro de los límites aceptados por la normativa.

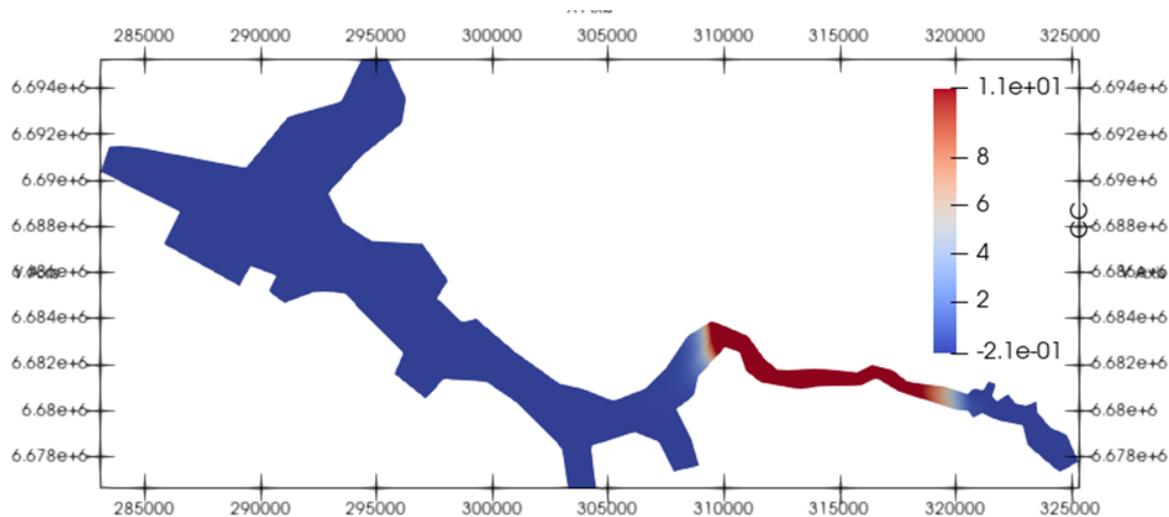


Figura 27: Representación del contaminante, tiempo 6.

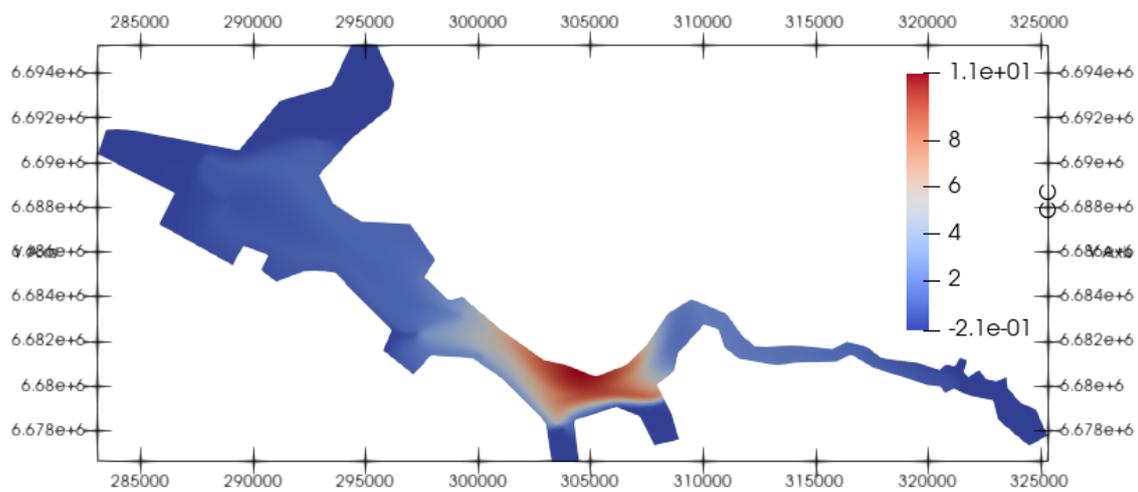


Figura 28: Representación del contaminante, tiempo 19.

8. DISCUSIÓN

El modelo numérico empleado para flujo y transporte, representado por Visual Transin 4.0, reproduce en forma adecuada el comportamiento hidrodinámico de la hidrogeología del sistema.

En la conceptualización del modelo numérico, el acuífero fue representado por la zona aluvial (acorde a la geología) donde los valores de transmisividad oscilaron entre 300 a 3500 $\text{m}^2/\text{día}$, aumentando este valor desde las zonas bajas a las zonas altas en orientación Este-Oeste. Es así como el sector más bajo denominado con Aq3 se utilizó un valor de 300 $\text{m}^2/\text{día}$, en el sector Aq2 un valor de 350 $\text{m}^2/\text{día}$, sector Aq1 un valor de 1150 $\text{m}^2/\text{día}$ y finalmente Aq4 ubicado en el sector más alto se consideró un valor de 3500 $\text{m}^2/\text{día}$. Los dos primeros valores (Aq3, Aq2) son cercanos, pero por sobre los valores recogidos de la literatura, sin embargo, los dos últimos están muy por debajo de estos valores. En el acuífero, todas las transmisividades se mantuvieron dentro de un rango de valides y por lo tanto son consistentes.

Respecto del coeficiente de almacenamiento, este se mantuvo similar en los sectores de Aq1, Aq3 y Aq4 cercanos a 0,05. Para el caso de Aq2 se le asignó un valor de 0,01. Estos valores están muy por sobre los recogidos de la literatura, que se reportan en valores de 0,0008 a 0,0017.

Respecto de los niveles piezométricos, se observa que hay diferencias de comportamiento en los sectores considerados influenciados por las recargas y las extracciones. Para el caso bajo del acuífero, sector Aq3 y pozos PZ1, PZ2 y PZ3, el modelo trata de reproducir una tendencia promedio, pero no es capaz de recoger las oscilaciones que presentan los valores observados que estaría por sobre y bajo esta tendencia. Estas oscilaciones pueden ser explicadas producto de la gran cantidad de pozos de extracción que existen en el sector lo que altera los radios de influencia y por ende se asocian a las oscilaciones en la estimación del nivel piezométrico. Sin embargo, en los hidrogramas se observa una tendencia a la disminución del nivel freático hacia el último año, manifestada con mayor claridad en los pozos PZ1 y PZ3.

Para el caso intermedio del acuífero, sector Aq2, con pozos de observación PZ5, PZ6, PZ7 y PZ8, el modelo trata de seguir la tendencia de los valores observados buscando las oscilaciones con valores por sobre y bajo lo observado a diferencia del caso Aq3. Se puede

mencionar que el modelo representa de mejor forma la tendencia del acuífero en este sector. Al igual que el caso de Aq3, el nivel freático se manifiesta a la disminución en los últimos años.

Para el caso Aq1, sector más alto del acuífero donde se encuentran los pozos PZ9 y PZ10, se puede decir que esta zona es la de mejor representación por el modelo numérico. Se puede observar en la piezometría una tendencia definida entre lo calculado y lo observado. Esto se puede explicar debido a que este sector se ha considerado sólo un pozo de extracción y las propiedades utilizadas en el acuífero responden de forma adecuada. También en esta parte alta está impuesta la condición de borde del embalse lo que genera un aporte suficiente en el acuífero para mantener valores piezométricos observado y calculados muy próximos.

Los resultados de la modelación del transporte de nitratos ofrecen una mirada global del posible impacto de las actividades antrópicas en los niveles de contaminación de este acuífero. Con una concentración prescrita de 50 mg/l de nitrato aplicada al sector Aq1, la modelación ha permitido visualizar la movilidad y el alcance de este soluto.

La dispersividad constante en todas las zonas considera una homogeneidad en el comportamiento del soluto a lo largo de los distintos sectores. No obstante, la concentración de nitrato disminuyó al llegar a los sectores Aq2 (11 mg/l) y Aq3 (4 mg/l) aguas abajo. Este comportamiento puede indicar la presencia de mecanismos de atenuación natural en la reducción de la contaminación por nitratos en el acuífero.

Finalmente, en la modelación se asume constantes los valores de dispersividad y porosidad, lo que en la realidad puede variar considerablemente. La variabilidad del suelo, las variaciones estacionales y la heterogeneidad del acuífero podrían influir en el transporte del nitrato.

9. CONCLUSIONES

El modelo matemático de flujo y transporte realizado ha permitido establecer un esquema general de funcionamiento hidrogeológico de la zona. La calibración del modelo con las medidas de nivel piezométrico observadas, la recarga calculada propuesta, las condiciones de contorno impuestas, embalse y río han sido representativas del acuífero.

Esto se corrobora con los resultados del balance hídrico subterráneo, que muestra un error mínimo de 0,016% y una alta correlación en los niveles freáticos de 10 pozos de observación ($R=0,99$). Por lo tanto, se considera que el modelo proporciona una buena representación del nivel freático del acuífero.

Para lograr en forma satisfactoria esta representación numérica incluido pozos de observación y bombeo, se elaboró una malla final de elementos finitos de 3221 nodos y 7103 elementos que involucró toda la superficie del acuífero. Al inicio del modelo se realizó un mallado grueso que consideró 1800 nodos y 2300 elementos, mallado que no fue capaz de integrar algunos pozos al proceso numérico. Debido a lo anterior, fue necesario incrementar el mallado hasta el número indicado como final donde el modelo funciona en su conjunto. Por lo tanto, es importante en el caso de la simulación numérica el procedimiento y ajuste de mallado.

El modelo fue discretizado en cuatro zonas de diferente (Aq_1 , Aq_2 , Aq_3 y Aq_4) de transmisividad y coeficiente de almacenamiento. Esto se realizó de acuerdo con los parámetros recogidos de la literatura. Se puede mencionar que el parámetro con mayor sensibilidad en cuanto a variaciones de la piezometría corresponde a la transmisividad. Bajo las condiciones impuestas se pudo observar además que ante una variación de la transmisividad en la zona Aq_3 , afectaba la piezometría del sector vecino aguas arriba, Aq_2 . Esto dio origen a que estos dos valores de transmisividad fueran cercanos. No se pudo observar este cruce de influencias entre los otros sectores vecinos que sería Aq_2 con Aq_1 y Aq_1 con Aq_4 respectivamente.

Por otra parte, el modelo numérico generado presenta algunas limitaciones debido a las simplificaciones asumidas y ajustadas en el proceso de calibración. Para el caso de las extracciones estas fueron consideradas iguales para todos los pozos con un valor promedio del total. Para el caso de las recargas estas fueron consideradas uniformes en toda la

superficie y asociadas a las precipitaciones mensuales sobre el área de la cuenca amplificadas por un factor considerando el efecto de las recargas laterales y el efecto del riego.

A pesar de que el modelo generado representa una versión simplificada de la realidad, nos permite disponer de una herramienta matemática de bajo costo, capaz de simular el flujo y transporte del acuífero con resultados que se pueden considerar razonablemente aceptables. Esta herramienta puede ser útil para apoyar la toma de decisiones enfocadas en una gestión integrada eficaz de los recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos, para la protección del acuífero.

10. BIBLIOGRAFÍA

- (MMA), M. d. (2016). *Tercera Comunicación de Chile ante Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático*. Santiago: Ministerio del Medio Ambiente, Chile.
- Cepeda, J., Cabezas, R., Robles, M., & Zavala, H. (2008). *Los Sistemas Naturales de la Cuenca del Río Elqui (Región de Coquimbo, Chile): Vulnerabilidad y Cambio del Clima*. La Serena: Ediciones Universidad de La Serena.
- Chen, W. (2020). Groundwater Spring Potential Mapping Using Artificial Intelligence Approach Based on Kernel Logistic Regression, Random Forest, and Alternating Decision Tree Models. *Appl. Sci.* 10, 425.
- Collao, D., & Gutierrez, S. (2009). *Modelo Hidrológico para manejo de embalses a partir de pronósticos de caudales*. Universidad de La Serena: Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil.
- CORFO. (1955). *Valle del Elqui, Chile – Investigación de agua subterránea*. Bureau of Reclamation: Informe preparado para la CORFO por del Departamento del Interior de EE.UU.
- Custodio, E., & Llamas, M. (2001). *Hidrología subterránea (Vol. 2)*. Barcelona: Omega.
- Delorit, J., Gonzalez, E., & Block, P. (2017). Evaluation of model-based seasonal streamflow and water allocation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 4711–4725.
- DGA. (2003). *Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del río Elqui, IVª Región*. Ministerio de Obras Públicas: Informe Técnico SDT N° 161.
- DGA. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad – Cuenca del río Elqui*. <http://www.sinia.cl/1292/articles-31018_Elqui.pdf>.
- Donoso, G., Lictevout, G., Rinaudo, E., & Lictevout, E. (2020). Groundwater Management Lessons from Chile. En J. L. Groundwater. Springer.
- Espinoza, C. (2008). *Apuntes del Curso: Modelación de aguas subterráneas, CI66J, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile*.
- Findikakis, A. (2020). *Groundwater Management Practices*. Hoboken: Taylor and Francis (IAHR Monographs). The Netherlands: IAHR Monographs.
- Grogan, D., & Wisser, D. (2015). The use and re-use of unsustainable groundwater for irrigation. A global budget. *Oak Ridge Tenn.*
- Groundwater Hydrology Group. (2008). *Visual Transin*. <https://h2ogeo.upc.edu/en/investigation-hydrogeology/software/152-visual-transin>.
- Guevara, S. (2003). *Distribución y comportamiento de metales pesados en la aguas del río Elqui y sus tributarios*. Universidad de La Serena: Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Ambiental.

- Hatch, K. (2018). *Agua Subterránea en México, retos y pendientes para la transformación de su gestión*. Mexico.
- Hick, E. (2010). *MODELACIÓN HIDROGEOLOGICA DE LA CUENCA DEL RÍO ELQUI Y SU*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de La Serena.
- Honores, C., & Alfaro, C. (2002). *Análisis de la disponibilidad del recurso hídrico superficial en los*. Universidad de La Serena: Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil.
- Iglesias, A., Ortiz, G., Rodríguez, R., & Cesar, J. (2021). Aguas Subterráneas; Explotación, evaluación, caracterización y gestión. *JCI INGENIERIA y SERVICIOS AMBIENTALES S.A.C.*
- Liu, C. (2021). Mapping groundwater-dependent ecosystems in arid Central Asia : Implications for controlling regional land degradation. *Sci. Total Environ*, 797.
- Luczaj, J. (2016). *Groundwater Quantity and Quality*. Wisconsin: MDPI AG.
- Montalbal Toala, F. (2018). *Modelización de un sistema hidrogeológico con una variabilidad extrema de la densidad (Reserva Natural de la Laguna de Fuente de Piedra)*. Madrid: Tesis Doctoral.
- Mosso, S. (2019). Assessment of sustainable groundwater resources management using integrated environmental index: Case studies across Iran. *Sci. Total Environ*, 676.
- Núñez, F. (2006). *Estimación de Parámetros de erosión en zonas áridas de la IV Región utilizando un simulador de lluvia*. La Serena: Universidad de La Serena.
- OECD. (2015). Towards Sustainable Agricultural Groundwater Use. *OECD Studies on Water, Drying Wells, Rising Stakes*.
- Oyarzun, R., Oyarzún, J., Lillo, J., & Maturana, H. (2007). Mineral deposit and Cu- Zn- As dispersión-contamination in stream sediments from the semiarid Coquimbo Región. *Chile. Environ Geol*. 53, 283-294.
- Pizarro, R., & et al. (2022). Climate Change and Overuse: Water Resource Challenges during Economic Growth in Coquimbo, Chile. *Sustainability*, 14(6), 3440.
- RODOS, & CAZALAC. (2006). *Aplicación de metodologías para determinar la eficiencia de uso del agua*. Estudio de caso en la Región de Coquimbo.
- Romero, H., Rovira, A., & Veliz, G. (1988). *Geografía IV Región de Coquimbo. Colección de Geografía de Chile*. Santiago - Chile: Instituto Geográfico Militar.
- Santibañez, F. (2016). *El cambio climático y los recursos hídricos de Chile*. Santiago: ODEPA.
- Taniguchi, M., & Hiyama, T. (2016). *Groundwater as a key for adaptation to changing climate and society*. Tokyo: Springer.