



Fondef

FONDO DE FOMENTO AL DESARROLLO
CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO

Concurso IDeA I+D 2019

Desarrollo de un modelo 3D de reservas de agua subterránea en una plataforma web para mejorar toma de decisión durante sequías en el río Limarí

INFORME TÉCNICO



El propósito del proyecto “Desarrollo de un modelo 3D de reservas de agua subterránea en una plataforma web para mejorar toma de decisión durante sequías en el río Limarí” es de mejorar el conocimiento de los recursos de agua subterránea en la cuenca del río Limarí y el acceso a este conocimiento para que los actores públicos y privados puedan tomar decisiones relevantes para enfrentar las sequías. En particular el objetivo era de obtener información sobre la ubicación y la cantidad de agua subterránea, difundir estos resultados en un modelo 3D en línea (plataforma web) con capas 2D fácilmente utilizables por los tomadores de decisión (público-privado). Las variables de interés del modelo son los espesores y profundidades de las capas freáticas, sus contenidos de agua disponible e índices de porosidad con el objetivo de identificar las zonas con mayor potencial de extracción al interior del área de estudio.

Delimitación área de estudio

Debido a la cantidad limitada de tiempo y recursos, al inicio del proyecto se elige restringir el área de estudio y la modelización de algunos sectores de la cuenca del río Limarí. Como se describe en detalle en el *Anexo 1*, el área de enfoque del proyecto se estableció de acuerdo con los asociados después de recopilar los datos de antecedentes disponibles en la cuenca y averiguar la sensibilidad de la técnica geofísica utilizada para la caracterización de acuíferos profundos. El área de estudio elegida (Figura A1.9 en *Anexo 1*) cubre todo el rango topográfico de la cuenca (es decir, desde la costa hasta la cordillera de los Andes) e incluye las subcuencas de los ríos Cogotí, Combarbalá y Pama, que son las más afectadas por la escasez hídrica.

Caracterización de los sectores acuíferos

Para poder identificar y caracterizar los diferentes sectores acuíferos en el área de estudio, la idea inicial fue de utilizar los datos provenientes de dos mediciones geofísicas: el sondeo de transiente electromagnético (TEM) para poder obtener información sobre la distribución de resistividad eléctrica en función de la profundidad y el sondeo de resonancia magnética (SRM) que permite medir directamente el contenido de agua subterránea “libre” (es decir, no ligada a la superficie interna de los poros ni almacenada en poros muy finos) como porcentaje volumétrico y obtener información sobre el tamaño medio de los poros donde es almacenada el agua a diferentes profundidades.

En el primer caso, los datos de resistividad eléctrica del subsuelo se pueden interpretar como diferentes litologías (especialmente si está correlacionada con informaciones estratigráficas locales) y, por lo tanto, pueden dar información sobre los tipos de acuíferos y los rangos de sus propiedades hidrogeológicas (p.ej., porosidad y permeabilidad). Además, los valores de resistividad eléctrica en medios porosos dependen en gran medida del contenido de agua, así que los resultados de los sondeos TEM son útiles para identificar y diferenciar potenciales zonas de acuíferos. En el segundo caso, la información sobre el contenido volumétrico de agua es parte de la caracterización de los acuíferos, mientras que la información sobre el tamaño medio de los poros se puede correlacionar con la resistividad y la estratigrafía para definir mejor la litología de los acuíferos. Además, el tamaño medio de los poros está empíricamente relacionado con la permeabilidad.

El trabajo de mediciones en terreno se llevó a cabo en dos campañas debido al retraso en la entrega del sondeo de resonancia magnética (que llegó al final de diciembre de 2020). La primera campaña involucró únicamente el sondeo TEM y se llevó a cabo entre febrero y noviembre de 2020, con un pequeño retraso debido a la pandemia Covid-19. Esta campaña resultó en 66 lugares de mediciones TEM a lo largo del área de estudio definida en la cuenca. De estos lugares, 14 fueron puntos donde se tomaron perfiles transversalmente a los valles (es decir, transecto) para caracterizar las diferentes propiedades de los acuíferos entre los bordes y las secciones medias. Por lo tanto, el número final de sondeos TEM fue de 85.

La campaña de sondeo de resonancia magnética (SRM) se llevó a cabo entre enero y abril 2021, donde se realizaron mediciones en 27 sitios a lo largo del área de estudio y se agregaron nuevas mediciones de sondeo TEM, que junto con la primera campaña resultan en un total de 73 lugares de mediciones, 19 transectos y 97 sondeos TEM. Las mediciones efectuadas con el SRM no entregaron los resultados esperados debido a diferentes factores como la baja intensidad del campo geomagnético, el elevado ruido antropogénico, la presencia de rocas magnéticas y de arcilla (referirse al *Anexo 2* para mayor detalle). Debido a las razones ya expuestas, no fue posible obtener de estas mediciones información sobre el volumen de agua subterránea y el tamaño medio de los poros donde está almacenada.

A pesar de eso, el éxito de la campaña de mediciones TEM junto con los estudios disponibles sobre la geometría de la cuenca del río Limarí, la modelación de flujo de agua subterránea y la información estratigráfica de numerosos pozos en la cuenca, han proporcionado suficiente información para la caracterización de los acuíferos en el área de estudio (referirse al *Anexo 3* por mayores detalles). Esta caracterización incluye una interpretación de las capas de resistividad en términos hidrogeológicos, y por lo tanto, una estimación cualitativa del tipo de porosidad y permeabilidad en los diferentes sectores. Mientras que los niveles freáticos se obtuvieron del modelo de flujo de agua

subterránea actualizado por la DGA (Dirección General de Aguas)¹. Además, se utilizó la modelización realizada por SERNAGEOMIN² de la profundidad a la roca basal y los datos gravimétricos³ disponibles en el área de estudio para la validación de las informaciones generadas a partir de los datos TEM cuando sus profundidades de exploración alcanzaban la roca basal, y como información complementaria por la caracterización de la base de los acuíferos en caso contrario.

En el *Anexo 3* se describe en detalle la metodología y los resultados de la caracterización hidroestratigráfica (es decir, la delimitación de capas permeables e impermeables, sus heterogeneidades y caracterización indicativa de la química de las aguas subterráneas) de los diez sectores de continuidad hidrogeológica identificados dentro del área de estudio. Estos diez sectores se definieron a partir de la geomorfológica, hidrografía y de los resultados de inversión individual de los sondeos TEM (Figura A3.3 en *Anexo 3*). En cada sector, la interpretación hidroestratigráfica se basa sobre los resultados de la inversión TEM espacialmente restringida fundada en modelos a cinco capas de resistividad eléctrica 1D. Gracias a la correlación entre perfiles de resistividad y columnas estratigráficas de los pozos cercanos a los sondeos (es decir, la correlación entre los principales materiales litológicos en los registros de perforación estratigráficos con intervalos de resistividad) fue posible interpretar los perfiles 1D de cinco capas de resistividad eléctrica como diferentes materiales geológicos. A cada material geológico (y, por lo tanto, a cada capa modelada) se asignaron rangos de propiedades hidrogeológicas (Tabla A4.1 en *Anexo 4*), como la porosidad total y de drenaje, el coeficiente de almacenamiento específico y la conductividad hidráulica. También se pudieron derivar fácilmente otros parámetros relevantes, como la capacidad de almacenamiento y la transmisividad de las capas.

Modelización 3D

La representación 3D de los modelos de resistividad 1D (referirse al *Anexo 4* por mayores detalles), está basada en la metodología presentada por Pryet et al. (2011)⁴. Es decir, se hizo una interpolación kriging ordinaria 2D de la profundidad o espesor de las capas, así como su resistividad en cada sector de continuidad hidrogeológica. En este procedimiento también se utilizaron valores adicionales de profundidad de capa derivados de la información del registro estratigráfico de perforación. Para ello, resumimos cada registro en cinco capas de acuerdo con la estructura de los perfiles de resistividad 1D interpretados dentro del mismo sector. Este método nos permitió conservar el enfoque de interpretación de capas utilizado dentro de la inversión de los datos TEM.

Desde el modelo de resistividad 3D obtenido se extrapoló la caracterización hidroestratigráfica presentada en el *Anexo 3* a todas las superficies definidas por cada sector de continuidad hidrogeológica y se obtuvieron modelos de propiedades hidrogeológicas 3D de los diferentes sectores. Estos incluyen la distribución de porosidad, porosidad de drenaje, coeficiente de almacenamiento específico y conductividad hidráulica junto con sus incertidumbres dentro de cada capa de relleno sedimentario modelada y la profundidad a la roca basal (es decir, el espesor del relleno aluvial). Además, a partir de la conductividad hidráulica y de la integración de la profundidad del nivel freático y el espesor del relleno sedimentario en las diferentes capas, fue posible estimar la transmisividad hidráulica y sus incertidumbres dentro de cada capa del relleno sedimentario modelada. En modo similar se estimó también la capacidad de almacenamiento de cada capa y de la totalidad del relleno sedimentario modelado. Para esta caracterización se consideró solamente el relleno sedimentario (también para los sectores donde fue necesaria la incorporación de los datos gravimétricos para caracterizar completamente la profundidad a la roca basal). A pesar de que definimos capas de rocas erosionadas, especialmente en el dominio geomorfológico de las montañas andinas y dentro de la parte del estuario de la cuenca de drenaje, existe una gran ambigüedad entre la presencia de arcilla o agua dentro de ella solo a partir de sondeos TEM. Por lo tanto, la estimación del espacio poroso (drenable), así como la conductividad hidráulica o el coeficiente de almacenamiento específico, deben usarse con precaución en este caso.

Reserva de agua subterránea

Finalmente, a través de la integración de la profundidad del nivel freático, el espesor del relleno sedimentario en las diferentes capas y la distribución de porosidad y porosidad de drenaje dentro de las mismas, fue posible estimar la columna de agua total disponible (es decir, almacenada en la porosidad de drenaje) y el volumen de agua total disponible almacenada en cada capa de relleno aluvial dentro de cada sector (y en la totalidad del relleno aluvial de cada sector), junto con su incertidumbre (resultados resumidos en las Tablas A4.2-A4.12 en *Anexo 4*).

¹ Flores, A. C. and Aliaga, A. M. [2020]. *Diagnóstico del Estado Hidrogeológico de la Cuenca del Limarí*. Informe Técnico. Gobierno de Chile, ministerio de obras públicas, dirección general de aguas, división de estudios y planificación.

² López, L. V., Donoso, C. B., Huerta, S. B., Cifuentes, J. L. y Fuentes, F. C. [2019]. Geometría de la cuenca del río Limarí, Región de Coquimbo. Informe Registrado IR-19-78. Servicio nacional de geología y minería.

³ Hidrogestión [2021]. *Análisis hidrogeológico para alternativas de ubicación de pozos en acuíferos cuenca río Limarí con modelación existente para explotación de aguas subterráneas en sequía*. Informe Final.

⁴ Pryet, A., Ramm, J., Chilés, J.-P., Auken, E., Deffontaines, B., and Violette, S. [2011]. 3D resistivity gridding of large AEM datasets: A step toward enhanced geological interpretation. *Journal of Applied Geophysics*. 75, 277–283. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.07.006>

Índice de potencial de extracción

El índice de potencial de extracción permite visualizar que sectores son mejores a la hora de extraer agua. Esto se puede obtener a través del caudal máximo de extracción posible. Para un mejor resultado en los cálculos de caudales se analiza cada sector de continuidad hidrogeológica por separado y se identifica en cada uno de ellos la presencia de uno o dos acuíferos. Esto se determina observando las columnas hidroestratigráficas de cada zona, tanto el tipo de sedimento definido como la extensión espacial de cada capa, poniendo énfasis en las que contienen arcilla o limo, ya que estas pueden formar un acuitardo y delimitar dos acuíferos.

Para obtener el caudal de extracción en un acuífero libre se puede utilizar la ecuación de Theis (1935)⁵ (Ecuación 1 Anexo 5), que expresa el descenso del nivel de agua en un acuífero confinado en función de un caudal conocido, el tiempo de extracción, la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento. Para utilizar la ecuación se definen ciertas condiciones. Una de ellas es que el volumen de agua en los sedimentos que se extrae se drena instantáneamente con la caída del nivel freático. Además, se utiliza el radio de un pozo promedio de 0,15 metros como punto de observación. Se establece un tiempo de duración de la extracción de agua de 6 meses, que corresponde al funcionamiento de un derecho provisional durante un Decreto de escasez hídrica. El descenso se considera como todo el espesor saturado de las capas permeables, por lo que el caudal será el máximo a extraer. Finalmente, se utiliza la corrección de Jacob (1944 en Kruseman y Ridder, 1994)⁶ para enmendar la disminución de la transmisividad a medida que el nivel freático desciende y con ello no sobreestimar la cantidad de agua a extraer.

Para los acuíferos confinados existen los casos en que el nivel dinámico del agua cae bajo el techo de la capa permeable convirtiendo el acuífero en libre. Esta situación se analiza por Moench y Prickett (1972)⁷, quienes definen que la solución para los descensos del nivel de agua y por consecuencia el caudal de extracción, se divide entre lo que sucede en la zona que ya están libres y lo que pasa en las partes que siguen confinadas (Ecuaciones 6 y 7, Anexo 5). Al igual que para el cálculo de caudal en el acuífero libre se determinan ciertas condiciones de funcionamiento; ausencia de extracciones anteriores, descenso total del nivel de agua, que es igual al espesor saturado de las capas permeables; corrección de este descenso observado (corrección de Jacob), se utiliza el radio de un pozo promedio como punto de observación y el tiempo de duración del bombeo es de 6 meses. Además, se considera que la superficie piezométrica coincida con el nivel estático de agua establecido de antecedentes.

Las propiedades hidráulicas se encuentran en imágenes ráster por lo que los cálculos de caudales se escriben en un código en lenguaje Python y se crean imágenes de píxeles con los resultados. Para más detalle de los cálculos y códigos de programación de acuífero libre y confinado revisar Anexo 5. Los resultados se grafican normalizados para hacer una representación cualitativa de cada sector y a lo largo de la cuenca. Esto se debe a los valores muy altos obtenidos en los resultados, producto de la escasa información de pozos estratigráficos a lo largo de la cuenca y a los rangos de conductividad hidráulica teóricos que son poco representativos de la variación litológica presente. Sin embargo, la variación del caudal permite obtener una caracterización de los mejores lugares para extraer agua.

Visualizador web

La información obtenida de las campañas de terreno y las propiedades hidráulicas se estructuran en un organigrama (Figura 3.4 en Anexo 5) y se visualizan en el *software* ArcGis Pro. Los datos se separan en los diez sectores de continuidad hidrogeológica para una mejor visualización. Cada uno de estos incluye un mapa “3D” que permite visualizar las elevaciones de cada capa definida por el modelo de resistividad más el nivel freático. Además, se agrega un mapa general de la cuenca, denominado “Visualizador general”, que contiene capas de contenido administrativo de toda la cuenca del río Limarí. Cada capa agregada contiene una “ventana emergente” con mayor información, que varía según la propiedad que se esté observando (Para más detalle ver Anexo 5).

La información se comparte con la red ArcGis Online. Para eso, se creó una aplicación en *Building Explorer*, que es parte de la red ArcGis, para organizar los mapas y hacerlo público. La aplicación se probó con varios formatos que se sometieron a evaluación durante las reuniones con los stakeholders del proyecto (Figura 3.7, Anexo 5). La versión final queda accesible desde la página web del proyecto (<http://aguasubterrealimari.cl/>).

Validación modelo

La validación del modelo se realizó mediante un estudio geofísico de transiente electromagnético en cuatro sectores definidos con la plataforma Web (referirse al Anexo 6 por mayores detalles). Los resultados obtenidos se compararon con los valores presentes en el modelo tanto en términos de profundidad y resistividades de las capas modeladas como en términos de la modelización hidroestratigráfica.

⁵ THEIS, C. V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. Vol. 16 (2): 519-524.

⁶ KRUSEMAN, G. P. & RIDDER, N. A. 1994. Analysis and Evaluation of pumping test data (2nd ed). International Institute for Land Reclamation and Improvement. Vol. 47: 372 pp. Países Bajos.

⁷ MOENCH, A. F. & PRICKETT, T. A. 1972. Radial flow in an infinite aquifer undergoing conversion from artesian to water table conditions. *Water Resources Research*. Vol 8 (2): 494-499.

Limitaciones

Una significativa restricción del estudio es el número limitado de sondeos TEM y registros de perforación estratigráficos disponibles para la construcción del modelo de reservas de agua subterránea. Los principales factores limitantes en cuanto a la cantidad de puntos de datos TEM fueron el tiempo disponible para las campañas de terreno y la alta urbanización de la mayoría de los sectores, lo que redujo la cantidad de ubicaciones posibles para realizar sondeos TEM sin un ruido electromagnético significativo. Con respecto a los registros de perforación estratigráficos, nos basamos principalmente en la información disponible en las solicitudes de derechos de aguas subterráneas administradas por la DGA. Estos son particularmente escasos en las zonas de cabecera y de estuario de la cuenca, que son áreas menos pobladas y, por lo tanto, con menos necesidad de explotación de aguas subterráneas y en consecuencia, de perforación.

En particular, el espacio entre los sondeos TEM realizados es probablemente demasiado grande (entre 1 y 6 km a lo largo del curso principal del río) para caracterizar completamente el complejo marco hidrogeológico de la cuenca. Esto ha sido particularmente problemático para los sectores de cabecera que cruzan la cordillera de los Andes, donde el sistema sedimentario está formado por depósitos aluviales y coluviales más heterogéneos y mal seleccionados. En este caso, se espera que la heterogeneidad hidroestratigráfica modelada (por ejemplo, el río Cogotí, Combarbalá y Pama en la Figura A4.2 en *Anexo 4*) tenga una longitud de onda mucho mayor que la real (es decir, el modelo muestra menos complejidad que la realidad). Sin embargo, tal espaciamiento es suficiente para caracterizar la hidroestratigrafía de la parte baja de la cuenca (cordón transversal y área costera), que presenta un sistema sedimentario más homogéneo de terrazas fluviales y/o marinas.

Otra limitación importante del modelo entregado pertenece a la correlación entre los principales materiales litológicos en los registros estratigráficos con intervalos de resistividad. Esto es debido en parte a la poca cantidad de registros de perforación disponibles dentro de los sectores de continuidad hidrogeológica, y en parte a la falta de información dentro de los registros estratigráficos. La descripción estratigráfica revisada, solo describe el material litológico principal sin considerar la composición de la matriz fina que puede influir significativamente en las propiedades hidrogeológicas de la capa. Esto hace que donde se interpretaron capas de grava y bolones, la matriz fina podría llevar una cantidad de arcilla/limo relevante y de hecho controlar los valores de permeabilidad de la capa.

Finalmente, el uso de valores de la literatura para las propiedades hidráulicas asignadas a cada clase de material geológico (Tabla A4.1 en *Anexo 4*) condujo a una grande incertidumbre en los resultados del modelo. Una perspectiva de este trabajo que podría reducir significativamente esta incertidumbre sería de incorporar información de pruebas de bombeo en la determinación cuantitativa de estas propiedades.