

## Anexo 1

### Definición de la zona de estudio en conjunto con asociados

#### Recopilación datos antecedentes

Para definir la zona de estudio se necesitó en primera instancia una compilación de conjuntos de datos antecedentes en la cuenca con el doble objetivo de usar la información que las medidas anteriores proporcionan para validar las medidas luego tomadas en el proyecto, y para el diseño de la campaña de terreno (esto es, elegir los lugares y tipo de mediciones en el área de estudio).

La información recopilada en la cuenca del Limari fueron organizada en: información cartográfica, que se resume en un mapa geológico, un mapa topográfico e hidrográfico y un mapa geomorfológico de la cuenca; un mapa de derecho caudales concedidos y de los APR presente en la cuenca, para la cuantificación de la presión antropogénica y los datos geofísicos y hidrogeológicos previos a esto proyecto.

- **El mapa geológico** (Figura A1.1) se dividió en cuatro grupos grandes, que dependen de cómo se formó la roca: intrusiva, sedimentaria, metamórfica y volcánica. De estos grupos, lo que puede ser problemático para las medidas del proyecto son las rocas volcánicas, que pueden influenciar las medidas hechas para el sondeo de resonancia magnética, ya que este tipo de roca podría presentar un momento magnético intrínseco (dependiendo del campo magnético terrestre en el que el magma se enfrió y formó la roca). Además, la alta resistividad de las rocas intrusivas puede reducir significativamente la profundidad de exploración del sondeo de transiente electromagnético.
- **El mapa topográfico** (Figura A1.2) muestra el gradiente topográfico de la cuenca, que además de ser importante para modelar el flujo de agua en el acuífero, da una información acerca de la pendiente que es un indicador de áreas de relleno y por lo tanto de zonas de acuífero potencialmente atractivas. En este mapa se muestra también la red hidrológica principal en la cuenca y su división en cinco sub-cuencas hidrológicas, correspondientes a los cauces con mayor recorrido en la red de drenaje (Río Guatulame, Río Grande, Río Hurtado, Estero Punitaqui y Río Limarí).
- **El mapa geomorfológico** (Figura A1.3) muestra las principales macro unidades geomorfológicas presente en la cuenca del río Limarí las cuales se relacionan con diferentes procesos de depósito y, por lo tanto, con sistemas sedimentarios distintos.
- **El mapa de derecho caudales concedidos y de agua potable rural** (Figura A1.4) permite la identificación de áreas donde los acuíferos se encuentran bajo fuertes presiones antropogénica. Los derechos de aprovechamientos de agua (DAA) representado en el mapa son solamente los DAA subterráneos otorgados para la Dirección General de Aguas (DGA). Al mapa se le sumaron el catastro de Comité de Agua Potable Rural (APR), que registra la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) para el año 2020, identificando los que tienen un actual problema con abastecimiento de agua, alguno de ellos con medidas de reparto de agua para consumo humano con camiones aljibes, y los APR con un funcionamiento normal a la fecha (abasteciendo de agua potable a su población objetivo).
- **El mapa de datos hidrogeológicos en la cuenca** (Figura A1.5) muestra las estaciones de monitoreo del nivel freático y de la calidad del agua superficial y subterránea de la DGA. También se presentan los pozos donde tenemos perfiles estratigráficos (sucesión de formaciones en el subsuelo) y pozos utilizados para pruebas de bombeos y por lo tanto para el

cálculo de algunas constantes elásticas de los acuíferos (transmisibilidad, permeabilidad y coeficiente de almacenamiento).

- **Los datos geofísicos previos en la cuenca** se subdividieron en dos mapas: un mapa de mediciones gravimétricas (Figura A1.6) y un mapa de mediciones de transiente electromagnético (TEM y nanoTEM-Figura A1.7). La gravimetría se sustenta en mediciones del campo potencial de la gravedad, realizadas en la superficie de la tierra. Este campo potencial se ve perturbado por la presencia y distribución de cuerpos geológicos de distintas densidades y profundidades, por lo que el conocimiento de éstas se puede llegar a interpretar la distribución de masas de diferentes densidades en profundidad. Desde esta información de densidades de masas se puede inferir la profundidad de la roca basal (representada en Figura A1.6) que es una medida del potencial de relleno aluvial y por lo tanto de la probabilidad de encontrar formaciones acuíferas: donde la roca basal es más profunda el relleno aluvial es más grueso y tiene mayor probabilidades de contener un acuífero.

El sondeo electromagnético en el dominio del tiempo permite de medir las variaciones de resistividad eléctrica del subsuelo trámite la medida en el tiempo el decaimiento del impulso electromagnético inducido por un trasmisor. La resistividad depende de la mineralogía (litología) y micro-estructura (porosidad, granulometría, fracturamiento) de las rocas o relleno aluvial, las cuales varían significativamente según la profundidad. Afecta de manera importante a la resistividad, el tipo de fluidos que contenga el material geológico, especialmente el grado de saturación y salinidad, juegan un rol preponderante. La distinción entre TEM y nanoTEM está hecha a partir del tamaño del trasmisor que influencia la máxima profundidad de exploración del instrumento (~100m por el nanoTEM y ~300m por el TEM).

### **Evaluación de la respuesta del equipo de transiente electromagnético**

Junta a la compilación de conjuntos de datos antecedentes, otra herramienta necesaria para la definición de la zona de estudio fue la evaluación de la respuesta o sensibilidad del equipo (TEM) a utilizar ante un acuífero profundo. Esta evaluación se hizo con el solo equipo TEM porque era el solo equipo disponible al empezar del proyecto (y por la más que mitad de su duración).

El Transiente Electromagnético (TEM) utiliza el principio de inducción de un campo electromagnético para medir las propiedades eléctricas del subsuelo. Esta técnica se usa principalmente para determinar cambios en la resistividad del subsuelo, especialmente para determinar estratificación horizontal. Una de las aplicaciones más comunes del TEM es la determinación de la geometría y propiedades de los acuíferos: techo, piso, nivel freático, salinidad, permeabilidad, etc. Esto se debe a que la presencia de agua en el subsuelo influye fuertemente en su resistividad eléctrica. La profundidad de investigación depende de los valores de resistividad del terreno (terrenos resistivos tendrán mayor penetración que terrenos conductores) y de la amplitud de la señal, que es directamente proporcional al tamaño del bucle, la corriente eléctrica y el número de vueltas de la espiral.

A partir de los resultados de estudios previos en la cuenca del Río Limarí (GCF Ingenieros, 2015a; Hidrogestión, 2021) tenemos algunas informaciones sobre la profundidad de la roca basal y la resistividad de las capas en el subsuelo de algunos lugares. Necesitamos estas informaciones como punto de partida para evaluar la respuesta y sensibilidad del equipo a posibles estructuras del acuífero profundo. La figura A1.8 muestra la respuesta del instrumento TEMfast en el caso de tres acuíferos profundos distintos.

Se presentan tres modelos sintéticos utilizados para simular las mediciones TEM, donde en los tres se consideran cinco capas:

- unidad superficial: sedimentos superficiales no saturados, con resistividad de 500 [Ohm m] y espesor de 50 [m];
- acuífero superficial con resistividad de 50 [Ohm m] y espesor de 50 [m];
- unidad más profunda sedimentaria no satura (resistividad de 500 [Ohm m] ) que varía su espesor dependiendo de los tres modelos (Modelo 1 y 2 es de 100 [m], Modelo 3 es de 150 [m]);
- acuífero más profundo y objetivo del estudio con resistividad de 50 [Ohm m], y que varía su espesor dependiendo de los tres modelos (Modelo 1 y 3 es de 50 [m], Modelo 2 es de 100 [m]);
- roca basal con resistividad de 5000 [Ohm m].

Observando los datos sintéticos generados de estos modelos y los resultados de sus interpretación (o inversión) es claro que lo instrumento puede identificar acuífero más profundo y también es sensible a variaciones en su profundidad y espesor.

### **Definición del área de estudio**

Con estas bases de datos, el día jueves 16 de enero de 2020 se organizó la primera mesa de trabajo con los asociados del proyecto: CEAZA, la Asociación Gremial de APR del Limarí, el director de CAZALAC, representante de la Universidad de La Serena, el gerente de la empresa Hidrogestión (empresa que se encuentra realizando un estudio de aguas subterráneas en la Provincia del Limarí, financiado por CORFO) y un representante de la DOH de Coquimbo. En esta reunión se evidenció que la actual sequía que vive la Región de Coquimbo tiene con bastantes problemas de abastecimiento a un gran número de Comités de APR de la región, específicamente aquellos comités que se abastecen de agua subterránea han visto disminuir el nivel freático de sus pozos, incluso quedando sin agua en algunos casos. De la zona de estudio inicial del proyecto, la provincia del Limarí, el área que presenta mayores problemas debido a la sequía, y con mayores problemas humanos y productivos asociados al agua, es la cuenca del río Combarbalá y sus afluentes. Además esta área no cuenta con soluciones cercanas de abastecimiento, ya que es una cuenca desconectada de otras cuencas, como podría ser la cuenca del río Grande. Además, se planteó en la reunión que en la provincia del Limarí la mayoría de estudios realizados en relación al agua, se centran en la cuenca del río Limarí, aguas abajo del embalse La Paloma, y que la zona de cabecera de los ríos ubicada en la cordillera es un área muy poco estudiada. Por interés científico, es importante contar con información de los acuífero desde la cordillera hasta la desembocadura del río para lo cual es necesario comenzar el estudio en la cordillera, bajar a la zona de los valles y continuar hacia la costa.

Para todas estas variables, las áreas prioritarias para los sondeos se identificaron en la cuenca del río Combarbalá, bajando río abajo hacia los embalses Cogotí y La Paloma, desde donde se seguirá el cauce del río hasta la desembocadura del mar (Figura A1.9). Además, en la reunión ordinaria del Comité Directivo del día 25 de junio de 2020, se evidenciaron algunos puntos en la grilla de mediciones de particular importancia hidrológica como:

- Junta Quebrada Seca -río Grande (recarga lateral subterránea del acuífero)
- Zona confluencia río Grande - río Hurtado
- Junta Quebrada Ingenio- río Limarí (afluente superficial y subterráneo del río Limarí que lleva agua con una mayor salinidad)
- Junta Quebrada La Placa - río Limarí (afluente con agua salada y área de interés para captación de agua subterránea para riego agrícola)
- Junta Quebrada Caballo Muerto - río Limarí (afluente con agua salada)
- Junta Estero Punitaqui - río Limarí
- Junta Quebrada las Vacas - río Limarí

## Referencias

- GCF Ingenieros [2015a]. *Estudio geofísico e hidrogeológico en la cuenca del río Limarí*. Informe Final. Corporación de Fomento de la Producción, Subdirección de Entorno para la Innovación: 209p.
- GCF Ingenieros [2015b]. *Análisis sector costanera de Ovalle a partir de nuevos antecedentes geofísicos*. Septiembre 2015.
- GEODATOS [2012a]. *Estudio geofísico nanoTEM y TEM GRUPO 1: Porvenir, Socos Barraza alto, Chalinga, Camarico Chico*. Diciembre 2012.
- GEODATOS [2012b]. *Estudio geofísico nanoTEM y TEM GRUPO 2: la Torre, las Sossas, Graneros, San Marcos, la Isla, la Ligua de Cogotí*. Diciembre 2012.
- GEODATOS [2013a]. *Estudio geofísico de resistividad métodos transiente electromagnéticos nanoTEM y TEM. Proyecto La Paloma, sector embalse la Paloma*. Marzo 2013.
- GEODATOS [2013b]. *Estudio geofísico transiente electromagnéticos TEM y nanoTEM. Proyecto cuenca del Limarí, sectores Algarrobo, Villaseca, Santa Catalina, Carachilla y la Paloma*. Julio 2013.
- GEODATOS [2013c]. *Estudio geofísico nanoTEM. Proyecto Combarbalá*. Octubre 2013.
- GEODATOS [2014a]. *Estudio geofísico nanoTEM. Proyecto sectores Farellones-Rincón de las Chilcas*. Febrero 2014.
- GEODATOS [2014b]. *Estudio geofísico mediante gravimetría y TEM. Proyecto cuenca del río Limarí*. Septiembre 2014.
- 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.
- 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.
- OLIVO OLIMPOS S.A. [2012]. *Estudio geofísico en el área de Ovalle, IV Región*.
- SEGMI [2016]. *Estudio gravimétrico sector de Tongoy- río Limarí*. Proyecto FIC-R Código BIP 304041730. Región de Coquimbo.
- SEGMI [2018]. *Estudio gravimétrico río Limarí alto, (ríos Hurtado, Grande y Guatulame) comuna de Ovalle, IV Región*.
- Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile [2003]. *Mapa geológico de Chile: versión digital* <http://www.ipgp.fr/~dechabal/Geol-millon.pdf>
- Yáñez Vidal, R.A. [2017]. *Análisis interpretativo del recurso hídrico subterráneo utilizando el método transiente electromagnético en el dominio del tiempo en la cuenca del Río Limarí, IV Región de Coquimbo, Chile*. Habilitación Profesional para optar al Título Profesional de Geofísico. Universidad de Concepción.

## Figuras

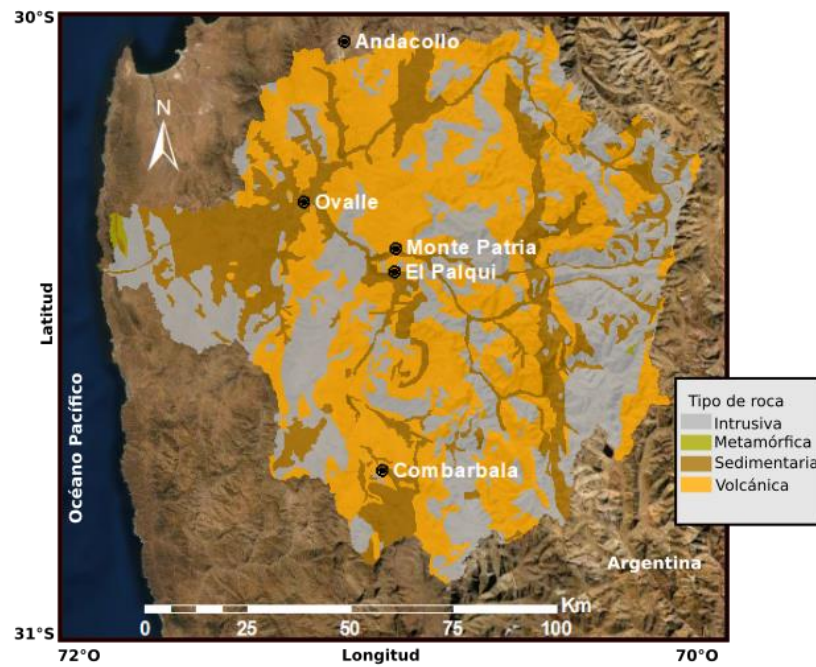


Figura A1.1 Mapa Geológico de Chile, escala 1:1.000.000. Fuente: SERNAGEOMIN (2003); Esri<sup>1</sup>.

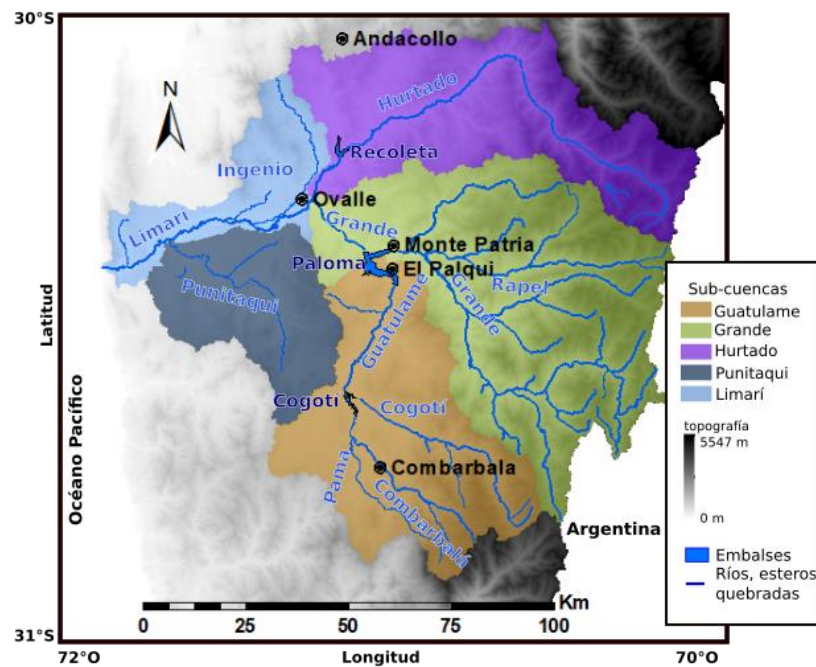
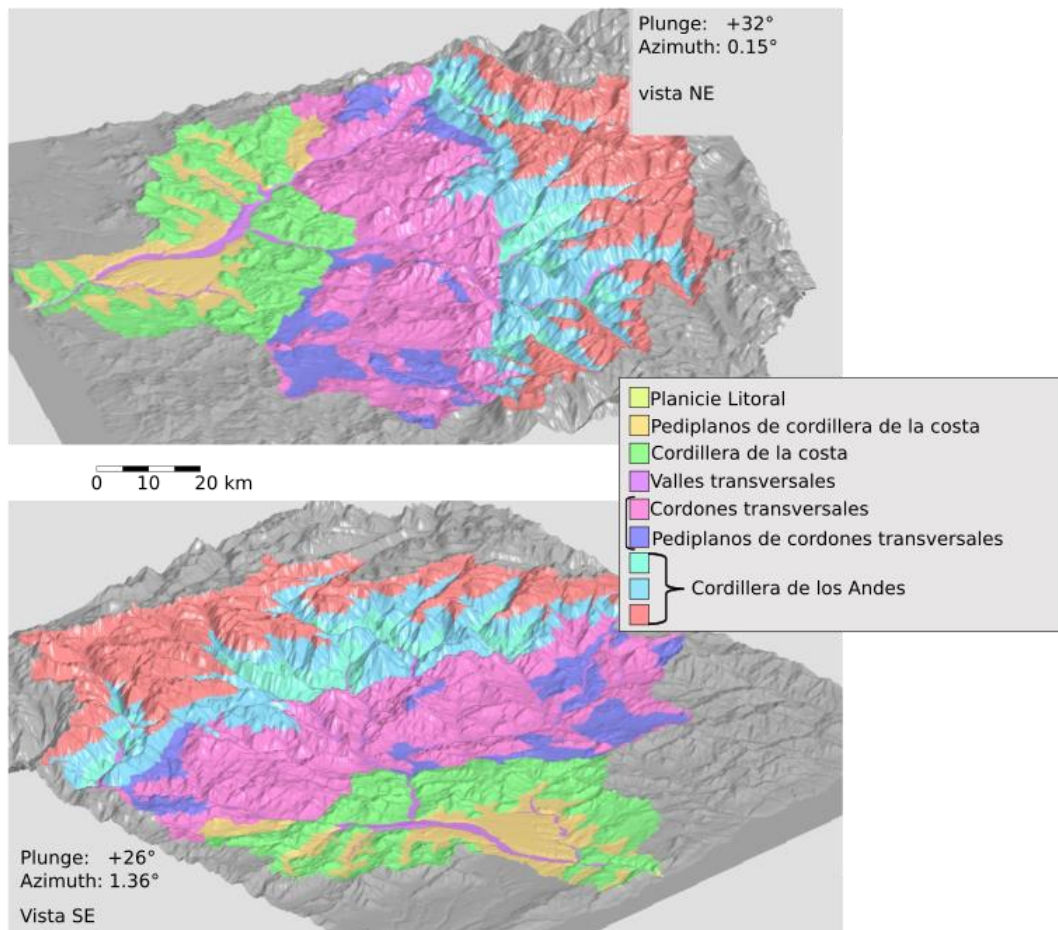


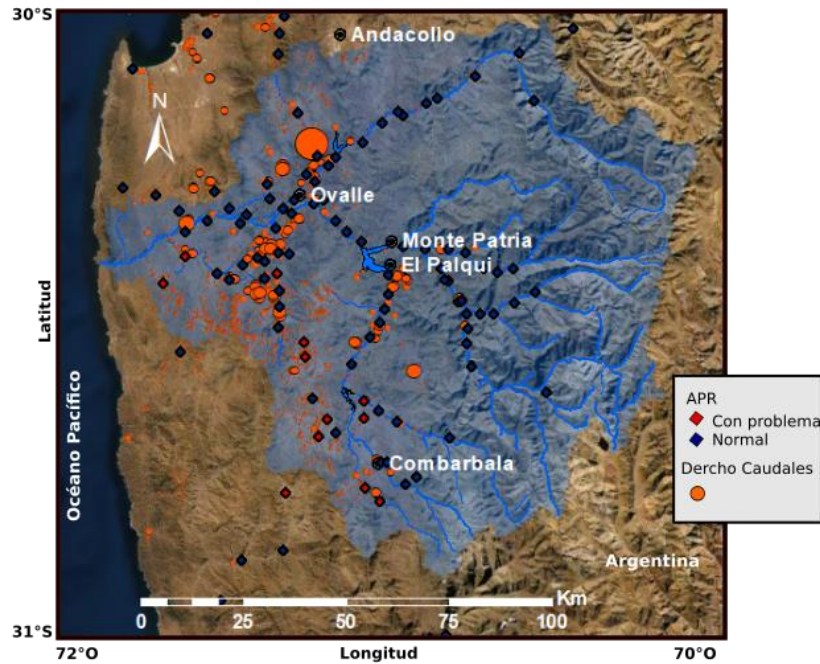
Figura A1.2 Topografía e hidrografía de la provincia del Limarí. Fuentes: ASTER GDEM<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Esri, Digital Globe, GeoEye, Earthstar Geographic, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

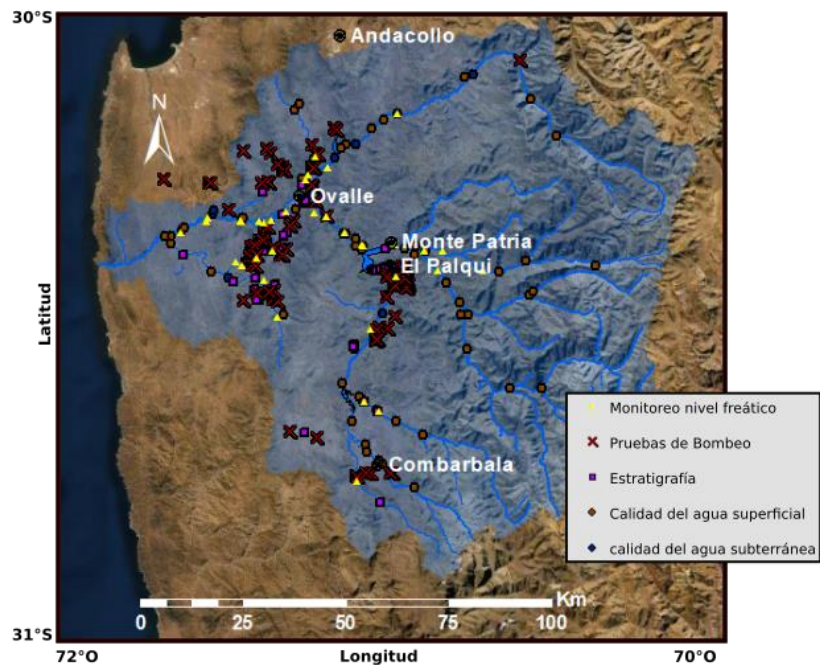


**Figura A1.3** Mapa geomorfológico de la cuenca del río Limarí con vistas en perspectiva del relieve topográfico. Figura adaptada de López et al. (2019).

<sup>2</sup> Aster Global Digital Elevation Map <https://earthexplorer.usgs.gov/>



**Figura A1.4** Mapa derecho de aprovechamiento de aguas subterráneas (los derechos son representados con puntos de tamaño proporcional al caudal concedido) y situación de los Comités de Agua Potable Rural (con problema o normal). Fuentes: Dirección General de Aguas<sup>3</sup>, Dirección de Obras Hidráulicas<sup>4</sup>, Esri<sup>1</sup>.

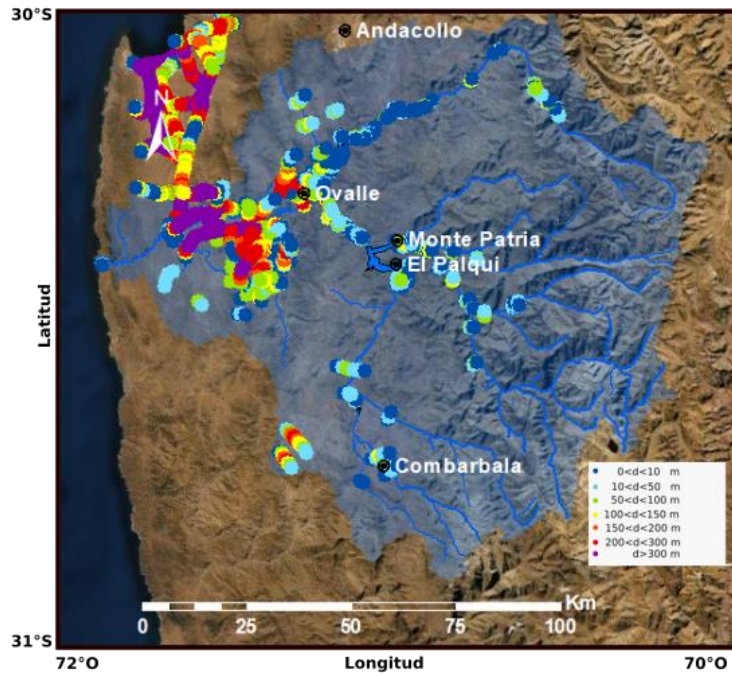


**Figura A1.5** Estaciones hidrológicas en la provincia del Limarí. Fuentes: Dirección general de agua<sup>5</sup>; GCF Ingenieros (2015a); Hidrogestión (2021); Esri<sup>1</sup>.

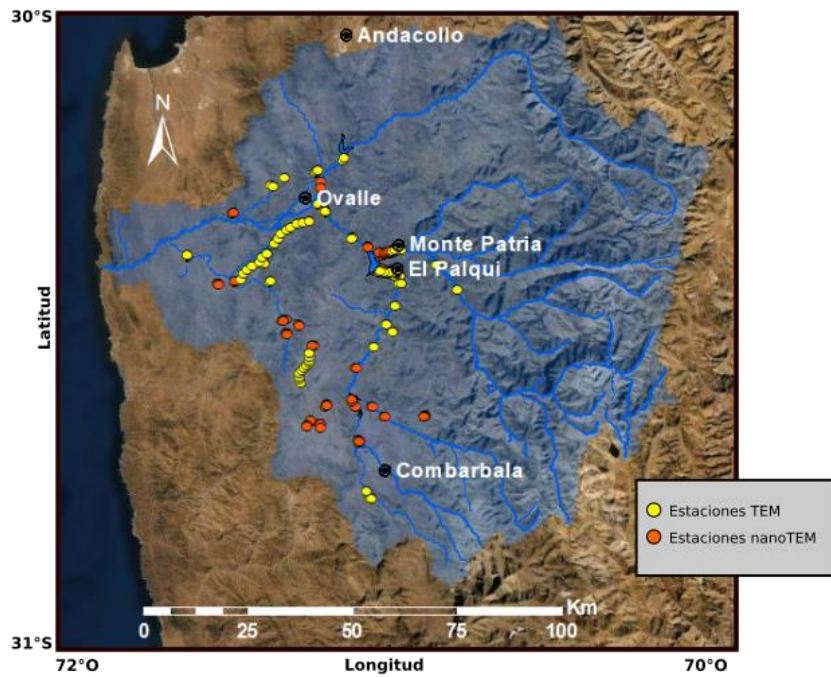
<sup>3</sup> DGA-catastro Derecho de Aprovechamiento de Aguas subterráneas 2020

<sup>4</sup> DOH-catastro Aguas Potables Rurales 2020

<sup>5</sup> DGA catastro 2008

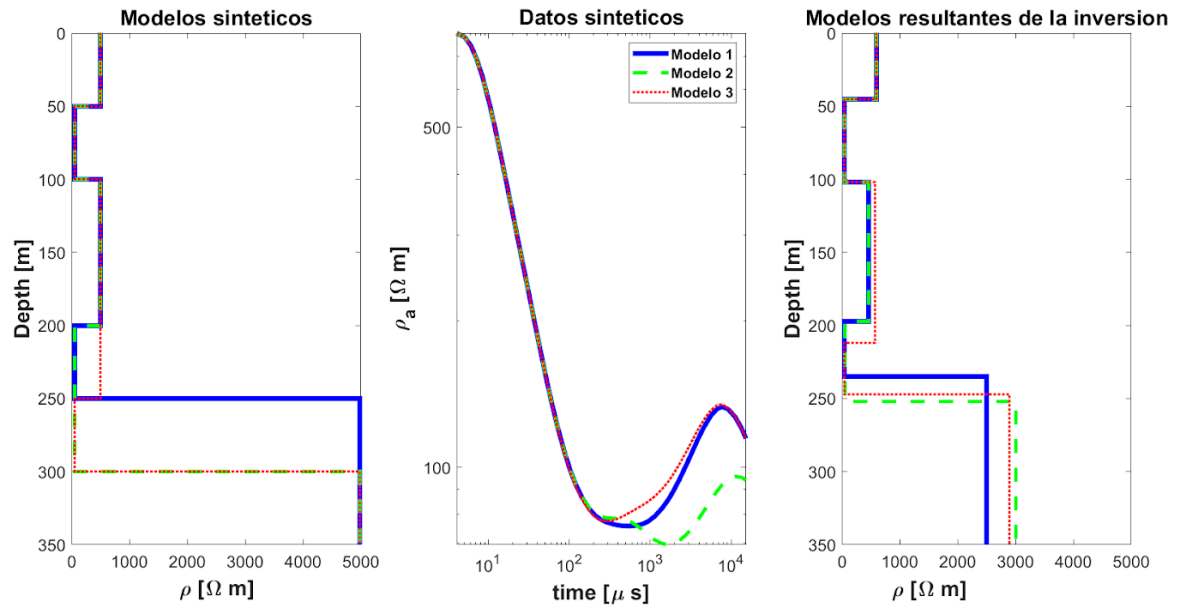


**Figura A1.6** Gravimetría-profundidad roca basal. Fuentes: GEODATOS (2014b); SEGMI (2016, 2018); Olivo Olimpos S.A. (2012); Esri<sup>1</sup>.

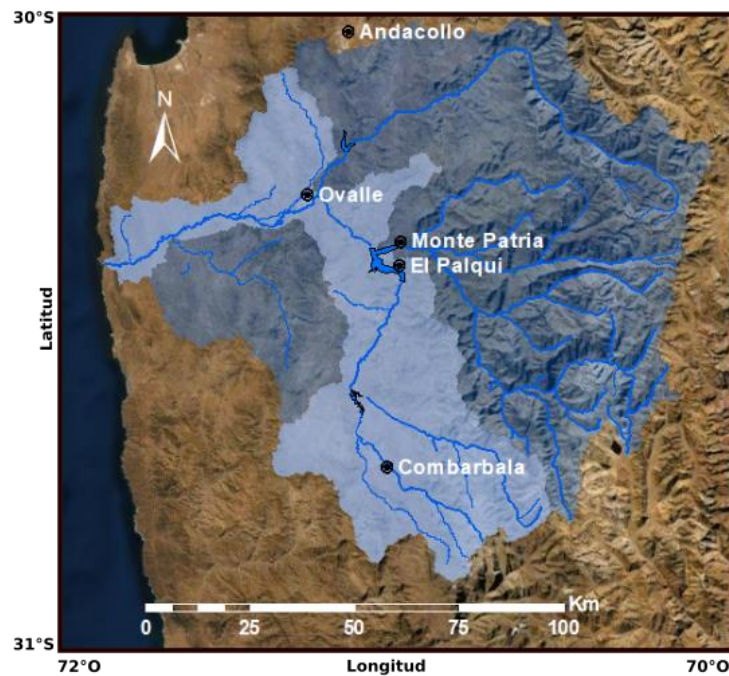


**Figura A1.7** Mediciones de terreno realizadas previamente con equipos TEM y nanoTEM. Fuentes: GEODATOS (2012a, b; 2013a, b, c; 2014a, b); GCF Ingenieros (2015b); R. A. Yáñez Vidal (2017); Esri<sup>1</sup>.





**Figura A1.8** Respuesta del TEMfast a distintos acuíferos profundos.



**Figura A1.9** Área de enfoque (celeste) por el 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” acordada con los asociados del proyecto y los beneficiarios. Fuente: Esri<sup>4</sup>.