

CÁLCULO DE RESERVAS HÍDRICAS SUBTERRÁNEAS EN EL CORDÓN DE DUNAS SEPTENTRIONAL DEL PARTIDO DE VILLARINO A PARTIR DE TOMOGRAFÍAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Matías Rey* ^(1,2), **Andrés G. Ruffo** ^(1,2), **Juan Manuel Giorgi** ^(2,3), **E. René Albouy**^(2,3), **Lucía Carrica** ^(2,3) y **Nerea Bastianelli** ^(2,3)

1- CONICET, CCT Bahía Blanca, Argentina.

2- Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur, San Juan 670, Bahía Blanca, Argentina.

3- CGAMA-CIC. San Juan 670, Bahía Blanca, Argentina.

matiasrey@gmail.com

RESUMEN

En el sector septentrional del partido de Villarino, sudoeste de la provincia de Buenos Aires, se emplaza una cadena de dunas continentales. Este cordón de arenas aloja un acuífero freático, portador de aguas de buena calidad fisicoquímica, resultando la única fuente de abastecimiento para las poblaciones del área. El presente trabajo tiene como objetivo estimar el volumen de las reservas hídricas subterráneas de este acuífero, mediante el uso de tomografías de resistividad eléctrica (TRE), definiendo el espesor saturado de interés. Utilizando esta metodología, se llevaron a cabo siete tomografías en diferentes porciones de la cadena de médanos. La interpretación de las imágenes resultantes permitió identificar los intervalos de resistividades correlacionables con las características hidrogeológicas del cordón medanoso y el espesor saturado con agua dulce en cada zona, para posteriormente realizar los cálculos del volumen de reservas hídricas subterráneas en cada sector. Como resultado, se observaron espesores de interés mayores a los obtenidos en mediciones antecedentes, calculándose de esta manera un volumen de reservas de 344 Hm³. Este se considera la estimación más apropiada de acuerdo a los datos disponibles. La metodología aplicada es de gran utilidad para el conocimiento hidrogeológico del subsuelo y proporciona datos de interés para un cálculo más preciso de las reservas hídricas subterráneas, el cual es un dato de gran importancia para el manejo y la explotación racional y sustentable del agua subterránea.

Palabras claves: hidrología, agua subterránea, geoeléctrica, médanos, almacenamiento

ABSTRACT

In the northern sector of the Villarino district, in the southwest of the province of Buenos Aires, there is a chain of continental dunes. This chain of sands contains a phreatic

aquifer, which carries water of good physicochemical quality and is the only source of water supply for the populations of the area. The present work aims to estimate the volume of groundwater storage in this aquifer, using electrical resistivity tomography (TRE), defining the saturated thickness of interest. Using this methodology, seven tomographies were carried out in different portions of the chain of sand dunes. The interpretation of the resulting images made it possible to identify the resistivity intervals correlated with the hydrogeological characteristics of the dune chain and the thickness saturated with fresh water in each area, in order to subsequently calculate the volume of groundwater storage in each sector. As a result, thicknesses of interest greater than those obtained in previous measurements were observed, thus calculating a volume of groundwater storage of 344 Hm³. This is considered the most appropriate estimate according to the available data. The methodology applied is of great use for the hydrogeological knowledge of the subsoil and provides data of interest for a more accurate calculation of groundwater storage, which is of great importance for the management and rational and sustainable exploitation of groundwater.

Keywords: hydrology, groundwater, geoelectric, sand dunes, storage

INTRODUCCIÓN

El agua es un bien indispensable, y de gran importancia en el desarrollo económico y social de una región, más aún en zonas de clima semi-árido, donde la oferta del recurso hídrico está íntimamente ligada a las precipitaciones. La cadena de dunas septentrional del partido de Villarino, provincia de Buenos Aires, aloja un acuífero freático con aguas de buena calidad fisicoquímica pero reducido espesor saturado de interés, representando la única fuente de abastecimiento para las poblaciones del sector.

Estas acumulaciones arenosas se encuentran en general cubriendo a los depósitos más finos de las formaciones Río Negro y Chasicó, que alojan aguas de mayor salinidad, con contenidos variables de elementos no deseados, tales como Flúor y Arsénico. Esta variación litológica de los sedimentos, conjuntamente con las diferencias fisicoquímicas del agua subterránea, resultan en una estratificación hidroquímica, con una lente de agua de baja salinidad que descansa sobre una más salobre y extensa. A su vez, este contraste hace de la prospección geoelectrica, mediante tomografías de resistividad eléctrica, una excelente metodología para definir espesores saturados con agua dulce.

Mediante el método geoelectrico se determina la resistividad aparente del subsuelo, por medio de la inyección de corriente eléctrica en un par de electrodos (electrodos de corriente) y la lectura de la diferencia de potencial en otro par (electrodos de potencial). La resistividad se encuentra afectada por la litología atravesada, su granulometría y el fluido contenido en los espacios porales de la misma (Orellana, 1972). Esta resistividad aparente es posteriormente convertida a una resistividad real mediante técnicas de inversión de datos y el uso de software específicos.

La tomografía de resistividad eléctrica (TRE) es una técnica multielectrónica iterativa que permite obtener un modelo 2D de resistividades (tanto en profundidad como lateralmente), resultando de esta manera en una imagen de resistividad eléctrica

(IRE). Esta característica convierte a esta herramienta en un potente método para la detección de variaciones laterales (fallas, paleocauces, etc.), las cuales pueden conformar sectores preferenciales, desde el punto de vista hidrogeológico, para la extracción de agua subterránea. Estas variaciones pueden ser de difícil determinación mediante métodos más tradicionales como los sondeos eléctricos verticales.

A partir de datos antecedentes de porosidad y espesor saturado (García y García, 1964; Bonorino, 1979), el volumen de reservas en el cordón de dunas asciende a 276 Hm³. De esta forma, el objetivo del presente trabajo es identificar, mediante dicha metodología, el espesor saturado de interés y las variaciones laterales existentes en diferentes sectores del área de estudio, para así estimar el volumen de reservas hídricas subterráneas en la cadena de dunas con datos actuales y técnicas modernas.

CARACTERÍSTICAS DEL AREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en el sector septentrional del partido de Villarino, en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires y abarca las localidades de Médanos, La Mascota y Argerich (Figura 1). Se enmarca a nivel regional dentro de la llanura bonaerense y comprende la cadena de médanos continentales de suave pendiente, que se extiende unos 50 km en dirección noroeste-sudeste, desde el estuario de Bahía Blanca, al sudeste, hasta la laguna Chasicó y el arroyo homónimo al noroeste. Al sudoeste limita parcialmente con la depresión de Salinas Chicas (que alcanza una cota mínima de 42 metros bajo el nivel del mar), mientras que hacia el noreste lo hace con el Salitral de la Vidriera.

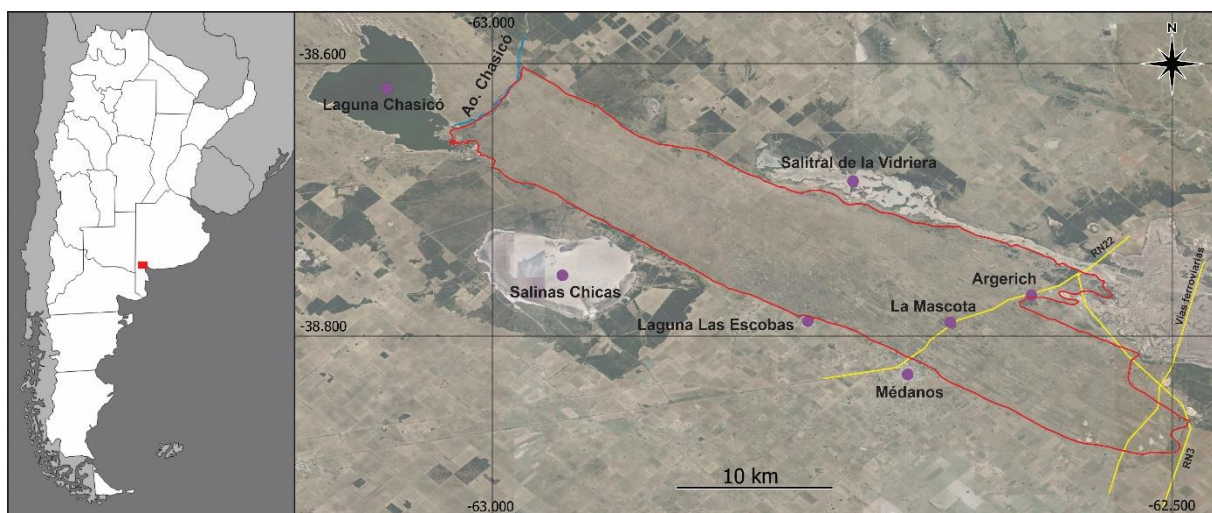


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Según los índices climáticos de Thornthwaite (1948) el clima en la zona es C1 B'2 d a', es decir, subhúmedo (C1), mesotermal templado frío (B'2), con un nulo o pequeño exceso de agua (d) y una eficiencia térmica menor al 48% (a'), limitando con el sector semiárido (D B'1 d a') (Sánchez *et al.*, 1998).

La precipitación media anual es de 546,8 mm (serie 1972-2005) para la localidad de Médanos, con mínimos en julio (20,8 mm) y máximos en marzo (78,2 mm). La temperatura media anual es de 14,2 °C, y extremos medios en enero y julio de 22,5 °C y 7 °C, respectivamente (Bonorino, 1979).

GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

Para los fines del presente trabajo, la geología del sector puede simplificarse, considerándola de la siguiente manera: iniciando la secuencia se encuentran los depósitos continentales limo-arcillosos correspondientes a la Formación Chasicó (Pascual, 1961), sobre la que, en ocasiones, apoyan los materiales fluviales arenosos de la Formación Río Negro (Andreis, 1965). Ambas unidades son de edad Pliocena. Sobre lo anterior y de manera discontinua, se encuentra un nivel de conglomerados, denominados “Rodados Patagónicos”, de edad Pleistocena (Fidalgo, 1999). Cubriendo en discordancia a todo lo anterior se encuentran los sedimentos arenosos que conforman el cordón de dunas de edad Holocena objeto de este estudio, que reciben diferentes denominaciones según el autor. Se trata de arenas de origen eólico y son llamados: “Arenas Médanos” (Spaletti e Isla, 2003), Formación Estancia La Aurora (Fidalgo *et al.*, 1987), Formación La Postrera o Formación Médanos (Bonorino, 1974) y son comparables a las acumulaciones medanosas presentes en la provincia de La Pampa. Estos médanos, que cubren la totalidad del área de estudio, están compuestos, en términos generales, por arenas con un diseño unimodal, finas a medias, en ocasiones muy finas, que tienden a disminuir levemente su granulometría hacia el NO de la cadena. Rossetto (1953) llevó a cabo un estudio detallado de su granulometría y mineralogía y les atribuye, además de un origen eólico, una componente piroclástica.

Morfológicamente, estas acumulaciones de arenas alcanzan los 15 metros de altura y forman barjanas de 150 a 200 metros de longitud. Se encuentran frecuentemente alineadas en dirección noroeste-sudeste, con la pendiente más tendida buzando al noreste, aunque se las observa también transversales a esta dirección predominante. Hacia el sur se desarrollan en forma de manto.

En cuanto a la hidrogeología, el área de estudio se enmarca dentro de la Región Hidrogeológica de la Cuenca de Bahía Blanca (de acuerdo a la clasificación de Auge, 2004). Basándose en investigaciones previas (Bonorino, 1974, 1979) y sondeos eléctricos llevados a cabo en la zona, Lexow y Bonorino (2012) determinaron el esquema hidroestratigráfico del sector (Figura 2).

FORMACIÓN	LITOLOGÍA	PROPIEDADES ACUÍFERAS
Médanos (Holoceno)	Depósitos eólicos integrados por arenas medianas a finas, en forma de mantos o cuerpos medanosos. Yacen sobre los Limos Loessoides, la Formación Río Negro o los Rodados Patagónicos.	Nivel freático a poca profundidad. Agua en espacios porosos. Alta porosidad y buena permeabilidad. Agua de bajo contenido en sales. (3 m de espesor medio)
Rodados Patagónicos (Pleistoceno)	Gravas medianas a finas con matriz arenosa, de origen fluvial, desarrolladas preferentemente al Sur del río Colorado, fuertemente cementadas por carbonato de calcio en los términos superiores. Apoyan sobre la Formación Río Negro y en algunos sectores sobre los Limos Loessoides.	El nivel superior actúa como una capa de permeabilidad por fisuración a través del cual se infiltra el agua de lluvia. No forma acuíferos. (entre 2-4 m de espesor)
Formación Río Negro o Rionegrense (Plioceno)	Arenisca de grano mediano a fino, color gris, con típica estratificación entrecruzada.	Buena porosidad y permeabilidad. Acuíferos de rendimiento variable. Aguas de mediana a alta mineralización. (espesores saturados entre 4-9 m)
Limos Loessoides También denominados Formación Chasicó (Plioceno inferior)	Limos arcillosos de color castaño rojizo, macizos, con intercalaciones de arenas y arcillas y niveles calcáreos y yesíferos.	Baja porosidad y permeabilidad. Es portadora de niveles acuíferos de carácter confinado aproximadamente entre los 50 y 200 m de profundidad. (entre 150 y 200 m de espesor)

Figura 2. Esquema hidroestratigráfico para el área de estudio de Lexow y Bonorino (2012).

Los datos geofísicos antecedentes se limitan a las cercanías de las localidades de La Mascota y al antiguo campo de pozos de Médanos, hoy en día fuera de uso (Figura 3).

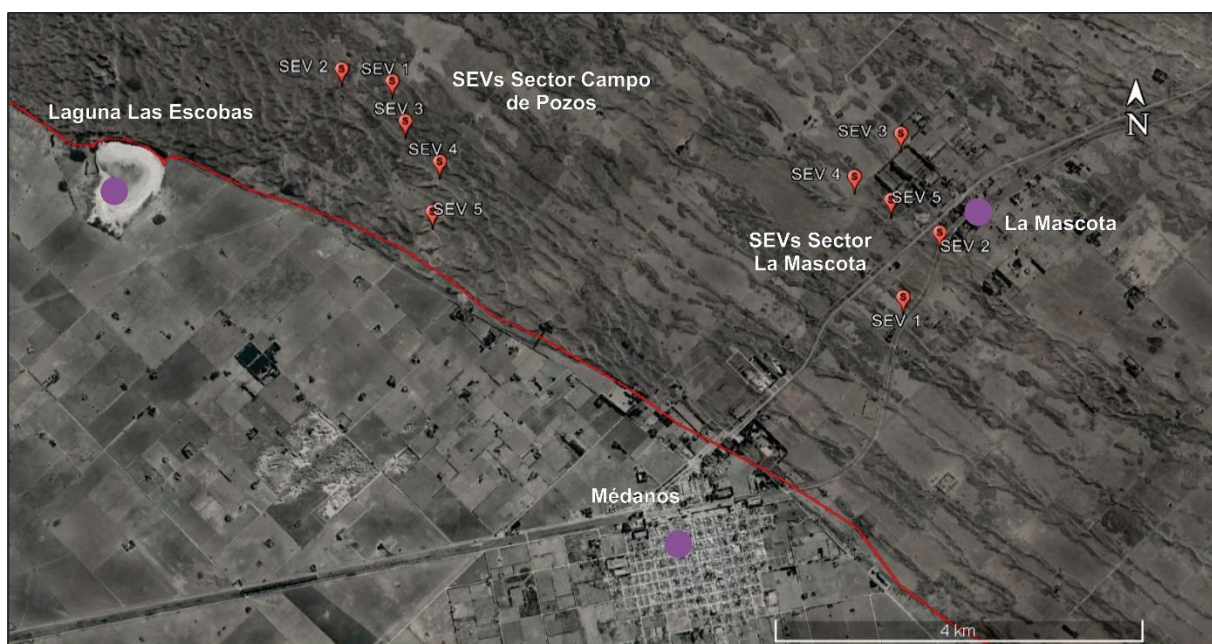


Figura 3. Ubicación de 10 SEVs llevados a cabo por Lexow y Bonorino (2012) en 2 sectores del área de estudio.

El acuífero libre objeto de este trabajo se encuentra alojado en el cordón de dunas, con aguas con una conductividad eléctrica que oscila generalmente entre 400 a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sus características litológicas le confieren una alta capacidad de infiltración, lo cual impide el desarrollo de una red de drenaje definida. Esto permite incorporar rápidamente el agua de las precipitaciones a la zona saturada como recarga del sistema. La recarga calculada para el sector es entre un 33 y un 35% de la precipitación media anual (Carrica et al., 2012). La dirección de flujo del agua subterránea (determinada a partir de mediciones propias del nivel piezométrico en numerosos puntos de agua en el área de estudio y alrededores) sigue, a grandes rasgos, la inclinación del terreno. Localmente se presentan flujos radiales superpuestos, que descargan en las áreas topográficamente deprimidas o de interduna (Albouy, 2005). Estos bajos topográficos pueden dar lugar al afloramiento de la capa freática, conformando sectores de humedales permanentes o estacionales (llamados también "ojos de agua").

Este acuífero libre se encuentra superpuesto y conectado hidráulicamente al alojado en la Formación Río Negro y Chasicó, el cual posee en general aguas con mayor tenor salino (con conductividades generalmente por encima de los 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y presenta frecuentemente importantes cantidades de oligoelementos indeseados como el As y el F. Por debajo de los 50 m de profundidad pueden encontrarse niveles acuíferos semiconfinados-confinados, con aguas salinizadas naturalmente.

Estudios geofísicos antecedentes (Lexow y Bonorino, 2012) detectaron un incremento apreciable de la salinidad en el agua subterránea entre los 14 y 29 m de profundidad. Esto marcaría el límite inferior de una lente de agua de baja salinidad, que descansa sobre una más salobre y de mayor extensión, dando lugar a una zona de transición debido a la miscibilidad de los fluidos. El mayor espesor de agua dulce se encontraría en el centro de la cadena medanosa, disminuyendo lateralmente. El proceso de recarga contribuye al desarrollo de la lente de agua dulce, que desplaza hacia abajo al agua salada circundante (Falkland y Custodio, 1991). A su vez, la gran variabilidad del espesor saturado determinado en estos estudios (de 5 a 15 m), en un área relativamente pequeña, sumado a los antecedentes geológicos/geomorfológicos, da indicios de una interacción entre distintos ambientes deposicionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología de trabajo consistió en la búsqueda de información antecedente del área, campañas geofísicas para la realización de siete TRE (que conforman la base de este estudio) y trabajos de gabinete tendientes a la interpretación de los datos y a la generación de mapas temáticos.

Para la ejecución de las tomografías de resistividad eléctrica se utilizó un resistivímetro automático modelo ARES (GF Instruments) que posee 48 electrodos, con un espaciamiento máximo de 5 m entre ellos. El mismo es energizado mediante una fuente externa (batería). Esta unidad es la encargada de verificar el estado de las conexiones y ejecutar, a partir de los requerimientos preestablecidos, la secuencia de medidas y almacenar los resultados de campo.

El arreglo electródico utilizado fue de tipo Wenner Alfa, con una distancia entre electrodos de 3 o 5 m, dependiendo del caso, obteniéndose de esta manera

progresivas (línea recta entre el primer y último electrodo) de 141 y 235 m de longitud, respectivamente. De esta manera, se logró una profundidad de exploración de entre 25 y 45 m. La nivelación de las progresivas fue realizada mediante GPS. Únicamente en el caso de la TRE Las Escobas 2, fue necesario tener en cuenta la topografía en la inversión de los datos, por lo que la misma fue ingresada al programa, en el resto de los casos las TRE fueron efectuadas en caminos y terrenos llanos dentro de la cadena de médanos.

La inversión de los datos fue realizada en laboratorio, mediante el software Res2DInv de Geotomo (Loke, 2004) el cual permite obtener, a partir de los datos de campo (resistividades aparentes), una imagen de resistividad eléctrica (IRE). Este software utiliza el método de inversión de mínimos cuadrados de Gauss-Newton (Sasaki, 1992) sometido a una restricción de suavizado. El programa define automáticamente los parámetros óptimos de inversión para un set de datos dado.

El modelo fue mejorado por el software mediante la aplicación del método de Curva-L (Farquharson y Oldenburg, 2004), el cual, a partir del desajuste de los datos y la rugosidad del modelo, estima el parámetro lambda óptimo a ser utilizado.

Adicionalmente, debido a las variaciones de resistividad medidas en superficie, el software propuso la utilización, en ciertos casos, de la opción "Model Refinement", con la cual se considera un ancho de celda de la mitad del espaciamiento entre electrodos. De esta manera, se obtuvieron imágenes de resistividad más "limpia" que la resultante sin aplicar esta función.

Para poder darle un sentido geológico e hidrogeológico a las imágenes obtenidas, dos de las TRE se llevaron a cabo en un sector de los médanos donde la columna estratigráfica es conocida. La parametrización del método se basó en los recortes de perforación, mediciones del nivel freático y conductividad eléctrica del agua subterránea de una perforación ubicada a escasos metros del inicio de estas dos tomografías.

Atendiendo a lo anterior, se realizaron otras cinco TRE distribuidas a lo largo de la cadena de dunas del área de estudio (Figura 4), tendientes a definir el espesor saturado con agua dulce y realizar los cálculos para la obtención del volumen de la reserva hídrica subterránea (RHS) en el cordón de dunas. El posicionamiento y distribución de los TRE fue determinado principalmente en base a la accesibilidad a los diferentes sectores, ya que la mayor parte del área de estudio corresponde a campos privados a los que no se permitió el acceso.

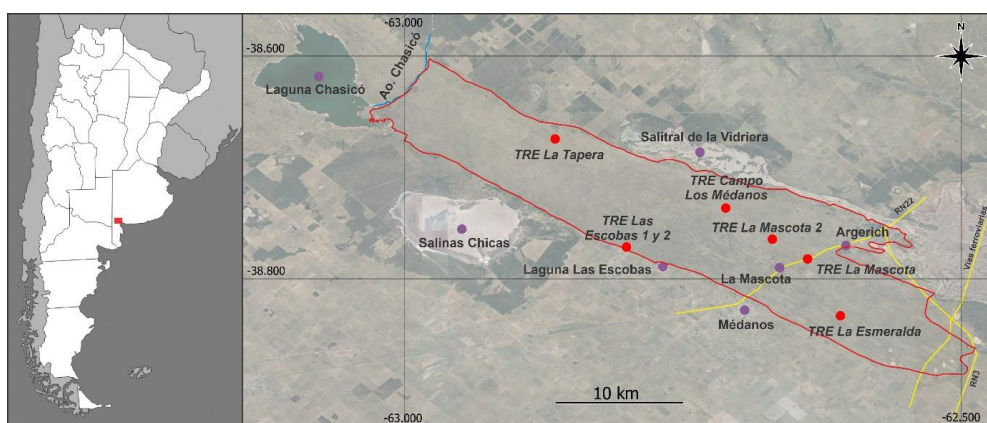


Figura 4. Ubicación de las TRE realizadas (puntos rojos).

La RHS representa el volumen de agua en un acuífero en un instante determinado y suele expresarse en Hm^3 . Para el caso de un acuífero libre como el aquí tratado, su valor queda determinado por el volumen saturado multiplicado por la porosidad eficaz (o coeficiente de almacenamiento), por lo que es necesario haber establecido con precisión tanto la geometría como las características hidráulicas del sistema.

RESULTADOS

Para una mejor organización, se optó por dividir la descripción resultante de las TRE en tres áreas: borde sudoeste de la cadena de dunas, su parte central y el borde noreste de la misma. A continuación, se detallan los resultados obtenidos en cada zona. El error obtenido en la inversión de cada tomografía en particular se detalla en la imagen de cada una de ellas.

Borde sudoeste de la cadena de dunas

Las primeras dos TRE (Figura 5) fueron realizadas perpendicularmente entre sí, sobre el borde sudoeste de la cadena, en cercanías a la laguna Las Escobas. Estas fueron utilizadas para la parametrización del método respecto a la litología e hidrogeología del área de trabajo, debido a que se contó con información de recortes de perforación y medidas del nivel freático obtenidas de una perforación ubicada unos 20 m antes del inicio de las progresivas, donde la profundidad al nivel freático medida fue de 7 m. En estas dos imágenes se logró reconocer una zona no saturada (ZNS) con resistividades mayores a $100 \Omega\cdot\text{m}$, mientras que los valores menores a $25 \Omega\cdot\text{m}$ corresponderían a los depósitos finos de la Fm. Chasicó, con aguas salinizadas. De esta manera, los valores entre 25 y $100 \Omega\cdot\text{m}$ corresponden a arenas con aguas de bajo tenor salino (entre 500 y $600 \mu\text{S}/\text{cm}$, de acuerdo a mediciones de pozos situados en el sector que alumbran dicha capa acuífera). En esta porción del área, de acuerdo a todo lo anteriormente expuesto, el espesor saturado de interés se encuentra entre 3 y 6 m.

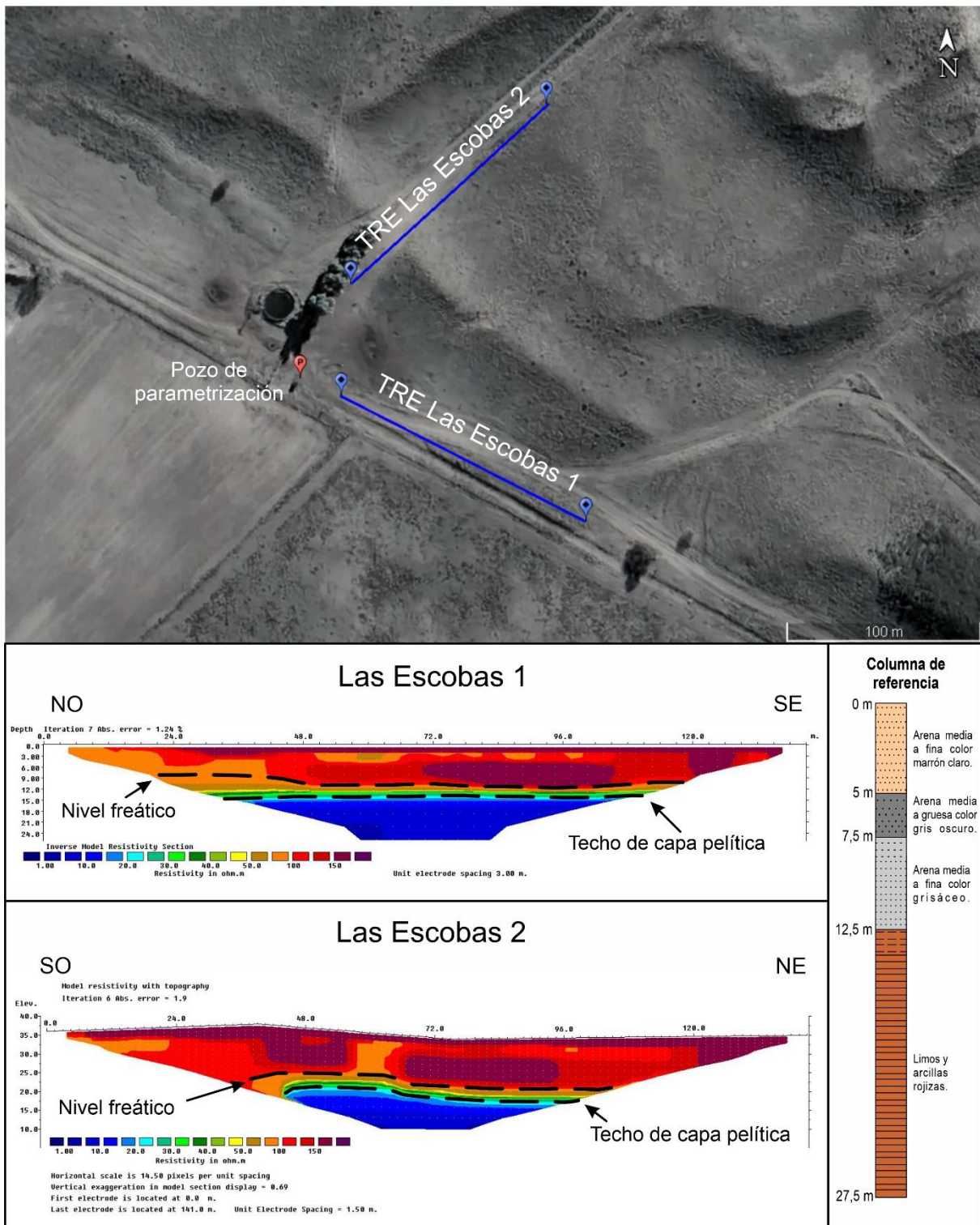


Figura 5. Imágenes de resistividad eléctrica correspondientes al borde sudoeste de la cadena de dunas y detalle ubicación de las mismas con el pozo de parametrización utilizado (a la derecha se presenta la columna litológica del mismo).

La tercer TRE se llevó a cabo en el campo La Esmeralda (Figura 6). Los valores de resistividad asimilables al nivel freático se ubican en torno a los 8 a 10 m de profundidad bajo nivel del terreno, lo cual es congruente con mediciones realizadas

con sonda piezométrica en molinos cercanos. Entre los 13 y los 15 m de profundidad se ubican los valores de resistividad correlacionables al techo de los depósitos

pelíticos de la Fm. Chasicó. De tal manera, se aprecia un espesor saturado con agua dulce de aproximadamente 3 m, prácticamente constante a lo largo de toda la progresiva.

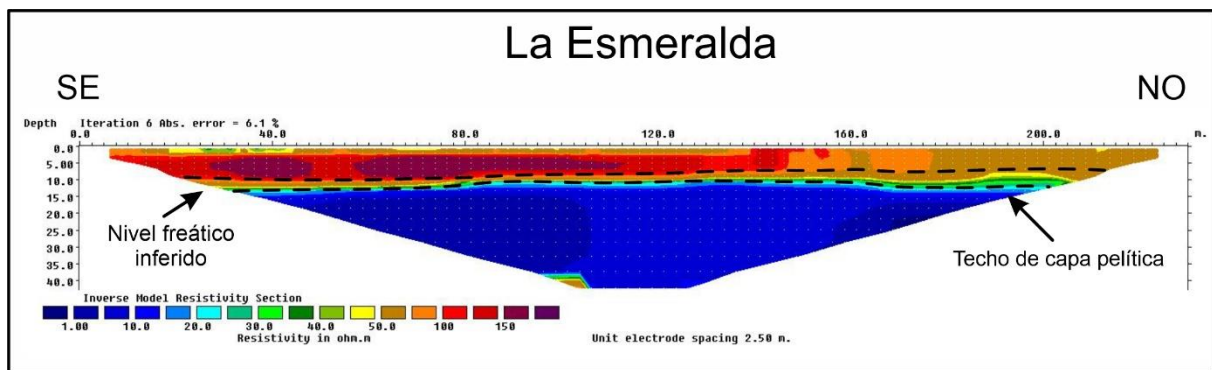


Figura 6. Imagen de resistividad eléctrica realizada en el campo La Esmeralda, ubicada al extremo sudeste del área de estudio.

Sector central de la cadena de dunas

En esta porción del área de estudio se realizaron dos TRE (Figura 7), en cercanías a la localidad de La Mascota. En la primera de ellas, se observa un espesor saturado de interés en torno a los 5 m. Sin embargo, existen sectores de la progresiva (entre los 55 y los 85 m, y entre los 148 y los 194 m) en los que el mismo parecería mostrar un importante incremento, llegando incluso a superar los 30 m. Este aumento de espesor podría asociarse a estructuras similares a paleocauces, colmatados por las arenas del cordón de dunas, dando lugar a zonas preferenciales desde el punto de vista hidrogeológico. El agua extraída de perforaciones ubicadas a escasos metros de la TRE, presenta conductividades eléctricas en torno a los 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que se infiere que estas estructuras portarían agua de calidad similar.

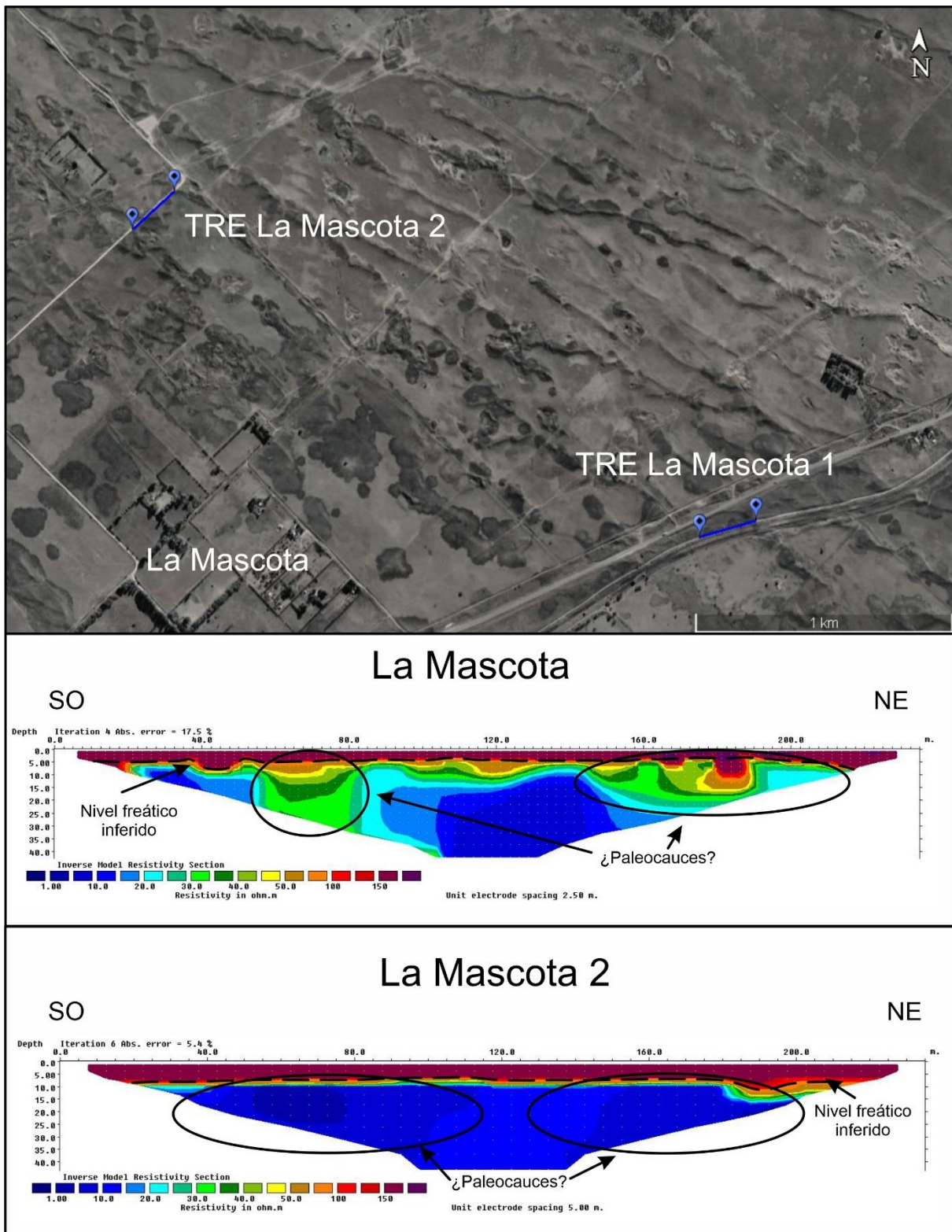


Figura 7. Imágenes de resistividad eléctrica realizadas en cercanías de la localidad de La Mascota y detalle de ubicación de las mismas, correspondientes al sector central de la cadena de dunas.

En la segunda TRE (La Mascota 2), se puede inferir el nivel freático, de acuerdo a la distribución de las resistividades, a los 7 m de profundidad bajo el nivel del terreno, mientras que los valores asignables al techo de la capa pelítica se encuentran

alrededor de los 10 m de profundidad. En este caso, el espesor saturado de interés varía entre los 3 y 4 m.

Entre los 45 y 112 m y los 145 y 193 m de la progresiva se reconocen dos estructuras similares a las observadas en la IRE anterior. Si bien en este caso, presentan resistividades menores a 15 Ω .m, la cercanía de esta TRE respecto a La Mascota 1, permite suponer la presencia de paleocauces en el sector. Sin embargo, los valores de resistividad observados se encuentran fuera del rango de interés.

Borde noreste de la cadena de dunas

En esta última porción de la cadena se llevaron a cabo dos TRE (Figura 8). En la primera imagen (Campo Los Médanos), ubicada a unos 7,5 km de la localidad de La Mascota, se puede observar una distribución de electrocapas subhorizontales en toda la progresiva. Los valores de resistividad asignables al nivel freático ubican al mismo en torno a los 3 m de profundidad bajo el nivel del terreno, mientras que aquellos correlacionables al techo de la capa pelítica que marcaría el límite de la Fm. Chasicó, se encuentran entre los 8 y 10 m de profundidad. A partir de datos obtenidos de perforaciones cercanas, se constató la presencia de dicha capa a la profundidad observada en la IRE. De esta manera, el espesor saturado de interés ronda los 5 m a 6 m, manteniéndose relativamente constante a lo largo del perfil.

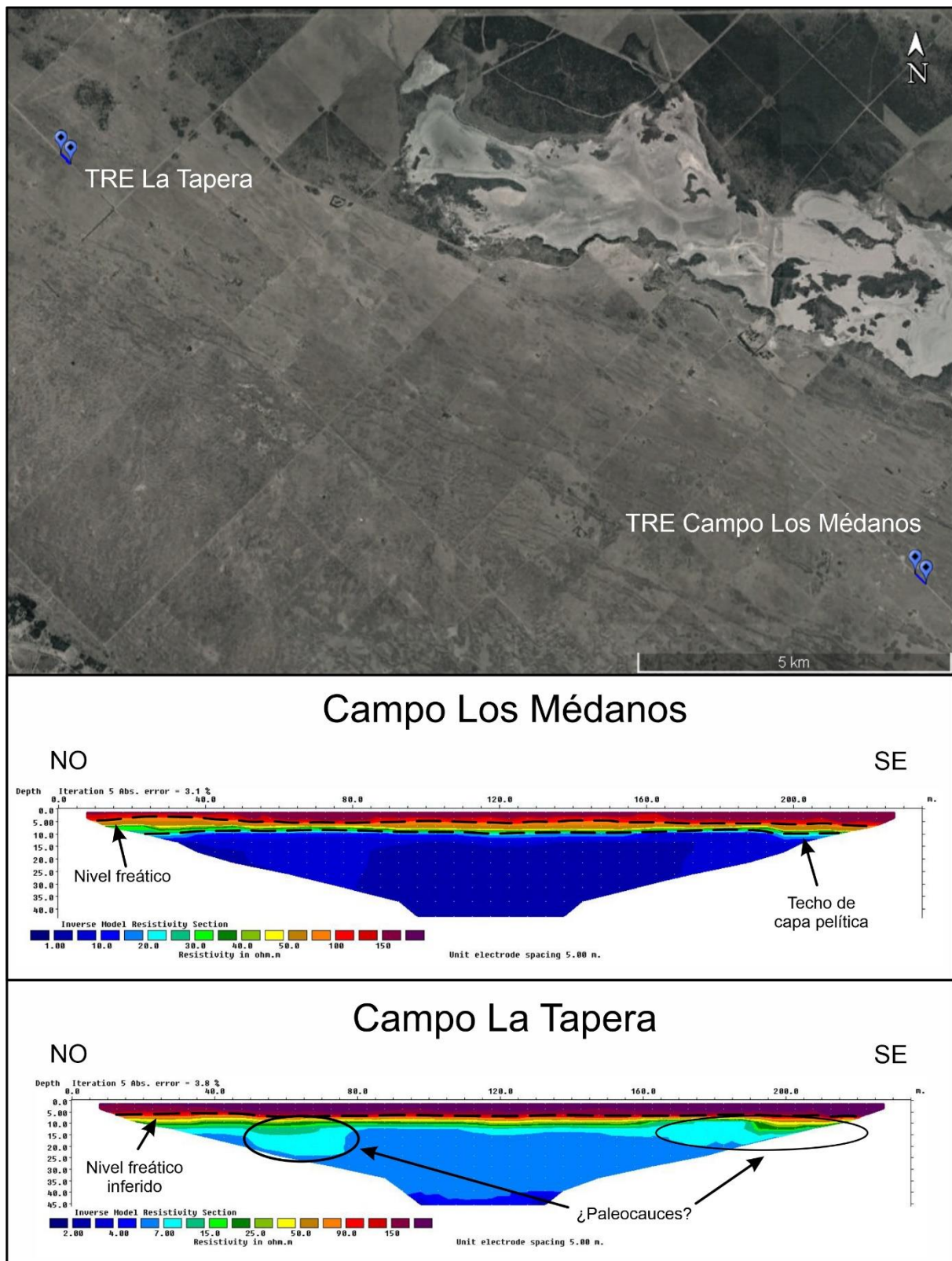


Figura 8. Imágenes de resistividad eléctrica correspondientes al borde noreste de la cadena de dunas y detalle de ubicación de las mismas. En la IRE La Tapera se utilizó una escala diferente para las resistividades para resaltar las estructuras inferidas.

Por último, la segunda TRE del sector (Campo La Tapera), realizada a unos 22 km de la localidad de La Mascota, presenta una distribución similar a la anterior. Los valores de resistividad asimilables a la capa freática ubicarían a la misma el torno a los 6 metros bajo nivel del terreno, coincidente con mediciones efectuadas en pozos cercanos. Aproximadamente a los 10 m de profundidad, se reconocen valores de resistividad asimilables al techo de la capa pelítica (Fm. Chasicó), por lo que el espesor saturado de interés rondaría los 4 m. Es destacable la presencia de dos estructuras similares a paleocauces: la primera de ellas observable entre los 50 y los 77 m de la progresiva, y la segunda, menos marcada, a partir de los 167 m, aunque la resistividad que se presenta en el interior de estas (entre los 7 y los 25 Ω .m) es menor a la determinada con anterioridad como correspondiente a capas de interés.

Cálculo de reservas hídricas subterráneas

Para el cálculo de las RHS se aplicaron dos metodologías distintas. La primera de ellas considera un espesor uniforme para la totalidad del área analizada, mientras que la segunda subdivide el área total en sectores según la densidad de datos geofísicos.

Para el primer caso, sobre la totalidad de la superficie del área de estudio (460 km²) tomando un espesor saturado promedio de 3 m y una porosidad eficaz para la arena de 0,2, es decir, 20% (García y García, 1964; Bonorino, 1979), se obtiene:

$$RHS = A * B * S \quad (1)$$

Donde RHS son las reservas hídricas subterráneas, A el área, B el espesor saturado promedio y S la porosidad eficaz.

De esta manera se obtiene:

$$RHS = 460 \text{ km}^2 * 0,003 \text{ km} * 0,20 = 0,276 \text{ km}^3 = 276 \text{ Hm}^3 \quad (2)$$

Lo cual arroja un volumen de reservas de 276 Hm³.

Realizando el mismo cálculo sobre esta área, pero considerando un espesor saturado promedio de 4 m, determinado mediante los datos de las TRE, se obtiene un volumen de reservas de 368 Hm³.

Para determinar con un mayor grado de precisión las RHS del área de estudio, se dividió la misma en tres sectores y se ponderó el espesor saturado promedio de cada una de ellas por su superficie (Figura 9). La definición de dichos sectores, fue llevada a cabo teniendo en cuenta, tanto los datos geofísicos disponibles, como el conocimiento de la morfología freática a partir de un censo de puntos de agua y el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero del cordón de dunas.

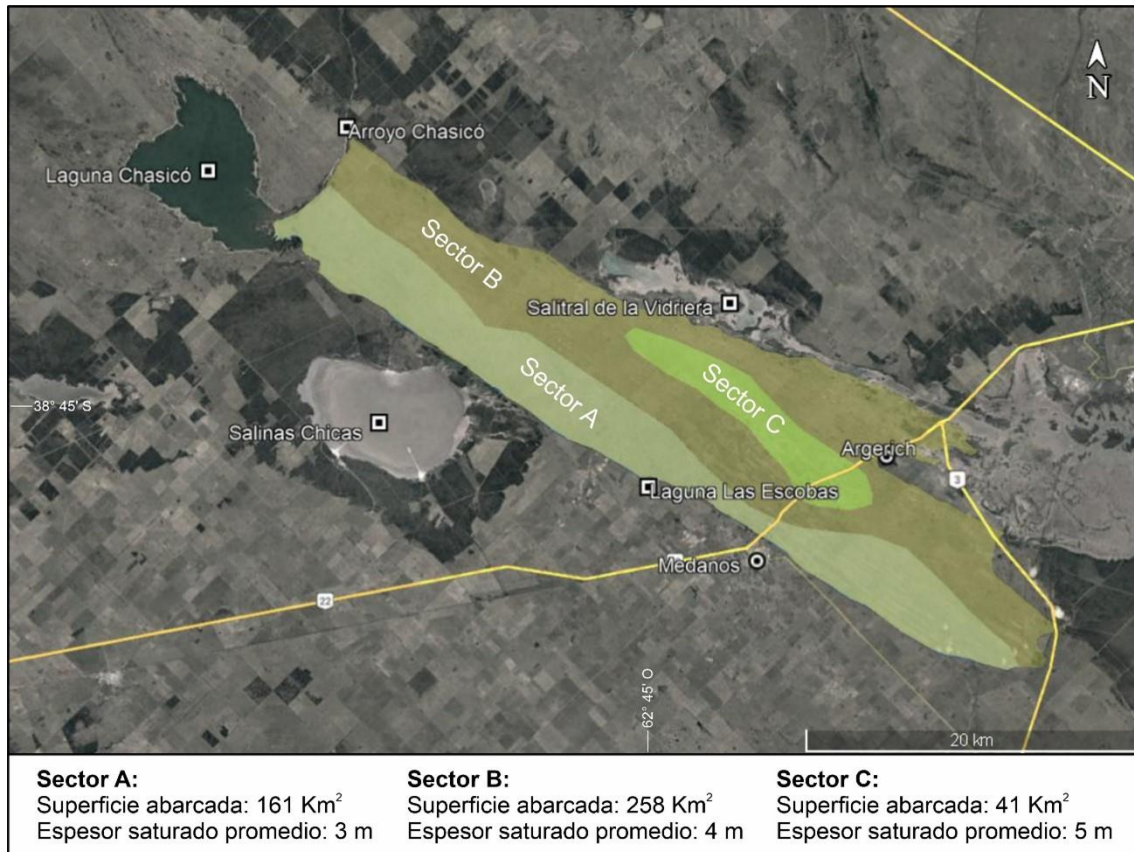


Figura 9. Subdivisión del área de estudio en sectores para el cálculo de reservas hídricas subterráneas.

De esta manera, las reservas hídricas subterráneas se calculan como:

$$RHS \text{ Sector A: } 161 \text{ km}^2 * 0,003 \text{ km} * 0,20 = 0,0966 \text{ km}^3 = 96,6 \text{ Hm}^3 \quad (3)$$

$$RHS \text{ Sector B: } 258 \text{ km}^2 * 0,004 \text{ km} * 0,20 = 0,2064 \text{ km}^3 = 206,4 \text{ Hm}^3 \quad (4)$$

$$RHS \text{ Sector C: } 41 \text{ km}^2 * 0,005 \text{ km} * 0,20 = 0,041 \text{ km}^3 = 41 \text{ Hm}^3 \quad (5)$$

$$RHS \text{ totales} = 344 \text{ Hm}^3 \quad (6)$$

Con esta metodología de cálculo se obtiene un volumen de RHS totales de 344 Hm³, lo cual representa un 24% más que la primera estimación de reservas, en la que se usó el espesor saturado según datos antecedentes, y un 6,5% menos que en el segundo, en el cual se tomó un espesor saturado promedio según datos propios. De esta manera el RHS se ubican entre 276 y 368 Hm³, considerando el valor de 344 Hm³ como la estimación más apropiada de acuerdo a los datos disponibles.

DISCUSIÓN

Si bien la metodología utilizada brinda una gran cantidad de datos e información útil sobre el subsuelo, al ser una herramienta de exploración indirecta, los resultados obtenidos deben ser contrastados con datos validados. Una manera de realizar esto, es la elaboración de modelos sintéticos que permitan simular diferentes escenarios en los cuales se propongan variaciones de las capas analizadas. Otra metodología de validación, consiste en contrastar con datos directos de campo (datos de perforaciones, medición de niveles freáticos y análisis sobre el contenido salino del agua subterránea). En este caso, dada la cantidad de información directa disponible, el modelo generado por la inversión de los datos es concordante con la información derivada de metodologías directas.

La efectividad de las tomografías de resistividad eléctrica, así como la de cualquier otro método geoelectrónico, reside en la existencia de contrastes resistivos que permitan discernir o diferenciar capas de interés. A partir de la inversión de los datos realizada por el software, resulta de gran importancia tener en cuenta los rasgos topográficos del terreno, sobre todo cuando el objetivo de la exploración son niveles de escasa potencia. En este caso, con la disposición electrodica utilizada, las electrocapas resultantes permitieron la identificación de niveles saturados con agua dulce de espesores mayores a 3 metros, lo cual resulta coincidente con observaciones de autores anteriores.

La información geofísica disponible para el cálculo de las reservas es más bien escasa, contando únicamente con 10 SEVs realizados con anterioridad, concentrados únicamente en dos sectores, y las 7 TRE realizadas para este trabajo. Aun así, se considera que el cálculo de reservas llevado a cabo es de mayor exactitud al disponible en la bibliografía y constituye un avance en este sentido. Esta contribución pretende aumentar el conocimiento del área y se considera necesaria la realización de nuevos estudios que puedan aumentar el grado de exactitud de esta estimación, conforme se cuente con una mayor densidad de datos.

Si bien el volumen de reservas calculado es frágil, el área se encuentra escasamente poblada (apenas unos 5400 habitantes, con 5245 concentrados en la localidad de Médanos), por lo que su explotación es posible. Estimaciones de la prestataria de agua local calculan la demanda para los próximos años en unos 0,7 Hm³/año, es decir, el 0,2% de la reserva hídrica subterránea de la totalidad de la zona de estudio. Debe considerarse que el uso de las reservas debe llevarse a cabo ante una situación excepcional en los casos donde la demanda supere el recurso hídrico potencial.

Cabe destacar que, debido al escaso espesor de la capa acuífera de interés, la utilización de perforaciones convencionales no resulta conveniente, debido al pronunciado abatimiento del nivel freático que generarían. De esta manera, para una explotación sostenida en el tiempo, se sugiere tener en cuenta otros métodos constructivos, como lo son las galerías filtrantes o los pozos con drenes horizontales (tipo Ranney), entre otros, los cuales producen un menor descenso en los niveles.

CONCLUSIONES

Debido al contraste resistivo entre los materiales que componen la columna estratigráfica del área de estudio y las variaciones de salinidad en profundidad, la prospección geoelectrica mediante TRE resulta una herramienta efectiva para la exploración del agua subterránea y la determinación de espesores saturados de interés. La parametrización del método permite definir intervalos de resistividades correlacionables con las características hidrogeológicas de la cadena de médanos.

Los valores superiores a 120 Ω .m se consideran zona no saturada. Dentro de la zona saturada, los niveles arenosos con agua dulce (entre 400 y 1000 μ S/cm) presentan resistividades entre 25 y 120 Ω .m, mientras que los sedimentos finos correlacionables a la Fm. Chasicó, portadores de aguas salinizadas (en general con conductividades mayores a 3000 μ S/cm), se observan con valores de resistividad menores a 25 Ω .m.

A partir de los datos obtenidos de las TRE, el espesor saturado con agua dulce es de aproximadamente 4 m en promedio. Se destaca la presencia de sectores con espesores mayores a 30 m y una distribución lateral limitada, inferidos como paleo cauces.

Las reservas, teniendo en cuenta un espesor promedio de 3 m, según datos antecedentes, es de 276 Hm³, mientras que calculado con un espesor promedio de 4 m, el volumen asciende a 368 Hm³.

Subdividiendo el área de estudio de acuerdo a los datos geofísicos resultantes de las TRE, el valor calculado de reservas hídricas es de 344 Hm³. Este último se considera como la estimación más ajustada de acuerdo a los datos disponibles. Si bien la cantidad de tomografías puede resultar a priori baja teniendo en cuenta el área considerada, la accesibilidad a los sitios más alejados de los núcleos urbanos no permitió una mayor densidad de datos.

La exploración hidrogeológica mediante tomografías de resistividad eléctrica, si bien resulta más costosa y de mayor complejidad que la realización de sondeos eléctricos verticales, permitió la detección de estructuras asimilables a paleocauces. Estas fueron identificadas únicamente en el sector de La Mascota. El reconocimiento de estas estructuras sería mucho más complejo en caso de realizarse la exploración mediante SEVs.

Se concluye que la metodología aplicada es de gran utilidad para el conocimiento hidrogeológico del subsuelo y proporciona datos de interés para un cálculo más preciso de las reservas hídricas subterráneas. Este conocimiento favorece la gestión racional y sustentable del recurso hídrico subterráneo.

BIBLIOGRAFÍA

ALBOUY, R. (2005). Estudio hidrogeológico expeditivo en proximidades de la localidad de Argerich, provincia de Buenos Aires. Informe FUNSA, 7 pp. Inédito.

AUGE, M. (2004). Regiones hidrogeológicas. República Argentina y provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fe. 104 pp.

ANDREIS, R. (1965). Petrografía y Paleocorrientes de la Formación Río Negro. UNLP. La Plata.

BONORINO, A. G. (1974). Contribución al conocimiento de las aguas subterráneas de la zona de Médanos, partido de Villarino (Provincia de Buenos Aires). C.I.C. de la provincia de Buenos Aires. La Plata. Inédito.

BONORINO, A. G. (1979). Estudio hidrogeológico para la provisión de agua subterránea en la zona de Médanos, partido de Villarino, provincia de Buenos Aires. Trabajo presentado en el VI congreso Geológico Argentino. Bahía Blanca. Actas 443-465.

CARRICA J. C., LEXOW, C. Y BONORINO, A. G. (2012). La recarga a través de cordones medanosos en zonas semiáridas. Estudio de caso: Médanos, Prov. de Buenos Aires, Argentina. En: *"Agua Subterránea: Manantial de vida para aprovechar y proteger"* Ed. ALHSUD. XI Congreso latinoamericano de Hidrogeología. Cartagena de Indias, Colombia. Memorias en CD.

FALKLAND, A. y CUSTODIO, E. (1991). Hydrology and Water Resources of Small Islands: a Practical Guide. *Studies and Reports on Hydrology (49)*. UNESCO. París, Francia.

FARQUHARSON, C. G. Y OLDENBURG, D. W. (2004). A comparison of automatic techniques for estimating the regularization parameter in non-linear inverse problems, *Geophysical Journal International*, 156, 411–425.

FIDALGO, F. (1999). El Cuaternario de la provincia de Buenos Aires. En Caminos, R. (Ed): *Geología Argentina*, SEGEMAR, Anales 29: 700- 703, Buenos Aires.

FIDALGO, F., TONNI, E., PORRO, N. y LAZA, J. (1987). Geología del área de la Laguna Chasicó (Partido de Villarino, Provincia de Buenos Aires) y aspectos bioestratigráficos relacionados. *Asociación Geológica Argentina*. Revista 42 (3-4): pag. 407-416.

GARCÍA, J. y O. M. E. DE GARCÍA. (1964). Hidrogeología de la región de Bahía Blanca (provincias de Buenos Aires y La Pampa). *Dirección Nacional de Geología y Minería*. Boletín No 96. Buenos Aires. 93 pág.

LEXOW, C. y BONORINO, A. G. (2012). Estudio hidrogeológico de Médanos. FUNSA. ABSA. Inédito.

LOKE, M. H. (2004). Tutorial 2D and 3D electrical imaging surveys. 128 pp. Recuperado de <http://www.geotomosoft.com/coursenote.zip>

ORELLANA, E. (1972). Prospección Geoeléctrica en corriente continua. *Paraninfo*. Madrid, España.

PASCUAL, R. (1961). Un Nuevo Cardiomyinae (Rodentia, Caviidae) de la Formación Arroyo Chasicó (Plioceno inferior) de la provincia de Buenos Aires. *Ameghiniana* 2(4): 57-71.

ROSSETTO, H. L. (1953). Contribución al conocimiento psamográfico de los médanos de la zona oriental del partido de Villarino, Pcia. de Buenos Aires (Tesis de doctorado inédita). Museo de Ciencias Naturales de La Plata.

SÁNCHEZ, R., PEZZOLA, N. y CEPEDA J. (1998). Caracterización edafoclimática del área de influencia del INTA E.E.A. Hilario Ascasubi, Partidos de Villarino y Patagones, provincia de Buenos Aires. *Boletín de divulgación N° 18*. INTA Hilario Ascasubi. 72 pp. Inédito.

SASAKI, Y. (1992). Resolution of Resistivity Tomography Inferred from Numerical Simulation. *Geophysical Prospecting*, Vol. 40, 453-463. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1992.tb00536.x>

SPALLETI L. e ISLA, F. (2003). Características y Evolución del Delta del Río Colorado ("Colú- Leuvú") Prov. de Buenos Aires, República Argentina. *AAS (Asociación Argentina de Sedimentología)*. Revista 10(1): 23-37.

THORNTHWAITE, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geologic. Rev.* Vol. 38. 55-94. <http://dx.doi.org/10.2307/210739>.