

# Evaluación hidrogeológica en Melo, Uruguay, con el empleo de métodos geofísicos y técnicas geomáticas

Julián Andrés Ramos

correo electrónico: jramos@unorte.edu.uy

Universidad de la República, Salto, Uruguay

Artículo Original

Willy Roberto Rodríguez Miranda

correo electrónico: willy@civil.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Pablo Gamazo

correo electrónico: gamazo@unorte.edu.uy

Universidad de la República, Salto, Uruguay

## Resumen

Las rocas ígneas, por su génesis, no poseen propiedades colectoras primarias. En todo caso, la meteorización y los esfuerzos que actúan sobre ellas, provocan fracturas, fisuras y fallas que permiten la aparición de posibilidades colectoras secundarias. La necesidad de evaluar las propiedades colectoras de un área cercana a la ciudad de Melo, para su utilización con fines ganaderos, motivó el interés en realizar un estudio hidrogeológico. En el área predominan rocas graníticas y se observa un grupo de pequeños manantiales. Para esta evaluación hidrogeológica, se utilizó una combinación de métodos geofísicos de superficie: magnetometría, sísmica de refracción, tomografía eléctrica y sondeo magneto-telúrico, así como técnicas geomáticas aplicadas sobre el modelo digital de elevación y una imagen satelital. Como resultado fundamental se realizó la valoración de las posibilidades colectoras del área y fue posible actualizar la información geológica existente. La combinación de métodos geofísicos y geológicos de superficie permitió esclarecer el modelo físico-geológico del área, así como disponer de evidencia para actualizar el mapa geológico existente. Fue posible identificar la presencia de rocas basálticas, no descritas anteriormente para el área y proponer la zona de contacto granitos-basaltos.

Palabras claves: geomática, hidrogeología, métodos geofísicos

Recibido: 6 de noviembre del 2015 Aprobado: 14 de julio del 2016

## INTRODUCCIÓN

En Uruguay, más del 50 % del territorio está ocupado por acuíferos fisurados (basamento cristalino y basaltos), en los que el agua se almacena y circula en fracturas, fisuras y fallas, y ocasionalmente en el manto de alteración. Estos acuíferos tienen la particularidad de que su aprovechamiento depende directamente de la identificación y ubicación de estructuras portadoras [1].

El conocimiento de la forma geométrica en profundidad, tiene gran importancia en el análisis de los posibles recursos en aguas subterráneas de una región porque no todas las rocas o asociaciones de rocas tienen la misma capacidad de almacenar y ceder agua. Es necesario

entonces conocer la extensión, geometría y características de un acuífero para poder diseñar obras de captación.

Existen diferentes técnicas que pueden implementarse para resolver estas tareas. La utilización de nuevas tecnologías, los sistemas de información geográfica (SIG), la implementación de procedimientos semiautomáticos de delineación y la utilización de un conjunto de nuevos geodatos accesibles públicamente como los modelos digitales de elevaciones (MDE) y escenas de resolución espacial media han permitido una relativamente sencilla y rápida producción de cartografía hídrica, mejorando significativamente el grado de detalle y escalas respecto a los antecedentes disponibles [2].

El análisis del terreno a partir del MDE, brinda la posibilidad de detectar lineamientos generados posiblemente por esfuerzos antiguos. El flujo superficial es controlado por el tipo de material y por zonas de debilidad litológica y estructural [3]. Por otro lado, el procesamiento de las imágenes satelitales posibilita la determinación de las áreas con mayor densidad de vegetación lo que generalmente ocurre en zonas de mayor acumulación de agua en el suelo [4].

El agua subterránea, por las sales disueltas que contiene, es iónicamente conductora y permite a las corrientes eléctricas fluir en el terreno. Por consiguiente, medir su resistividad brinda la posibilidad de identificar la presencia de acuíferos [5]. Esta propiedad física puede ser obtenida en forma indirecta mediante diferentes métodos geofísicos, entre los cuales, los eléctricos o de corriente continua y los electromagnéticos juegan un rol importante.

En un estudio para agua subterránea, el objetivo principal de la exploración geofísica es cartografiar el entorno geológico donde el agua puede almacenarse. El sondeo eléctrico vertical (SEV) ha sido aplicado durante muchas décadas para determinar el espesor y la resistividad del medio geológico en capas, pero el acontecimiento reciente de la técnica de obtención de imágenes de resistividad presenta una nueva era en la exploración de agua subterránea [6].

La combinación de diferentes técnicas es recomendada ya que permite eliminar ambigüedades a la hora de realizar la interpretación.

En el trabajo que se presenta, se muestran los resultados obtenidos en una investigación realizada en Melo, Cerro Largo, Uruguay, que tuvo como objetivo estudiar el medio geológico e hidrogeológico de un padrón, con el fin de localizar las posibles zonas colectoras que alimentan los manantiales presentes. Se aplicaron algunas técnicas geomáticas al MDE y a imágenes satelitales espectrales, se realizaron trabajos magnéticos en todo el padrón, cinco tomografías de resistividad eléctrica, dos tomografías sísmicas y dos sondeos audiomagnetotelúricos (SAMT).

Apartir de la elaboración de los materiales disponibles se pudieron identificar los principales lineamientos presentes en el área, corroborar la relación de los manantiales existentes con las zonas de mayor desarrollo de la vegetación, realizar la cartografía geológica del padrón a partir del comportamiento del campo magnético y los valores de susceptibilidad magnética obtenidos, así como evaluar las posibilidades colectoras del macizo con la ayuda de la sísmica y la tomografía eléctrica. Finalmente, fue posible actualizar el conocimiento geológico del área al verificar la existencia de un contacto entre rocas graníticas y basálticas no descrito en el mapa geológico disponible para el territorio uruguayo.

## MÉTODOS Y RESULTADOS

### Características del área

El padrón se encuentra a 25 km en dirección sureste de la ciudad de Melo en el departamento Cerro Largo, Uruguay. Posee una superficie de 1,11 km<sup>2</sup> en la que se observan un grupo de manantiales, que tienen la particularidad de permanecer activos prácticamente todo el año. En la figura 1 se observa la ubicación geográfica del padrón donde se indica, con circunferencias en la imagen ampliada, la posición de cinco manantiales.

Según la carta geológica a escala 1:500000 y el mapa hidrogeológico a escala 1:100000 publicados por la Dirección Nacional de Minería y Geología de Uruguay, la geología superficial está constituida por granitos indiferenciados de origen plutónico y los posibles acuíferos en la región se encontrarían en rocas con porosidad por fracturas y diferentes niveles de alteración, con alta a media posibilidad para agua subterránea, pero en este sector, poseerían una productividad muy baja, con caudales inferiores a 0,5 m<sup>3</sup>/h/m. Ver figura 2.

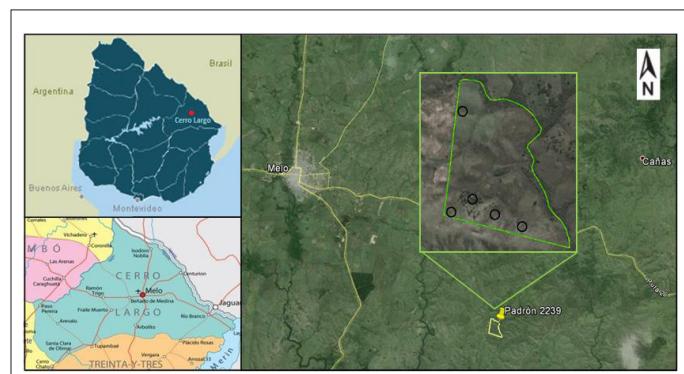


Fig. 1. Ubicación del área de estudio con los surtidores de agua.

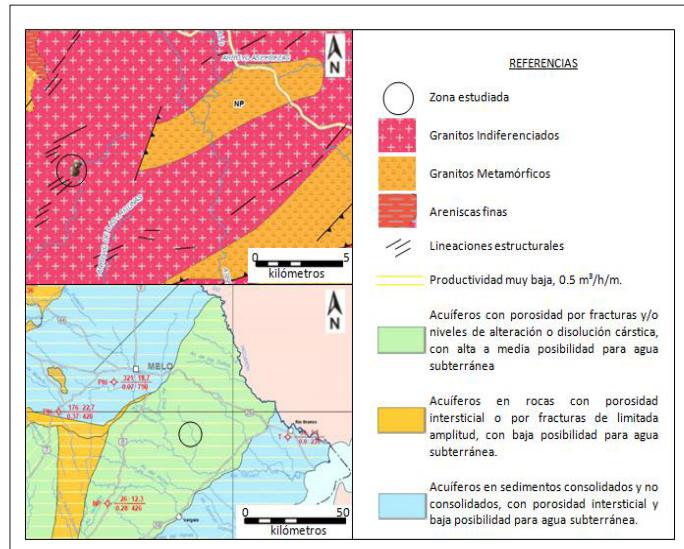


Fig. 2. Geología e hidrogeología del área de estudio (modificadas de la carta geológica a escala 1:500000 y el mapa hidrogeológico a escala 1:1000000 de DINAMIGE, Uruguay).

En la carta geológica puede observarse que en la zona estudiada existen tres lineamientos estructurales con dirección SO-NE, posiblemente generados como consecuencia de esfuerzos tectónicos.

Teniendo en cuenta la información geológica e hidrogeológica disponible se hizo un análisis del modelo digital de elevaciones y se obtuvo el índice de vegetación normalizado (NDVI) para el área estudiada. Se realizó el levantamiento magnético, con un magnetómetro protónico, con resolución de 0,1 nT, modelo WCZ-1 de la firma *W.T.S Limited*, en sus variantes de campo total y gradiente vertical en toda el área. Por último, con los resultados obtenidos se realizaron estudios de detalle mediante sondeos audiomagneto-telúricos, tomografías de resistividad eléctrica y sísmica.

### Análisis del modelo digital de elevaciones

A partir del MDE se observó que las mayores elevaciones se encuentran al oeste y sur del padrón, de manera tal que el agua que precipita es conducida hacia el Arroyo de Amarillo, en sus límites norte y este. Las pendientes tienen en general dirección NE.

Para verificar la existencia de alineamientos en la dirección NE, se obtuvo un mapa de curvatura tangencial. Según [3], en las zonas en que esta última es cóncava existe correspondencia con zonas de posible acumulación de agua. En la figura 3, se presenta el mapa de vectores que muestra las pendientes existentes, superpuesto al mapa de curvatura. Los valores claros corresponden a zonas cóncavas. Se señalan con líneas de trazos los lineamientos observados.

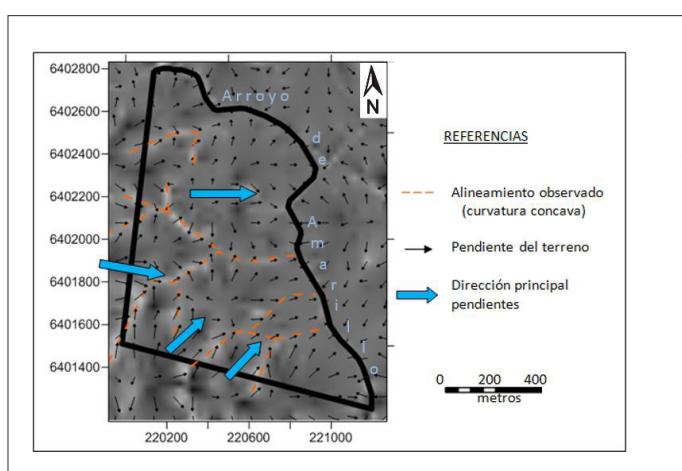


Fig. 3. Mapa de pendientes superpuesto al mapa de curvatura.

### Análisis del NDVI

Las imágenes satelitales multiespectrales y sus combinaciones, brindan más información que la que se obtendría de analizar solo una imagen en el rango visible del espectro electromagnético. A partir de una imagen multiespectral, tomada por el satélite LANDSAT 7 ETM+, se calculó el NDVI. Según [4], los valores más altos de

este indicador corresponden a las zonas con mayor vigor y densidad de vegetación, lo cual puede ser de interés, si se asocian estas zonas con una mayor humedad en el suelo. Teniendo en cuenta esto, se seleccionó una imagen correspondiente al período de sequía del año 1999. En la figura 4 se muestra, superpuesta con una foto satelital, la imagen en transparencia de los valores intensos del NDVI (rango 195-255).

Se aprecia que existe una buena correlación entre la ubicación de los manantiales y los sectores donde los valores del NDVI son más elevados.

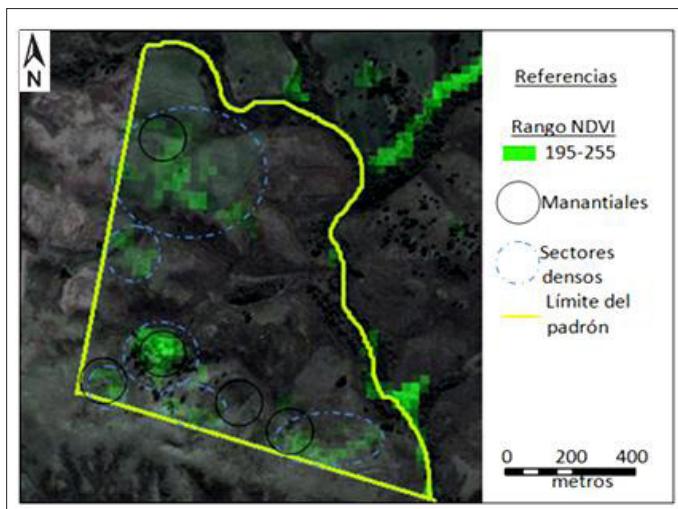


Fig. 4. Correspondencia de manantiales y sectores de NDVI elevado.

### Cartografía magnética

Según [7] la susceptibilidad magnética ( $k$ ) es el parámetro fundamental de la prospección geofísica magnética. El propósito de este estudio fue observar el comportamiento del campo magnético en toda el área partiendo del supuesto que, de existir fracturas, las mismas podrían estar llenas con agua y materiales con susceptibilidades magnéticas diferentes que la roca homogénea predominante, los granitos. A partir de este supuesto, el comportamiento del campo magnético permitiría orientar los estudios de detalle. Se relevó el valor del campo magnético total y el gradiente vertical a lo largo de 17 perfiles, en total 950 puntos. Los resultados del gradiente vertical del campo magnético para toda el área se muestran en la figura 5, donde se señalan además las cinco tomografías eléctricas realizadas.

Se realizó la corrección diurna de los datos tomando el valor medido en un punto de control preestablecido cada una hora. Se priorizó el modo gradiente vertical, pues las anomalías de interés esperadas serían producto de heterogeneidades someras. En la imagen, se indican con líneas de trazo dos alineaciones observadas que fueron estudiadas con mayor detalle.

El primer alineamiento se encuentra al norte del padrón, muy próximo al Arroyo Amarillo. Se caracteriza por una

sucesión de máximos orientados en dirección SO-NE y que separa un sector NO con valores elevados del resto del padrón, con valores bajos. Este comportamiento permitió suponer la posible existencia de un contacto litológico no descrito para el área.

El segundo alineamiento se encuentra al sur y tiene dirección NNO-SEE. Se observa que el comportamiento a ambos lados es diferente, mostrándose un campo más homogéneo al sur con los menores valores del campo y más heterogéneo al norte con valores algo mayores. Este alineamiento magnético coincide con la zona donde se encuentra la mayoría de las manifestaciones de agua en superficie y los valores intensos del NDVI. Debido a esto último, se puede inferir la presencia de agrietamiento en la roca granítica y por ello se seleccionó este alineamiento para realizar los estudios de detalle. Se indica con línea continua, la ubicación de las cinco tomografías eléctricas que se realizaron, con el objetivo de aclarar el corte geológico en profundidad.

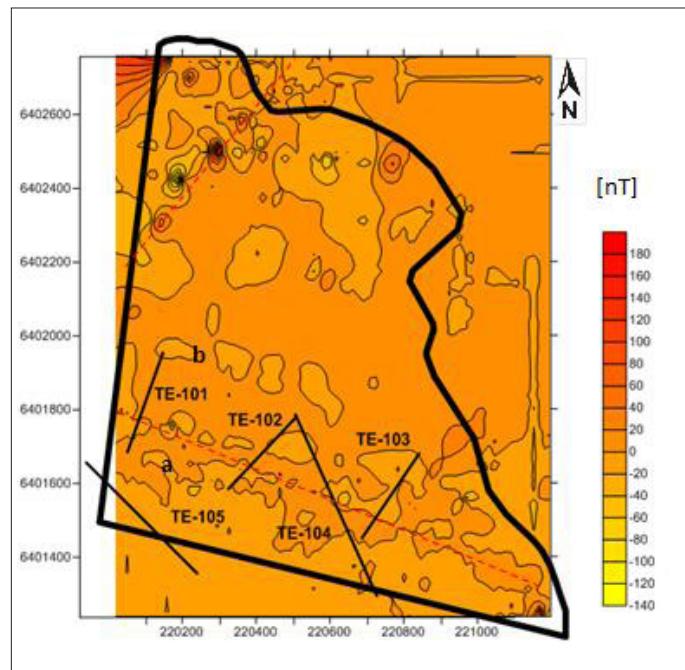


Fig. 5. Gradiente magnético vertical. Alineamientos propuestos (línea discontinua) y tomografías eléctricas realizadas (línea continua). SAMT (a, b).

#### Tomografías de resistividad eléctrica

Las mediciones se ejecutaron utilizando la configuración Schlumberger para la colecta de datos. La separación entre electrodos fue de 10 m. La apertura máxima empleada para las tomografías TE-101, TE-102 y TE-103 fue 300 m y para las tomografías TE-104 y TE-105 fue 580 m. Los modelos geeléctricos obtenidos se muestran en la figura 6.

Durante la interpretación de las tomografías eléctricas se puede observar la presencia de un primer horizonte

con valores de resistividad variables, pero que no superan los 800  $\Omega\text{-m}$  y con un espesor no mayor de 50-60 m. En todos los casos, las tomografías que cortan la supuesta zona de fractura muestran la presencia de un contacto vertical en el corte de resistividades. No aparece este contacto geeléctrico en la tomografía TE-105 que no cortó la zona de fracturas propuesta a partir del gradiente vertical del campo magnético. En todos los casos, se observa que por debajo de este primer horizonte, aparece un segundo horizonte mucho más homogéneo y con altos valores de resistividad, generalmente mayores que 1 500  $\Omega\text{-m}$ . El error porcentual de cada modelo se indica en cada imagen.

#### Tomografías sísmicas

Se utilizó un equipo modelo WZG-24A/48A de la firma W.T.S *Limited*, con total de veinte geófonos distanciados 10 m, lográndose una apertura total de 200 m. Como fuente se utilizó un martillo de accionamiento manual de 10 kg. Se realizaron tiros de flanco y en el centro de cada par de geófonos consecutivos, dando un total de 5 golpes para mejorar la señal. Se realizaron superpuestas con las tomografías eléctricas TE-104 y TE-105 con el objetivo de combinar ambos resultados, resistividad aparente y variación de la velocidad de propagación de las ondas elásticas, durante la interpretación. En las figuras 7 y 8 se observan los modelos de resistividad de tomografías mencionadas sobre las que señala la zona en que coincidieron las tomografías sísmicas. Debajo de cada figura, se muestra el resultado obtenido de cada tomografía sísmica.

En el primer caso se puede observar la presencia de un primer horizonte con valores de velocidad variables, pero inferiores a 2 000 m/s y un espesor no mayor de 30 m. La zona del contacto propuesto se muestra como una zona donde los menores valores de velocidad muestran una mayor profundidad. Este horizonte podría ser asociado, por la variación de la velocidad, a un modelo de dos capas: una con velocidad menor a 1 000 m/s coincidiendo con la presencia del suelo y otra capa. Por debajo de este primer horizonte aparece otro con velocidades homogéneas cercanas a los 3 000 m/s.

En el segundo caso se mantiene un comportamiento similar de la velocidad en profundidad, solo que en esta ocasión el horizonte superior apenas alcanza los 10 m de espesor y una velocidad variable, inferior a los 1 000 m/s. El segundo horizonte muestra una velocidad homogénea y superior a los 1 200 m/s.

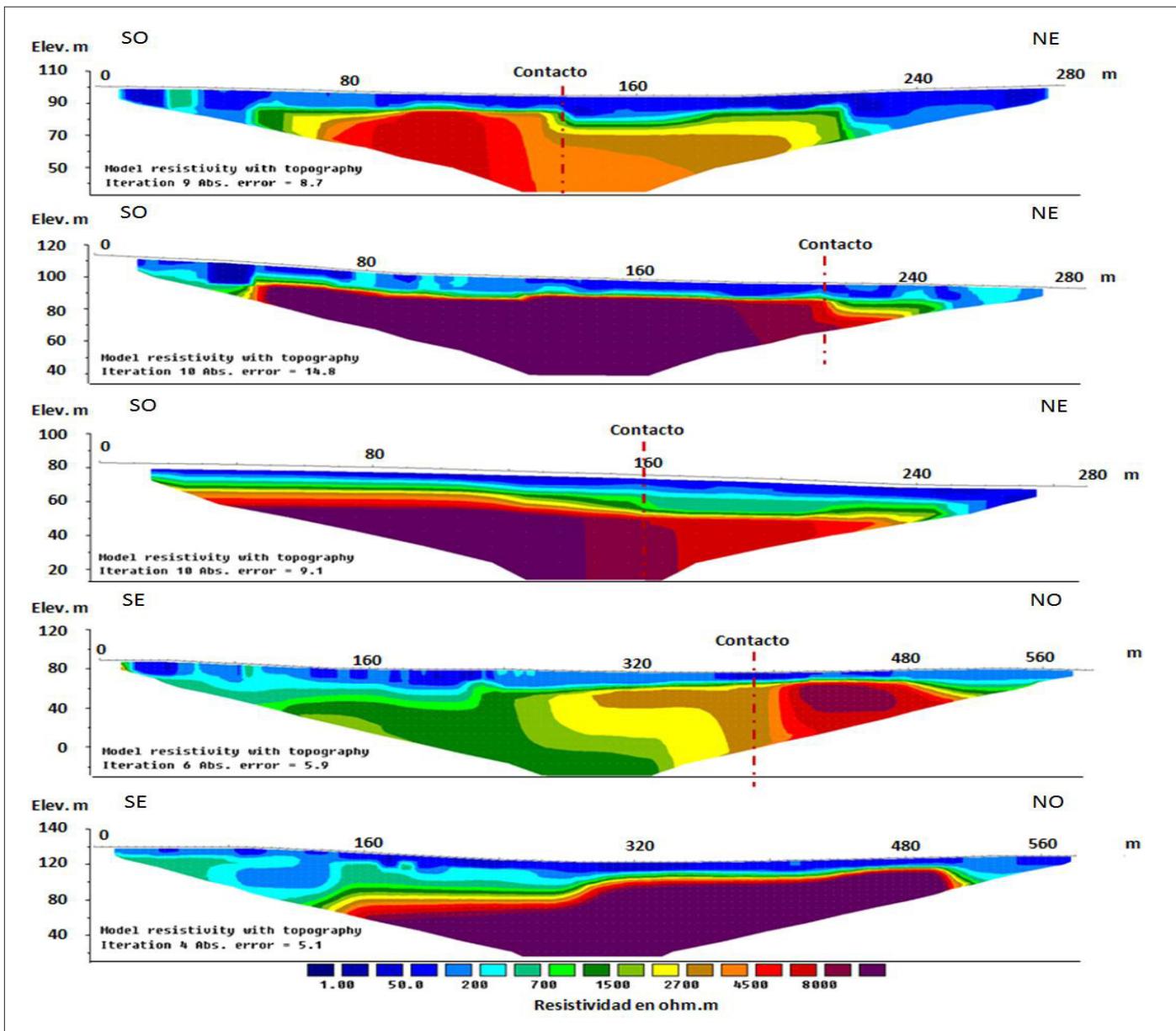


Fig. 6. Modelos de resistividad vs profundidad obtenidos para las tomografías TE-101, TE-102, TE-103, TE-104 y TE-105.

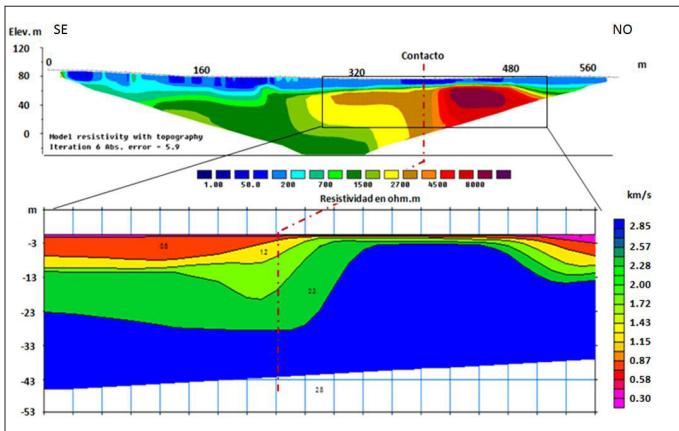


Fig. 7. Tomografía sísmica superpuesta a tomografía eléctrica TE-104.

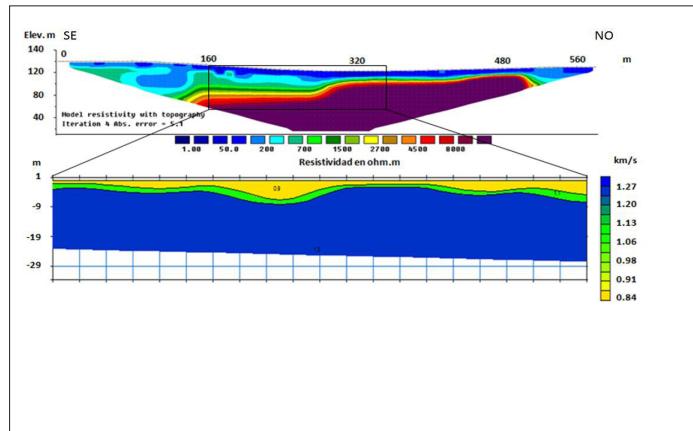


Fig. 8. Tomografía sísmica superpuesta a tomografía eléctrica TE-105.

### Sondeos audio-magneto-telúricos

En esta ocasión, al estar interesados en la parte superior del corte, se optó por emplear la variante audiomagnetotelúrica y se ejecutaron dos puestas, una a cada lado del alineamiento propuesto en la zona sur del padrón. Se utilizó un equipo modelo MTU-5A de la firma *Phoenix Geophysics*, conectado a dos dipolos eléctricos ortogonales formados por dos pares de electrodos no polarizables con apertura MN de 50 m de longitud y a tres bobinas AMTC30. El rango de frecuencias utilizado fue de 10 200 – 1 Hz.

En la figura 9 se muestran los resultados de ambos sondeos, donde se hace evidente la presencia de tres comportamientos de la resistividad en profundidad: una primera capa con un gradiente fuerte de resistividad que no supera los 100  $\Omega\text{-m}$  y un espesor menor a 5 m; una segunda capa donde las variaciones de la resistividad son menores, no superan los 700  $\Omega\text{-m}$  y un espesor cercano a los 30 m; una tercera capa con un comportamiento mucho más homogéneo de la resistividad y alrededor de los 1 000  $\Omega\text{-m}$ .

### ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El análisis del MDE a través de la obtención de la curvatura tangencial cóncava, combinada con el mapa de pendientes, permitió identificar zonas favorables para la posible ubicación de zonas colectoras. La combinación de estas técnicas con los resultados del NDVI, obtenido a partir de una imagen satelital multiespectral tomada durante un período de sequía, permitió verificar estas posibles zonas colectoras.

La cartografía realizada a partir del gradiente vertical del campo magnético terrestre, como método geofísico de avance, permitió orientar los estudios de detalle y realizar inferencias sobre las posibles heterogeneidades existentes en el macizo granítico. Fue posible establecer tres comportamientos evidentes del gradiente vertical en el padrón:

Hacia el sur, valores bajos y homogéneos del gradiente vertical que se corresponden con la presencia de las rocas graníticas poco alteradas.

En la zona centro-norte-este del padrón, con valores bajos a medios del gradiente vertical que se corresponden con los mayores espesores de la zona meteorizada donde se mezclan rocas de variada composición y diferente susceptibilidad magnética.

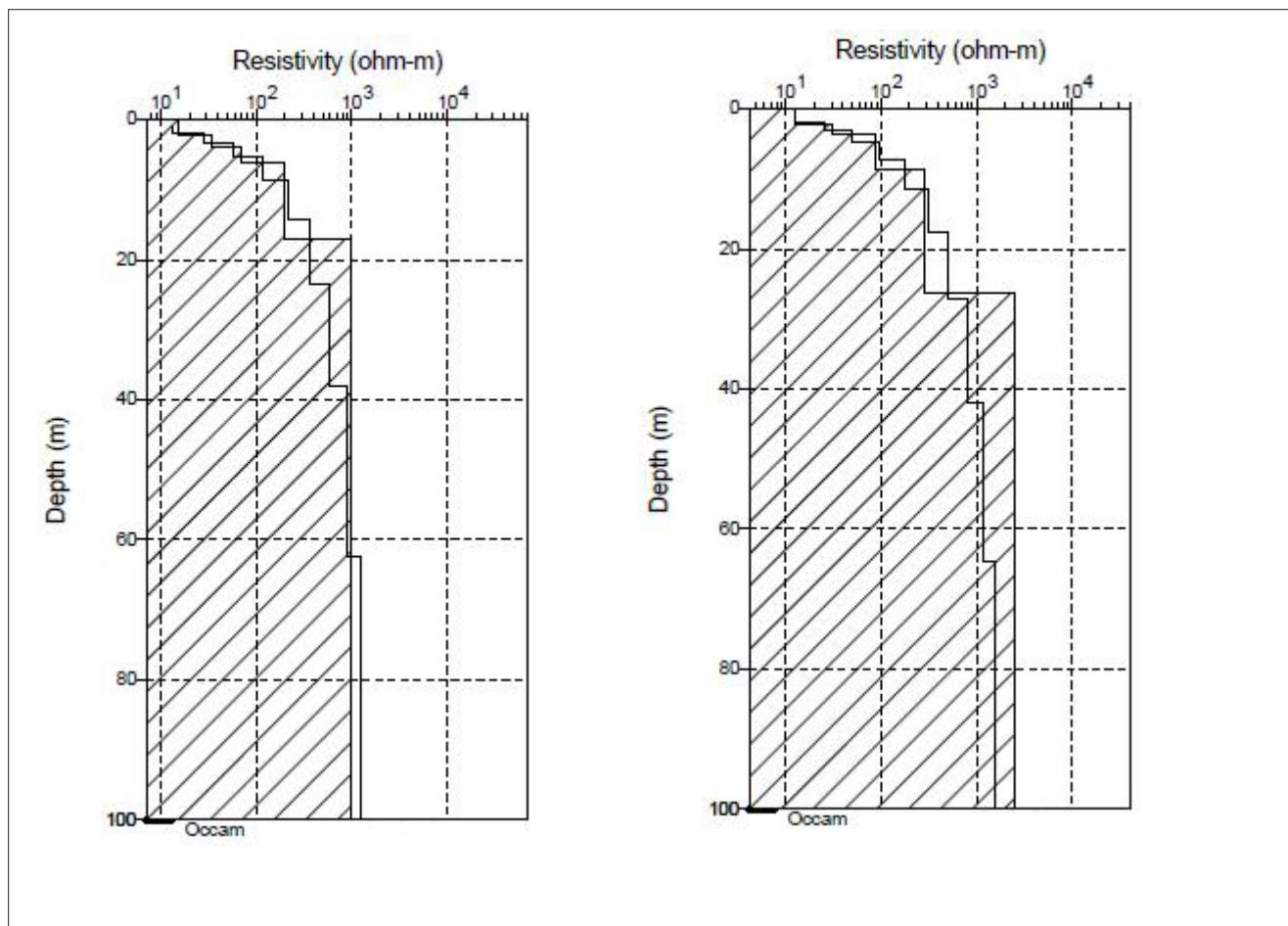


Fig. 9. Sondeos audiogeofísicos: a) izquierda; b) derecha.

Hacía el NO, valores elevados del gradiente vertical que se corresponden con la presencia de rocas basálticas no descritas con anterioridad en el área.

También, como resultado de la interpretación de los resultados del campo magnético, fue posible establecer dos alineamientos importantes dentro del padrón:

El primero, con dirección SO-NE, ubicado al NO que parece representar la zona de contacto entre las rocas graníticas descritas para la región y las rocas basálticas que se describen por primera vez, para el área, a partir de esta investigación.

El segundo, con dirección NOO-SEE, ubicado al sur que pudiera responder a la presencia de una zona de fractura en el macizo granítico y que, sin dudas, favorece el almacenaje y circulación del agua lo que se evidencia por la correspondencia con cuatro de los surtidores existentes en el padrón.

Para confirmar el comportamiento del campo magnético en el padrón se realizó un estudio mediante datos de susceptibilidad magnética.

Este estudio pudo precisar la existencia de un contacto entre rocas no-magnéticas al sur (granitos) y rocas magnéticas al norte (basaltos). Esto fue corroborado posteriormente, durante el análisis petrológico de muestras recolectadas en el área de los trabajos, donde se evidenció la presencia de granitos, gabros y basaltos, lo cual significó poder realizar una actualización del mapa geológico existente para la región (figura 10).

En los modelos geoeléctricos obtenidos se observa, en general, la presencia de un corte con dos capas de comportamiento geo-eléctrico bien diferenciado.

Una primera capa, con valores bajos de resistividad y que aumentan en forma gradual hasta profundidades entre 10 y 20 m, a partir de las cuales, esta variable de torna más homogénea. Este comportamiento puede estar asociado a la presencia de rocas alteradas correspondientes a la zona de meteorización y que sin dudas representan un horizonte colector para el padrón. Una segunda capa, con valores elevados de resistividad bastante homogéneos que deben coincidir con la presencia de la roca granítica no alterada.

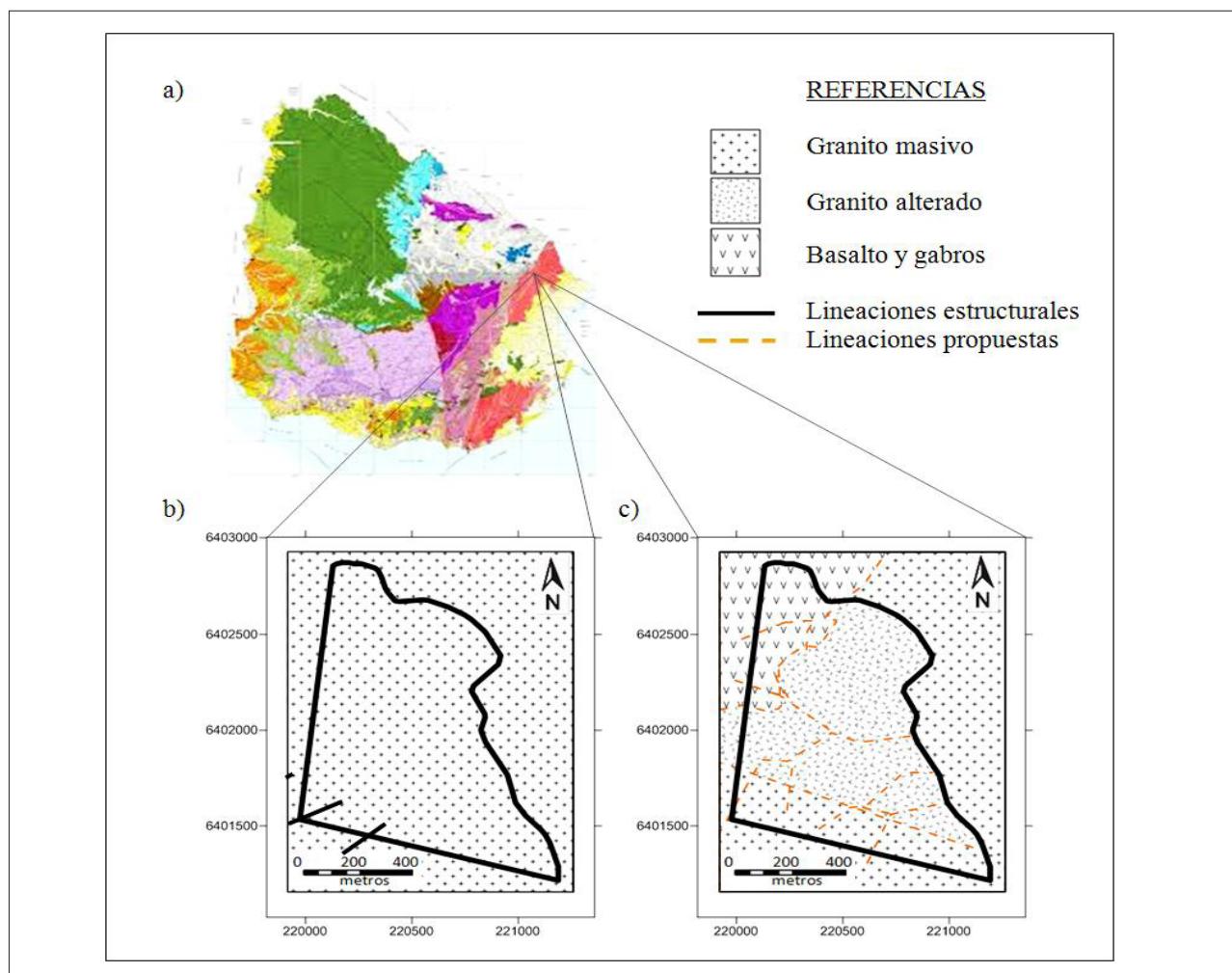


Fig. 10. Propuesta de actualización del mapa geológico: a) mapa geológico de Uruguay; b) detalle área de estudio; c) detalle actualizado.

El alineamiento magnético observado al sur del padrón coincide con cambios suaves en las imágenes de resistividad, en todas las tomografías ejecutadas que la cortan. Aunque no es evidente la presencia de una falla, es posible la existencia de una zona de fractura en la roca granítica. Esta evidencia pudiera ser ratificada o no si se aumentara la profundidad de investigación utilizada en esta oportunidad.

En los modelos sísmicos obtenidos se observa, en general, la presencia de un corte con dos capas de comportamiento bien diferenciado.

Una primera capa, con valores bajos de velocidad de propagación de las ondas sísmicas y espesor máximo de 30 m. Este horizonte corresponde a la zona de meteorización que coincide con el horizonte colector para el padrón.

Una segunda capa, con valores altos de velocidad de propagación de las ondas sísmicas y que debe corresponder a la presencia del granito no alterado.

Para la tomografía que corta el alineamiento propuesto se confirma, en esa posición, un gradiente de la velocidad en profundidad.

Los resultados del SAMT confirman la presencia de dos horizontes bien diferenciados, donde incluso, sería posible desdoblar el primero en dos, correspondiendo la parte superior a la presencia del suelo poco desarrollado en el padrón y la parte inferior a la zona de meteorización con espesores alrededor de los 30 m. El segundo horizonte, parece corresponderse con el granito.

Al integrar todos los resultados, podría esperarse que el modelo físico-geológico del padrón, no incluyendo la zona NO donde aparecen los basaltos, estuviera formado por tres horizontes:

Un primer horizonte, de espesor variable pero nunca mayor de 3 m, que se corresponde con la capa de suelo. Este horizonte presenta valores de resistividad muy bajos debido a la alta humedad y velocidad de propagación de las ondas elásticas alrededor de los 800 m/s.

Un segundo horizonte, de espesor variable alrededor de los 30 m, que se corresponde con la capa de rocas meteorizadas y mezcladas, donde aparecen granitos, gabros y basaltos. Este horizonte presenta valores de resistividad medios de hasta 800  $\Omega\text{-m}$  y velocidad de propagación de las ondas elásticas que no superan los 2 000 m/s.

Un tercer horizonte, de espesor indefinido, que se corresponde con la presencia de las rocas graníticas. Este horizonte presenta valores de resistividad superiores a los 1 000  $\Omega\text{-m}$  y velocidad de propagación de las ondas elásticas mayores a 2 000 m/s.

Si bien los espesores del posible medio colector no parecen ser importantes, vale destacar que para la formación geológica presente, pueden ser de interés para la extracción de bajos caudales como los propuestos en el mapa hidrogeológico mostrado en la figura 2.

## CONCLUSIONES

La utilización de técnicas geomáticas sobre datos del MDE e imágenes multiespectrales permitió corroborar la presencia de sectores favorables para la ubicación de posibles zonas colectoras.

La combinación de métodos geofísicos y geológicos de superficie permitió aclarar el modelo físico-geológico del área, así como disponer de evidencia para actualizar el mapa geológico existente.

Mediante la combinación del levantamiento magnético, el estudio de susceptibilidad magnética y el análisis petrográfico se logró identificar la presencia de rocas basálticas no consideradas en los estudios geológicos anteriores. Fue posible proponer el posible contacto granitos-basaltos en el área del padrón.

El empleo combinado de SAMT, las tomografías eléctricas y sísmicas permitió proponer un modelo físico-geológico para el padrón, donde el horizonte superficial posee mejores propiedades colectoras y el otro en profundidad, menos favorable, pero donde la posible presencia de fracturas pudiera mejorar sus propiedades colectoras.

Se ratifica que el empleo combinado de diferentes métodos favorece la solución de tareas de interés hidrogeológico al minimizar la conocida ambigüedad de la mayoría de estos.

Si bien los espesores del posible medio colector no parecen ser importantes, vale destacar que para esta formación geológica y para su uso en la ganadería, pueden ser de interés para la extracción de bajos caudales, que a su vez pudieran ser mejorados si estuvieran asociados a las fracturas presentes en el macizo granítico.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo brindado por el Departamento del Agua, CENUR LN, Udelar al garantizar la logística empleada en esta investigación. Asimismo, al Licenciado en Geología Martín Appratto profesor de la CENUR LN, Udelar quien realizó el análisis petrológico de las muestras de campo y al Grupo de Hidrología Subterránea del Instituto de Mecánica de los Fluidos, Udelar quienes realizaron la adquisición de las tomografías eléctricas. Finalmente, se agradece al Ingeniero Químico Juan Alzugaray por garantizar las condiciones de trabajo en el padrón.

## REFERENCIAS

1. MONTAÑO XAVIER, Jorge. "Recursos hídricos subterráneos del Uruguay: importancia y aprovechamiento actual". *Revista Sociedad Uruguaya de Geología*, 2005. núm 12, pp. 16 - 32. Disponible en web: [http://www.sugeologia.org/wp-content/uploads/2014/07/Monta%C3%B1o\\_etal\\_2005\\_Rev\\_12.pdf](http://www.sugeologia.org/wp-content/uploads/2014/07/Monta%C3%B1o_etal_2005_Rev_12.pdf) [consultado marzo 2016].

2. **DIAZ, Boris; GIMENEZ, Melisa.** "Zonificación y codificación hidrográfica en Santa Cruz (Patagonia Austral, Argentina) ". XXV Congreso Nacional del Agua, Paraná, Entre Ríos, Argentina. 2015, 13pp. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/278683004> [consultado marzo 2016].

3. **FERNÁNDEZ DE LA VEGA-MÁRQUEZ, Thamara; PROL-LEDESMA, Rosa.** "Imágenes Landsat TM y modelo digital de elevación para la identificación de lineamientos y mapeo litológico en Punta Mita (México)". *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 2011, vol. 63, núm. 1, pp. 109-118. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-33222011000100010](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222011000100010) [consultado enero 2015].

4. **CATANHA, Moises; SACASAS LEÓN, Carlos; PÉREZ LAZO, José.** "Criterios para localizar zonas acuíferas en Caimbambo, Angola". *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. 2014, vol. 35, núm. 3, pp. 20-32. Disponible en web: <http://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha/article/view/227/198> [consultado marzo 2016].

5. **MELI'I, Jorelle; NJANDJOCK, Philippe; GOUET, Daniel.** "Magnetotelluric method for groundwater exploration in crystalline basement complex, Cameroon". *Journal of Environmental Hydrology*. 2011, vol. 19, núm 16. 8pp. Disponible en: <http://www.hydroweb.com/protect/pubs/jeh/jeh2011/njand.pdf> [consultado octubre 2015].

6. **DUTTA, Sushobhan.** et. al. "Localization of water bearing fractured zones in a hard rock area using integrated geophysical techniques in Andhra Pradesh, India". *Hydrogeology Journal*. 2006, vol. 14, pp. 760-766. DOI 10.1007/s10040-005-0460. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/226019803\\_Localization\\_of\\_water\\_bearing\\_fractured\\_zones\\_in\\_a\\_hard\\_rock\\_area\\_using\\_integrated\\_geophysical\\_techniques\\_in\\_Andhra\\_Pradesh\\_India\\_Hydrogeol\\_J](https://www.researchgate.net/publication/226019803_Localization_of_water_bearing_fractured_zones_in_a_hard_rock_area_using_integrated_geophysical_techniques_in_Andhra_Pradesh_India_Hydrogeol_J) [consultado octubre 2015].

7. **LÓPEZ LOERA, Héctor; TRISTÁN GONZÁLEZ, Margarito.** "Geología y magnetometría aérea del Graben de Villa de Reyes, San Luis Potosí, Mesa Central de México: implicaciones tectónicas y geohidrológicas". *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 2013, vol. 65, núm 1, pp. 137-156. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-3322201300100012&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-3322201300100012&script=sci_arttext) [consultado febrero 2016].

## AUTORES

### Julián Andrés Ramos

Ingeniero Electromecánico, Máster en Geofísica Aplicada, Profesor Adjunto Grado 3, Departamento del Agua, Centro Universitario Regional, Litoral Norte, Salto, UdelaR, Uruguay

### Willy Roberto Rodríguez Miranda

Ingeniero Geofísico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Departamento de Geociencias, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

### Pablo Gamazo

Ingeniero Civil, Doctor en Hidrología Subterránea, Profesor Agregado Grado 4, Departamento del Agua, Centro Universitario Regional, Litoral Norte, Salto, UdelaR, Uruguay

# Hydrogeological Assessment in Melo, Uruguay with the Use of Geophysical Methods and Geomatics Techniques

## Abstract

Igneous rocks, for their genesis, have no primary collector properties. In any case, weathering and stresses acting on them, cause fractures, cracks and faults which permit the development of secondary collector possibilities. The need to evaluate the collector properties of an area near the city of Melo, for use for farming purposes, motivated the interest in carrying out a hydrogeological study. In the area predominate granitic rocks and a group of small springs are observed. A combination of surface geophysical methods was used for this hydrogeological evaluation: magnetic, seismic refraction, electrical tomography and magneto-telluric survey together with geomatics techniques applied to the digital elevation model and satellite image. As a main result the assessment of collector possibilities area was made, likewise it was possible to update the existing geological information. The combination of geophysical and geological methods allowed clarifies the physical-geological model and it show evidence available to update the existing geological map. It was possible to identify the presence of basaltic rocks, not described above for the area and propose the contact zone granites-basalts.

Key words: geomatics, hydrogeology, geophysical methods