

**CARACTERIZACIÓN GEOELÉCTRICA DE UN SECTOR DE LOS ACUÍFEROS SALTO Y ARAPEY MEDIANTE EL EMPLEO DE SEV Y SONDEOS AUDIOMAGNETOTELÚRICOS**

**GEOELECTRICAL CHARACTERIZATION OF A SECTOR OF THE AQUIFERS SALTO AND ARAPEY BY VES AND AUDIOMAGNETOTELLURIC SURVEYS**

**Ramos, J.<sup>1</sup>; Gamazo, P.<sup>1</sup>; Saracho, A.<sup>1</sup>; Rodríguez, W.<sup>2</sup>; Carraz, O.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Departamento del Agua, Centro Universitario Regional Litoral Norte, UdelaR, Rivera 1350, Salto, Uruguay.

<sup>2</sup>Departamento de Geociencias, Universidad Tecnológica de la Habana, Calle 114 N°11901, Cuba.  
jramos@unorte.edu.uy

**RESUMEN**

En Salto, Uruguay, el agua subterránea somera es captada de dos acuíferos: uno sedimentario que sobreyace a uno fisurado. La necesidad de estudiar las características que se corresponden con la existencia de zonas colectoras de agua subterránea motivó la realización de una investigación en la que se realizaron 37 sondeos audiomagnetotelúricos y se reinterpretaron 30 sondeos eléctricos verticales, realizados en el año 1993. La información litoestratigráfica, obtenida de perforaciones hidrogeológicas, fue correlacionada con los modelos geoeléctricos obtenidos por ambos métodos. Con los datos de resistividad aparente observados en la parametrización, se realizó un análisis estadístico con el objetivo de caracterizar, desde el punto de vista de esta variable, las principales formaciones presentes.

**Palabras clave:** Hidrogeología, SEV, Método Audiomagnetotelúrico, Salto.

**ABSTRACT**

In Salto, Uruguay, shallow groundwater is collected from two aquifers: a sedimentary one that overlaps a fractured one. In order to study the physical characteristics that correspond to the existence of groundwater catchment areas, 37 Audiomagnetotelluric soundings were performed and 30 vertical electrical soundings from 1993 were reinterpreted. The lithostratigraphic information, obtained from hydrogeological perforations, was correlated with the geoelectric models obtained by both methods. With the data of the resistivity observed in the parameterization, a statistical analysis was carried out with the objective of characterizing the main formations from the point of view of this variable.

**Key words:** Hydrogeology, VES, Audiomagnetotelluric method, Salto.

## INTRODUCCIÓN

En un estudio de agua subterránea, el objetivo principal de la exploración geofísica es cartografiar el entorno geológico en el que el agua puede estar presente (Dutta et al. 2006). El agua subterránea, por las sales disueltas que contiene, es iónicamente conductora y permite a las corrientes eléctricas fluir en el suelo. Por consiguiente, medir la resistividad del suelo brinda la posibilidad de identificar la presencia de acuíferos (Meli'i et al. 2011). Esta propiedad física puede ser obtenida en forma directa, a través de estudios petrofísicos de testigos de perforación, o en forma indirecta mediante diferentes métodos geofísicos eléctricos, o de corriente continua, y electromagnéticos. El método geofísico de corriente continua que se aplica con mayor frecuencia es el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV). Este método, mundialmente conocido, fue creado por los hermanos Schlumberger en Francia, quienes hicieron un diseño usando cuatro electrodos (dos para inyección de corriente eléctrica y otros dos para medir la diferencia potencial). Incrementando la distancia entre electrodos de corriente, la profundidad de estudio también aumenta (Keller y Frischknecht (1966), citados por Delgado Rodríguez et al. (2012)). Arias Salguero (2011) explica que la interpretación de las mediciones parte de la suposición de que el medio consiste de una secuencia de distintas capas horizontales con espesores variables, homogéneas e isotrópicas, cuestión que prácticamente nunca se presenta ya que en la realidad existen variaciones laterales debidas a las condiciones físico-químicas, mecánicas y otras. Por este motivo, el método obtiene la resistividad aparente, la cual viene calculada a partir de la medida de la intensidad de corriente que está en el terreno y de la medida de la caída de potencial en los electrodos internos del arreglo geométrico escogido. Este método no solo puede ser útil para estimar espesores, según Orellana (1972), es posible obtener relaciones entre los parámetros de Dar-Zarrouk, la resistencia transversal y la conductancia longitudinal, con los parámetros acuíferos, transmisibilidad del acuífero y la capacidad de almacenamiento respectivamente. El método geofísico electromagnético, utilizado con mayor énfasis en investigaciones hidrogeológicas, es el magnetotelúrico (MT). Simpson y Bahr (2005) describen al método como una técnica electromagnética pasiva que implica medir las fluctuaciones de los campos eléctrico y magnético naturales, en direcciones ortogonales, en la superficie de la Tierra, para

determinar la estructura conductora en rangos de profundidad desde algunas decenas de metros hasta varios cientos de kilómetros. El método del sondeo audiomagnetotelúrico (SAMT) es una variante del método MT que se aplica en investigaciones someras. Se basa en los mismos principios físicos que el método MT, pero trabaja en un rango de frecuencias más alto. Arango (2005) encuentra que las técnicas someras de alta frecuencia son adecuadas para caracterizar acuíferos someros, por encontrarse las fuentes explotables del recurso a relativamente poca profundidad. Corbo et al. (2005) publican los resultados de un análisis en el que compararon el método AMT con el SEV donde se muestran las limitaciones, resolución, precisión y ventajas relativas de ambos métodos. Destacan que las soluciones proporcionadas por los SAMT son más robustas que las que proporcionan los SEV, pues a diferencia de estos últimos, los primeros, además de la resistividad, obtienen una segunda variable, el ángulo de fase. Ambas variables son las que se utilizan para ajustar el modelo geoeléctrico. Quarto y Schiavone (1994) realizaron un trabajo de caracterización hidrogeológica en que implementaron la técnica del SEV combinada con el MT. Encuentran que el uso conjunto de estos métodos demostró ser eficaz para crear un modelo hidrogeológico de la zona que estudiaron. Sainato et al. (2000) realizaron una investigación en Pergamino, Buenos Aires, región con similares características geológicas que las correspondientes a las del objeto de estudio del presente trabajo. Realizaron un total de 20 sondeos AMT, 17 de los cuales coinciden con SEV realizados previamente. Unas de las conclusiones que obtuvieron fue que las secciones hidrogeológicas superiores de la cuenca de Pergamino pudieron caracterizarse con mayor exactitud que en trabajos anteriores en los que utilizaron el método del SEV. Delgado Rodríguez et al. (2012) entienden que el conocimiento de los parámetros petrofísicos del suelo es incluso útil para la agricultura y el análisis de impacto ambiental. El objetivo del trabajo es presentar los resultados obtenidos en una investigación en la que se caracterizó geoeléctricamente las formaciones Salto, Fray Bentos y Arapey en el entorno de la ciudad de Salto mediante SEV y SAMT.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Características del área  
El objeto de estudio corresponde a un área de 553 km<sup>2</sup> situada al suroeste del departamento Salto, Uruguay. Sus límites son el río Uruguay

## CARACTERIZACIÓN GEOELÉCTRICA DE UN SECTOR DE LOS ACUÍFEROS SALTO Y ARAPEY MEDIANTE EL EMPLEO DE SEV Y SONDEOS AUDIOMAGNETOTELÚRICOS

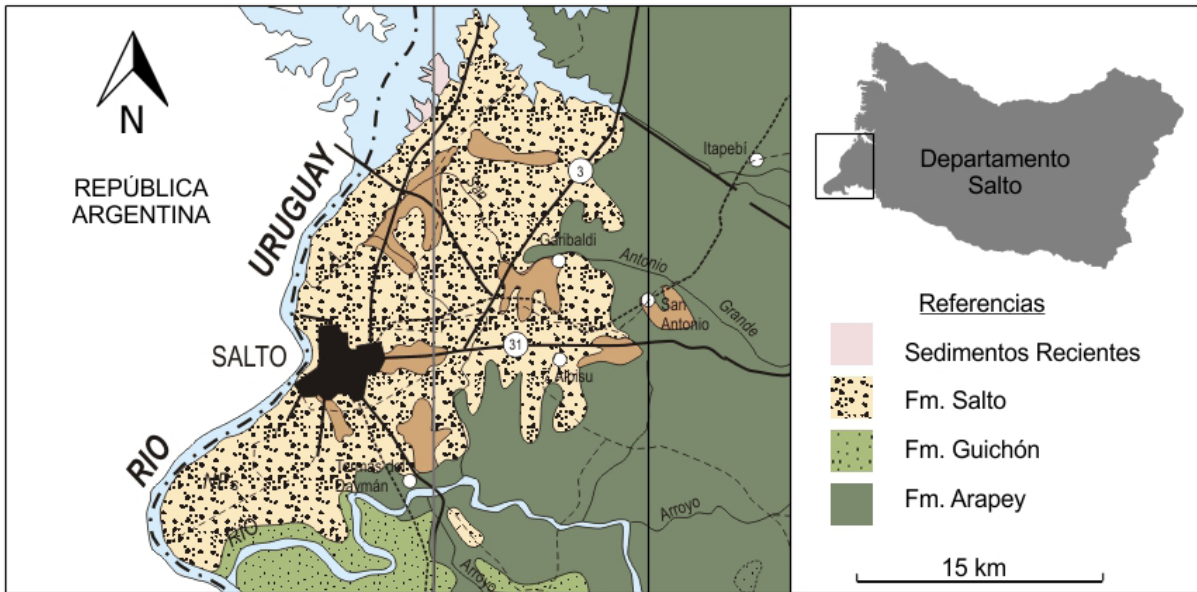


FIGURA 1. Ubicación de área de estudio (modificada de Bossi y Ferrando (2001))

al oeste, la Colonia San Antonio al este, el arroyo Itapebí Grande al norte y el río Daymán al sur. En la Figura 1 se observa la ubicación del objeto de estudio y la geología superficial que fue consultada en el visualizador geológico minero de la Dirección Nacional de Minería y Geología (DINAMIGE) de Uruguay.

Según Bossi y Schipilov (2007), la Fm. Arapey está integrada por la superposición de derrames basálticos con delgados niveles de areniscas eólicas interestratificadas que en la zona de estudio alcanzan 950 m de potencia. Los basaltos, cuando se presentan alterados y fracturados de manera importante, constituyen acuíferos fisurados de media y alta productividad con caudales superiores a los 60 m<sup>3</sup>/h. El resto de las formaciones corresponden a diferentes paquetes sedimentarios. La más importante desde el punto de vista hidrogeológico es la Fm. Salto, pues constituye un acuífero poroso y libre, constituido por sedimentos arenosos a conglomerádicos (Montaño et al., 2006).

### Interpretación de SEV

Para realizar la caracterización geoelectrica de las formaciones presentes en el área de estudio, se utilizó la información de 30 SEV tomados de una investigación hidrogeológica y geofísica realizada en el año 1993 en el marco del Programa de Cooperación EE.UU. - ROU con la colaboración de la DINAMIGE, en la que se exploraron 14 sitios distribuidos dentro del área de estudio. Las curvas impresas fueron digitalizadas y los datos obtenidos se interpretaron en forma semiautomática con el

programa IPI2WIN v3.0.1.a. Como criterio para realizar el ajuste de los modelos geoelectricos se fijaron las profundidades de cada formación, en función de la información obtenida a partir de los datos de las perforaciones ejecutadas y se varió la resistividad. En la Figura 2 se muestra un modelo geoelectrico ajustado según la información de una perforación hidrogeológica. Superpuesto al modelo geoelectrico se observa la curva ajustada a los datos medidos en el SEV. El error en el ajuste fue del 3.16%. Las resistividades obtenidas para a las diferentes capas geoelectricas, fueron asignadas a las formaciones. Se observó en todos los sondeos que la formación Salto está compuesta por tres horizontes geoelectricos con valores de resistividad bien diferenciados, debido, posiblemente, a la no homogeneidad del medio en dirección vertical, a que la primera capa correspondería a suelo y a la variación en la saturación del medio.

### Interpretación de sondeos Audiomagnetotelúricos

En la campaña geofísica, que tuvo lugar durante el período comprendido entre octubre de 2015 y enero de 2016, se realizaron 37 SAMT. El criterio utilizado para la ubicación de los sondeos fue que 10 de ellos, paramétricos, se realizaran en proximidades de perforaciones hidrogeológica, cuya descripción litoestratigráfica era conocida y el resto, exploratorios, fueron propuestos en sitios donde no se contaba con información. Para la adquisición se utilizó un equipo modelo MTU-5A de la firma Phoenix

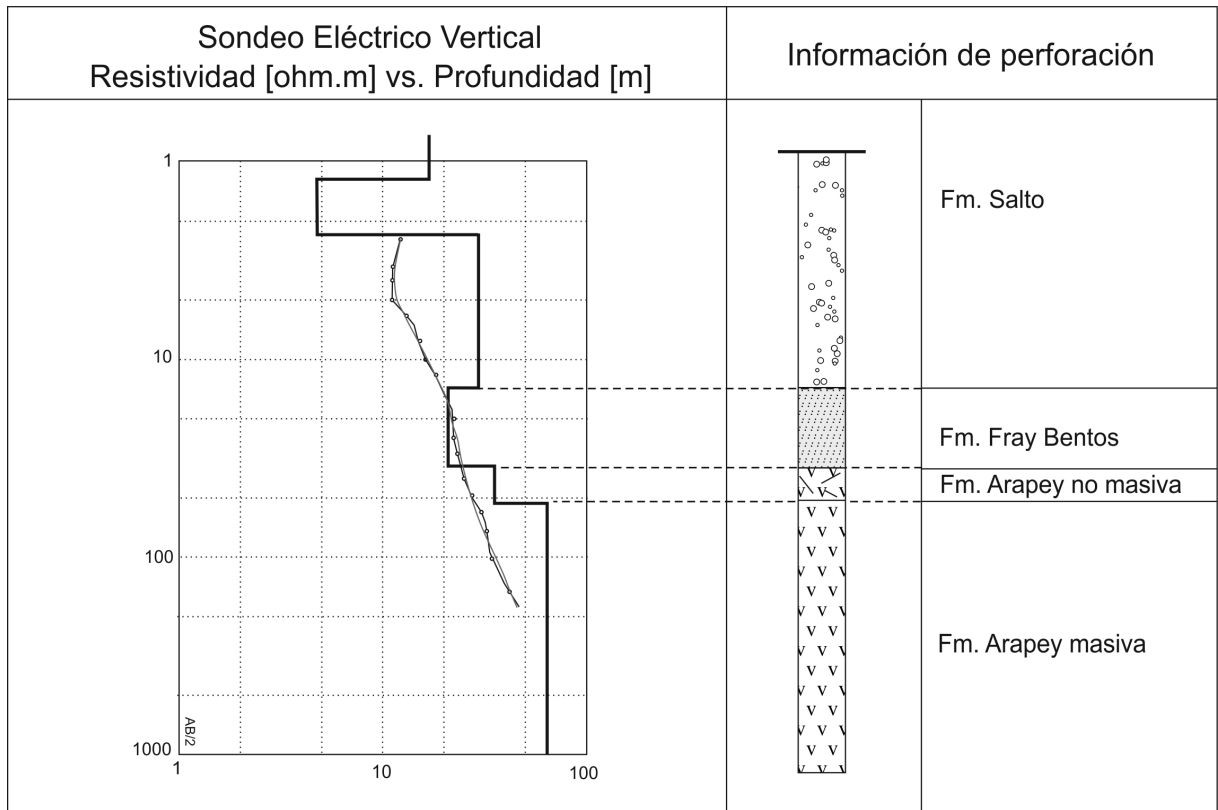


FIGURA 2. Modelo geoelectrico obtenido mediante SEV.

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 modelo AMTC30. Los sondeos fueron realizados con una duración promedio de 1 hora.

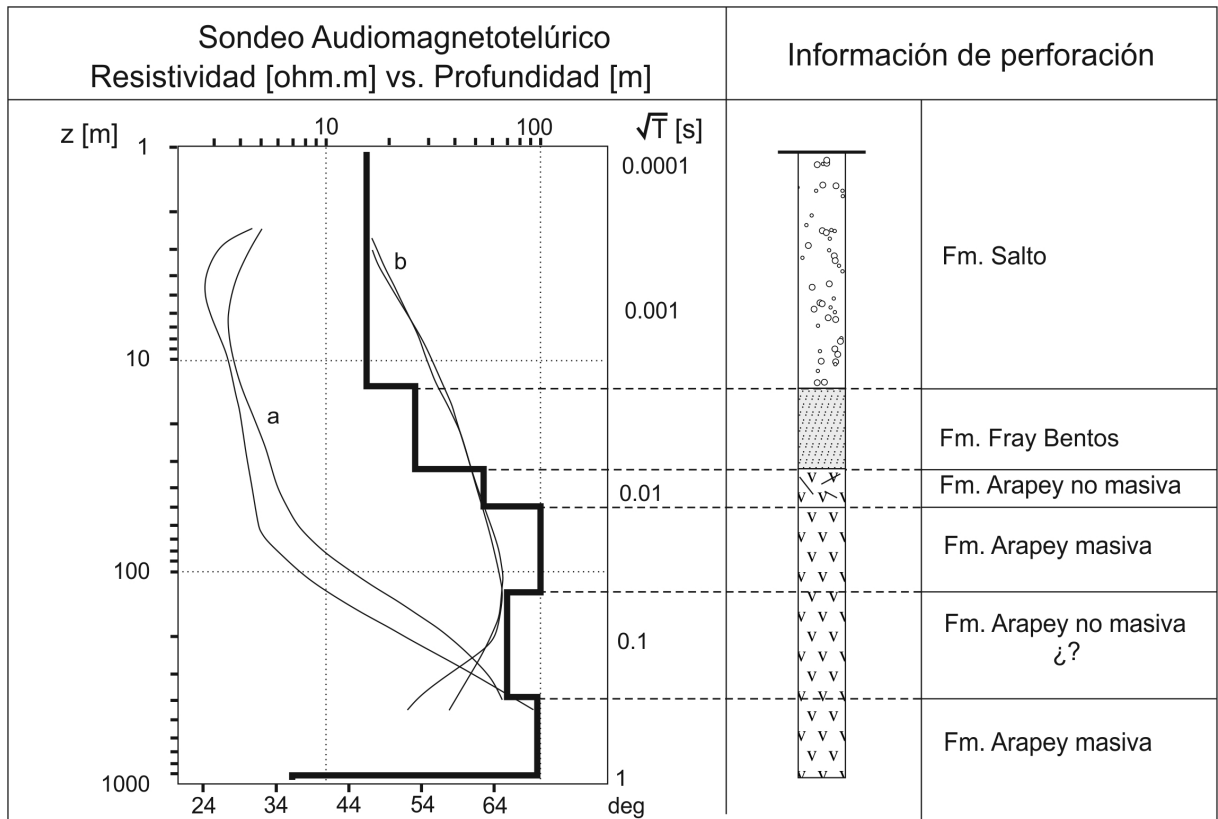


Figura 3. Modelo geoelectrico obtenido mediante SAMT

## CARACTERIZACIÓN GEOELÉCTRICA DE UN SECTOR DE LOS ACUÍFEROS SALTO Y ARAPEY MEDIANTE EL EMPLEO DE SEV Y SONDEOS AUDIOMAGNETOTELÚRICOS

El procesamiento de los datos medidos se realizó con el programa MT-Editor v0.99.2.106 y la interpretación se realizó con el programa ZONDMT1D v5.2. En la Figura 3 se muestra un modelo geoelectrico, ajustado según la información de la perforación mostrada en el epígrafe anterior. Superpuesto al modelo geoelectrico se observan las curvas de ángulo de fase (a) y de resistividad aparente (b), ajustadas a los datos de las mismas variables, extraídas a partir del invariante del tensor de impedancias medido. El error en el ajuste fue del 7.8%. Puede observarse que el modelo geoelectrico es similar al obtenido mediante SEV, a excepción de que, por cuestiones de resolución, las primeras tres capas geoelectricas del modelo anterior, correspondientes a la Fm. Salto, se interpretan como una sola capa de resistividad aparente promedio. Se observa que, por debajo del contacto entre el paquete sedimentario y el basalto, la resistividad aparente aumenta en forma gradiente hasta una profundidad a partir de la cual toma un valor alrededor de los 100 ohm.m, valor que permanece prácticamente invariable por varias decenas de metros. Este comportamiento se interpreta como que la resistividad aparente en el basalto alterado y fracturado, aumenta conforme disminuye el grado de alteración y fracturamiento con la profundidad hasta llegar a masivo o con casi nula porosidad. En la mayoría de los sondeos, se encuentra interesante el hecho que se aprecia en la Figura 3 que, por debajo de los 100 m de profundidad, la resistividad desciende nuevamente en una o dos capas con espesores de varias decenas hasta centenas de metros. El descenso de la resistividad aparente puede deberse a que a esas profundidades existan coladas de basalto con posibilidades colectoras, como sucede en la zona alterada y fracturada suprayacente al basalto masivo explicada anteriormente. Se aclara que no se interpreta como capas de las dimensiones mencionada, sino que puede consistir en varias coladas fracturadas o con grados de alteración diferentes, incluso con delgados niveles de areniscas eólicas interestratificadas como sugiere la bibliografía y capas masivas, que por una cuestión de resolución del método y de promediación en la interpretación conforman una única capa geoelectrica de resistividad media.

### Tratamiento estadístico de los datos

Los valores de resistividad aparente correspondientes a cada formación se determinaron por correlación a partir de

la información litoestratigráfica de las perforaciones y de los modelos geoelectricos obtenidos por SEV y SAMT. Con los datos obtenidos según el método, se hizo un estudio estadístico. Se probaron diferentes modelos de distribución para encontrar el que mejor explica el comportamiento de esta variable. El modelo más adecuado fue el de distribución lognormal. Los parámetros que controlan el modelo de cada capa son  $\mu_L$  y  $\sigma_L$ . Los valores medios y la desviación estándar fueron calculados a través de las siguientes expresiones modificadas de Alfonso Roche (1989):

$$\bar{x} = e^{\bar{x}_L + \frac{S^2}{2}}$$

$$S = \sqrt{\bar{x}^2 \cdot (e^{S_L^2} - 1)}$$

donde:

$\bar{x}$  = media muestral

S = desviación estándar

$\bar{x}_L$  = media muestral de los logaritmos

$S_L$  = desviación estándar de los logaritmos

Para verificar si es posible separar estadísticamente las diferentes formaciones aplicando cada método, fue necesario evaluar si existían diferencias significativas entre los valores medios de las poblaciones, por lo que se realizó, para las capas tomadas de a dos, un análisis de varianza, seguido de una prueba t utilizando el programa MS Excel®. Como hipótesis nula se planteó que las muestras poseen poblaciones de la misma media ( $H_0: \mu_1 = \mu_2$ ). Se utilizó un criterio de confiabilidad igual a un 90% teniendo en cuenta las diferentes fuentes de error existentes como ser los de medición, los de interpretación y los de la metodología de cálculo de la resistividad aparente.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla I se muestran los estadísticos descriptivos correspondientes que caracterizan a cada capa geoelectrica obtenidos mediante SEV. En la segunda columna se indica a que formación corresponde cada capa. Se aprecia que los valores medios de la resistividad aparente que caracterizan a las primeras dos capas son los más bajos mientras que la tercer, cuarta y quinta capa poseen valores medios. La sexta capa posee el mayor valor medio de la resistividad

Capa	Formación	Resistividad [ohm.m]				
		$\bar{x}$	S	Mínimo	Máximo	Coefficiente de variación
I	Salto	20.35	14.40	6.16	47.6	0.71
II		13.75	12.24	1.33	50.1	0.89
III		27.28	23.12	3.22	67.3	0.85
IV	Fray Bentos	26.50	22.18	4.11	61.7	0.84
V	Arapey no masiva	23.85	22.77	7.56	48.7	0.95
VI	Arapey masiva	86.07	54.71	48.7	138	0.64

TABLA I. Resistividad de las principales formaciones geológicas por SEV.

aparente, cuestión que se asocia a la menor porosidad de la Fm. Arapey masiva y, por lo tanto, a sus escasas propiedades colectoras. El resultado de la prueba t fue que la hipótesis nula se aceptó para las combinaciones de capas I - III, I - IV, III - IV y IV - V, lo que implica que estas cuatro capas no pueden ser separadas estadísticamente mediante esta metodología. A la capa II por pertenecer a la misma formación que la I y la III, no tiene sentido diferenciarla. Es favorable el hecho que pueda separarse la capa VI correspondiente a basalto masivo por tener prácticamente baja o muy baja porosidad, y por lo tanto nulo interés desde el punto de vista hidrogeológico.

En la tabla II, se presentan los estadísticos descriptivos obtenidos mediante SAMT. Se aprecia que, al igual que en los SEV, los valores medios de la resistividad aparente para las formaciones sedimentarias, se

determinada. El valor de la resistividad media aparente correspondiente a la Fm. Arapey masiva es del orden de la obtenida por SEV. El resultado de la prueba estadística, para verificar si es posible separar las diferentes capas geoelectricas con este método fue que la hipótesis nula se aceptó únicamente para las combinaciones de Fm. Salto - Fm. Fray Bentos. Esto implica, al igual que con el SEV, que estas dos formaciones no pueden ser diferenciadas por este método. Es importante el hecho de que pueda diferenciarse la Fm. Arapey no masiva de la masiva pues a la primera pueden asociarse propiedades acuíferas.

## CONCLUSIONES

Se caracterizaron, desde el punto de vista geoelectrico, diferentes formaciones presentes en el área de estudio por el método del SEV y el método del SAMT, utilizando técnicas estadísticas.

Formación	Resistividad [ohm.m]				
	$\bar{x}$	S	Mínimo	Máximo	Coefficiente de variación
Salto	24.21	18.85	5.72	67.70	0.78
Fray Bentos	27.06	19.12	11.40	54.30	0.71
Arapey no masiva	45.74	30.23	18.55	71.39	0.66
Arapey masiva	138.49	89.66	84.00	251.00	0.65

TABLA II. Resistividad de las principales formaciones geológicas por SAMT.

caracterizan por ser los más bajos y no difieren significativamente. La Fm. Salto, como se menciona en el apartado anterior, se modeló como una única capa geoelectrica con resistividades aparentes promedio. La media correspondiente a la Fm. Arapey no masiva se encuentra por encima del valor obtenido mediante SEV. Esto puede deberse a que el valor de la resistividad aparente depende del método con que es

Del análisis se puede concluir que, para el muestreo realizado, no fue posible mediante el método del SEV diferenciar el valor medio de resistividad de las formaciones sedimentarias entre sí (Fm. Salto y Fm. Fray Bentos), y respecto a la formación Arapey no masiva. Si fue posible diferenciar el valor medio de resistividad de la Fm. Arapey masiva frente a la no masiva y a las formaciones sedimentarias.

## CARACTERIZACIÓN GEOELÉCTRICA DE UN SECTOR DE LOS ACUÍFEROS SALTO Y ARAPEY MEDIANTE EL EMPLEO DE SEV Y SONDEOS AUDIOMAGNETOTELÚRICOS

Mediante el método de SAMT fue posible obtener un valor medio de resistividad representativo para las formaciones sedimentarias, la formación Arapey no masiva y para formación Arapey masiva. En comparación con el SEV, se aprecia que el método SAMT tiene menos resolución en las primeras decenas ya que a la Fm. Salto la modela como un único horizonte geoelectrico de resistividad promedio, mientras que con la profundidad la resolución aumenta permitiendo observar la variabilidad que existe en el interior del basalto. El hecho de que, mediante la implementación del método del SAMT pueda ser diferenciada la Fm. Arapey no masiva de la masiva, constituye un resultado importante desde el punto de vista hidrogeológico por tener la primera propiedades colectoras secundarias.

### Agradecimientos

*Los autores desean agradecer el apoyo brindado por el Departamento del Agua, Centro Universitario Regional Litoral Norte, UDELAR al garantizar la logística empleada en esta investigación. Asimismo, a los docentes del Departamento de Geociencias, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría". Finalmente, al Ingeniero Agrónomo Enrique Massa Seguí por facilitar la información de los SEV utilizados.*

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFONSO ROCHE, J.R. (1989). **Estadística en las ciencias geológicas.** Ciudad de La Habana, IPSAJE.
- ARIAS SALGUERO, M.E. Aplicaciones geofísicas a la hidrogeología en Costa Rica. **Revista Geológica de América Central.** 2011, 27 pp.
- ARANGO, C. (2005). **Estudio magnetotelúrico de la zona de Lluçmajor (Mallorca): avances en el proceso de datos y modelo 3D.** Tesis en opción al grado de Doctor (inédita), Departament de Geodinàmica i Geofísica. Universitat de Barcelona.
- BOSSI, J. & L. FERRANDO (2001). **Carta Geológica del Uruguay a escala 1/500.000, versión digital 2.0.** Facultad de Agronomía, Montevideo.
- BOSSI, J. & A. SCHIPILOV (2007). **Rocas ígneas básicas del Uruguay.** Facultad de Agronomía, Montevideo, pp. 1-364.
- CORBO, F.; A. OLEAGA & J. ARZATE (2005). Análisis comparativo de dos métodos geofísicos (SEV-MT) aplicados en la zona termal del Sistema Acuífero Guaraní en Argentina y Uruguay. **Congreso Latinoamericano de Geología, Quito, Ecuador.** 5 pp.
- DELGADO RODRÍGUEZ, O.; M. LADRÓN DE GUEVARA TORRES; V. SHEVNIN & A. RYJOV (2012) Estimation of soil petrophysical parameters based on electrical resistivity values obtained from lab and in-field measurements. **Geofísica internacional,** 51, p. 5-15.
- DUTTA, S.; N. KRISHNAMURTHY; T. ARORA; V. RAO; S. AHMED & J. BALTASSAT (2006). Localization of water bearing fractured zones in a hard rock area using integrated geophysical techniques in Andhra Pradesh, India. **Hydrogeology Journal,** 14, p. 760-766.
- MELI'I, J.; P. NOUCK & D. HERVE (2011). Magnetotelluric method for groundwater exploration in crystalline basement complex, Cameroon. **Journal of Environmental Hydrology.** 19, p.1-8.
- MONTAÑO, J., S. GAGLIARDI & M. MONTAÑO (2006). Recursos hídricos subterráneos del Uruguay. **Boletín Geológico Minero.** 117(1), p. 201-222.
- ORELLANA, E. (1972) **Prospección geoelectrica en corriente continua.** Madrid, España.
- Quarto, R. & D. Schiavone. (1994) Hydrogeological implications of the resistivity distribution inferred from electrical prospecting data from the Apulian carbonate platform. **Journal of Hydrology.** 154(1-4), p. 219-244.
- RAMOS, J. (2016). **Caracterización geólogo-geofísica de un sector del sistema acuífero Salto-Arapey mediante el empleo del SAMT y técnicas geomáticas.** Tesis de Maestría en Geofísica Aplicada, Departamento de Geociencias, CUJAE, Cuba.
- Sainato, C., M. Pomposiello, A. Landini, G. Galindo & H. Malleville. (2000) Hydrogeological sections of the Pergamino basin (Buenos Aires province, Argentina): audio magnetotelluric and geochemical results. **Revista Brasileira de Geofísica.** 18(2), p. 187-200.
- SIMPSON, F. & K. BAHR (2005). **Practical Magnetotellurics.** The Pitt Building, Trumpington Street, Cambridge, United Kingdom: The Press Syndicate of The University of Cambridge.