

# IMÁGENES DE RESISTIVIDAD ELECTRICA EN LENTES DE AGUA DULCE DE LA ZONA COSTERA ORIENTAL DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Perdomo, S.<sup>(1,4)</sup>; Carretero, S.<sup>(2,3)</sup>; Ainchil, J.<sup>(1)</sup>; Kruse, E.<sup>(2,3)</sup>.

<sup>(1)</sup> Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Paseo del Bosque s/n. La Plata. Buenos Aires. Argentina. Tel/Fax:(0221) 4236593. santiago.perdomo@fcaglp.unlp.edu.ar

<sup>(2)</sup> Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Cátedra de Hidrología General, calle 64 n° 3. La Plata. Buenos Aires. Argentina. Teléfono (0221) 4249049. scarretero@fcnym.unlp.edu.ar

<sup>(3)</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Universidad Nacional de La Plata. kruse@fcnym.unlp.edu.ar

<sup>(4)</sup> Comisión de Investigaciones Científicas

## RESUMEN

El manejo de los recursos hídricos de la región costera de la provincia de Buenos Aires adquiere relevancia dada las limitadas reservas de agua dulce y la demanda que requieren las localidades balnearias en esta región. La finalidad de este trabajo es valorar el uso de la tomografía eléctrica para la evaluación de la disponibilidad de agua dulce y su relación con el agua salada o salobre en las proximidades de San Clemente del Tuyú. Se realizaron relevamientos de campo que incluyeron la medición de quince sondeos eléctricos verticales (SEV), ubicados en tres perfiles perpendiculares a la costa y ocho tomografías para analizar las características hidrogeológicas y la relación entre agua de distintas salinidades. A partir del procesamiento y teniendo en cuenta la inversión de datos de los sondeos, se definieron rangos asignables en forma generalizada a las características del subsuelo. Las electrocapas propuestas son: de resistividad mayor a 100  $\Omega\text{m}$  asimilables a sedimentos no consolidados de la zona no saturada; entre 100 y 10  $\Omega\text{m}$ , a las arenas con agua dulce (acuífero explotable); una posible zona de transición que presenta valores entre 10 y 1  $\Omega\text{m}$  y por último, los valores inferiores a 1  $\Omega\text{m}$  son vinculables a limos arcillosos o agua de alta salinidad. La caracterización efectuada adquiere importancia para la planificación, ubicación y diseños de perforaciones y para la cuantificación de las reservas de agua dulce disponible.

Palabras claves: agua dulce-agua salada, imágenes de resistividad eléctrica, salinidad de las aguas subterráneas

## ABSTRACT

Water resources management in the coastal area of the Buenos Aires province is important due the limited freshwater reserves in the region and the high water demand from the population in the seaside resorts. The main objective of this contribution is the assessment of electrical tomography for the study of freshwater availability and its relationship with saltwater or brackish water in San Clemente del Tuyú area. Fifteen Vertical Electric Sounding (VES) located in three profiles – perpendicular to the coast – and eight tomographies were carried out. Considering the inverted VES data it was possible to identify different resistivity zones. The proposed electrolyers are: sandy unconsolidated sediments that belong to the unsaturated zone with resistivity higher than 100  $\Omega\text{m}$ ; sand saturated with freshwater (exploitable phreatic aquifer) with resistivity values between 10 and 100  $\Omega\text{m}$ ; a possible transition zone which resistivity is between 1 and 10  $\Omega\text{m}$ , and resistivity values lower that 1  $\Omega\text{m}$  are related to high-salinity water or clayey silt. This characterization is relevant for the planning, location and design of wells and the freshwater reserves quantification.

Keywords: freshwater, saltwater, Electrical Resistivity Imaging, groundwater salinity

## INTRODUCCIÓN

El manejo de los recursos hídricos en las localidades de la zona costera de la provincia de Buenos Aires es de gran importancia debido a las limitadas reservas que poseen y a la creciente demanda que requieren en épocas estivales.

La aplicación del método eléctrico para caracterizar las condiciones del medio en regiones costeras ha sido estudiada por diversos autores (Nowroozi et al. 1999; Nassir et al. 2000; Satriani et al. 2011).

El presente estudio se realizó en la localidad de San Clemente del Tuyú, ubicada al sur de la Bahía de Samborombón en la provincia de Buenos Aires. Los habitantes de esta localidad obtienen el agua dulce de pozos someros que funcionan de manera particular y también existe una cooperativa que extrae agua en un campo de bombeo. El acuífero de agua dulce alojado en los médanos presenta una particular interacción con el agua salina proveniente del mar en el sector oriental pero también con el agua salobre proveniente de la zona occidental (llanura continental o deprimida).

El objetivo de este trabajo es valorar el uso de la tomografía eléctrica para la evaluación de la disponibilidad de agua dulce y su relación con el agua salada o salobre en las proximidades de San Clemente de Tuyú. Los modelos obtenidos se presentan en forma de perfil o sección de resistividades en 2D, denominadas Imágenes de Resistividad Eléctrica (IRE). Mediante la caracterización planteada se busca aportar información adicional para la ubicación y diseño de futuras perforaciones y la cuantificación de las reservas de agua dulce disponibles.

## AREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en San Clemente del Tuyú, Partido de la Costa en la Provincia de Buenos Aires. Se trata de una franja costera con un ancho de 2 km, que cubre una superficie aproximada de 15 km<sup>2</sup>. (Figura. 1)

Desde un punto de vista hidrogeológico el área se localiza en la Región Costera (González, 2005). Se diferencian dos unidades morfológicas denominadas cordón costero y llanura deprimida (Figura 1) en el cual la geomorfología influye sobre el comportamiento hidrodinámico e hidroquímico.



Figura 1: Área de Estudio

El Cordón Costero se extiende sin interrupciones desde Punta Rasa hacia el sur, con un ancho de 2 a 4 km. Se divide en playa y médano. La playa presenta una granulometría de arenas finas y un ancho entre 50 y 150 m con pendientes suaves hacia el este. Los médanos emplazados al oeste de la playa son de baja altura (entre 3 y 10 m.snm) y están cubierto por escasa vegetación. El Cordón Costero presenta, en su mayoría, aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas de baja salinidad (Carretero y Kruse, 2009).

La Llanura Deprimida se desarrolla al oeste del Cordón Costero, las cotas son inferiores a 5 m.s.n.m. Presenta geoformas menores de relieve negativo y positivo. Las primeras comprenden cursos irregulares de drenaje lento, que en la Bahía de Samborombón tienen verdadera morfología de canales de marea y forman los típicos cangrejales (Consejo Federal de Inversiones, 1989). El agua subterránea es clorurada y/o sulfatada magnésica de alto contenido salino (Carretero y Kruse, op.cit). Los rasgos de relieve positivos se desarrollan entre 1-1.5 m de altura, son crestas de playa que se ubican al oeste del médano. Constituyen reservorios restringidos localmente con agua bicarbonatada cálcica de baja salinidad. (Consejo Federal de Inversiones, 1990).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los sondeos eléctricos verticales (SEV), permiten conocer la distribución vertical de resistividades, a través de mediciones en superficie, y su posterior inversión. Los modelos propuestos suponen un comportamiento lateralmente homogéneo para cada una de las electrocapas.

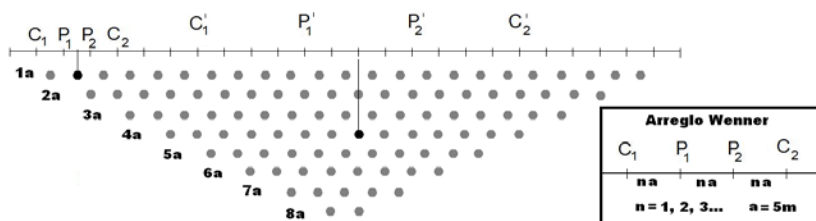
Para contemplar posibles variaciones laterales de la resistividad es necesario realizar estudios de mayor detalle como son las tomografías eléctricas, que combinan mediciones en profundidad y en dirección horizontal. Tal como fue indicado los modelos se presentan en forma de perfil (IRE).

El trabajo de campo consiste en obtener valores de resistividad aparente a partir de hacer circular una corriente continua  $I$  por el circuito de emisión ( $C_1$  y  $C_2$ ) y medir la diferencia de potencial  $V$  generada entre los electrodos de recepción ( $P_1$  y  $P_2$ ), teniendo en cuenta su disposición geométrica. El dato de resistividad aparente obtenido se ubica en forma de pseudo sección (Figura 2), que luego es necesario invertir para obtener un modelo de resistividades “verdaderas”. Para el procesamiento de los datos se utilizó el software Res2DInv de Geotomo.

El modelo se obtiene de manera iterativa, y por medio de algoritmos matemáticos se calcula su respuesta eléctrica que es comparada con los datos medidos. La diferencia entre la sección calculada y las mediciones viene dada por un error medio cuadrático, que indica la bondad del ajuste.

En el área de estudio se utilizó un arreglo cuadripolar Wenner de 5m de separación electródica mínima y 40m de separación máxima, permitiendo explorar hasta 20m de profundidad. La sensibilidad de este arreglo a las variaciones verticales de resistividad lo hace apropiado para diferenciar el comportamiento eléctrico de una estratificación subhorizontal, como lo es el límite arena-arcilla en la zona de estudio.

Figura 2: Pseudo sección. Ubicación de los datos y arreglo utilizado. Se ve como ejemplo dos disposiciones electródicas para la obtención de datos.



## RESULTADOS

Como parte del estudio se efectuaron Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), algunos de ellos cercanos a perforaciones que cuentan con la descripción del perfil litológico correspondiente. Una secuencia típica se tiene en el pozo CFI-SHN-1 (Consejo Federal de Inversiones, 1989), cuyas principales características se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción pozo CFI-SHN-1

Prof (m)	Descripción Litológica
0 - 4	Arenas finas a medianas con presencia de conchilla
4 - 9	Conchillas y arenas mezcladas
9 - 22	Arcillas
22	Arcilla muy compacta con abundante conchilla

A continuación, se muestra la interpretación de un SEV que sirve a modo de ejemplo para describir cualitativamente las características eléctricas de la zona:

Tabla 2: Rangos de resistividades interpretadas.

Resistividad ( $\Omega\text{m}$ )	Asignación
> 100	Zona no saturada (ZNS)
100 – 10	Arenas con agua dulce (acuífero)
10 – 1	Zona de transición (ZT)
< 1	Arcillas / agua con elevada salinidad

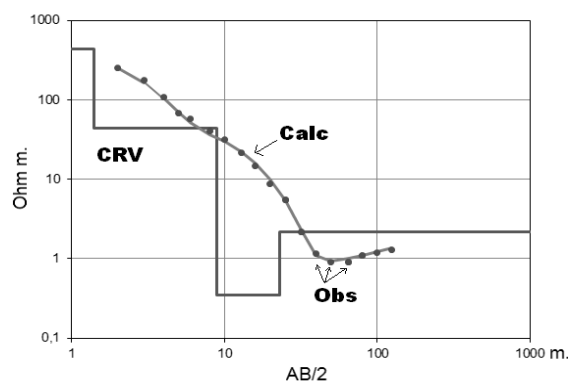


Figura 3: SEV paramétrico.

La primera capa, corresponde a valores superficiales, de alta resistividad. Por debajo se observa una capa de valores intermedios con un espesor aproximado de 8 m. Finalmente aparecen capas de resistividad notablemente inferior, debido al aumento de la salinidad del agua de saturación o a la presencia de arcilla (Figura 3). A partir de esta interpretación se definen rangos de resistividades asignables a distintas características del subsuelo (Tabla 2). De acuerdo a esta clasificación es posible reconocer que las capas presentan un importante contraste eléctrico.

En base a los SEV (Tabla 3, Figura 4) y el análisis de la distribución de resistividades, asociado a diferentes ambientes geomorfológicos, se realizaron ocho Imágenes de Resistividad Eléctrica (IRE) para estudiar las posibles variaciones laterales. Como puede verse en la Figura 4, tres fueron realizadas sobre la zona costera, tres en la parte central de la localidad y otras dos en la zona de la Llanura Deprimida.

Tabla 3: Resultados de los SEV. Las profundidades (Z) están en metros y las resistividades (RV) en Ohm.m.

Z	RV	Z	RV
0,45	100	6,5	52
1,9	7,9	12	0,45
INF	0,6	INF	1,5
1,6	570	7,5	16
7,2	33	25	0,85
INF	1,6	INF	2,5
1,6	500	2,5	600
7,7	50	11	55
INF	0,5	INF	0,6
1	520	2	2,1
7	62	3,5	0,9
30	4	8	3,1
INF	2	INF	1
1,4	440	0,8	9
9	44	2	0,9
23	0,35	8	4
INF	2,2	50	0,95
1,5	450	INF	1,4
5,5	35	0,35	250
12	4	2,6	2,4
INF	0,8	9,5	12
1,5	300	30	0,55
5,6	42	INF	1,2
INF	0,8	1	230
0,5	370	4	48
2	7,5	15	8,2
6	1,45	28	0,8
INF	0,95	INF	1,7

Figura 4: Ubicación de las IRE, los SEV y el pozo CFI-SHN-1.



En todos los casos se utilizó la misma escala logarítmica para los valores de resistividad, de modo que los modelos pueden ser comparables entre sí.

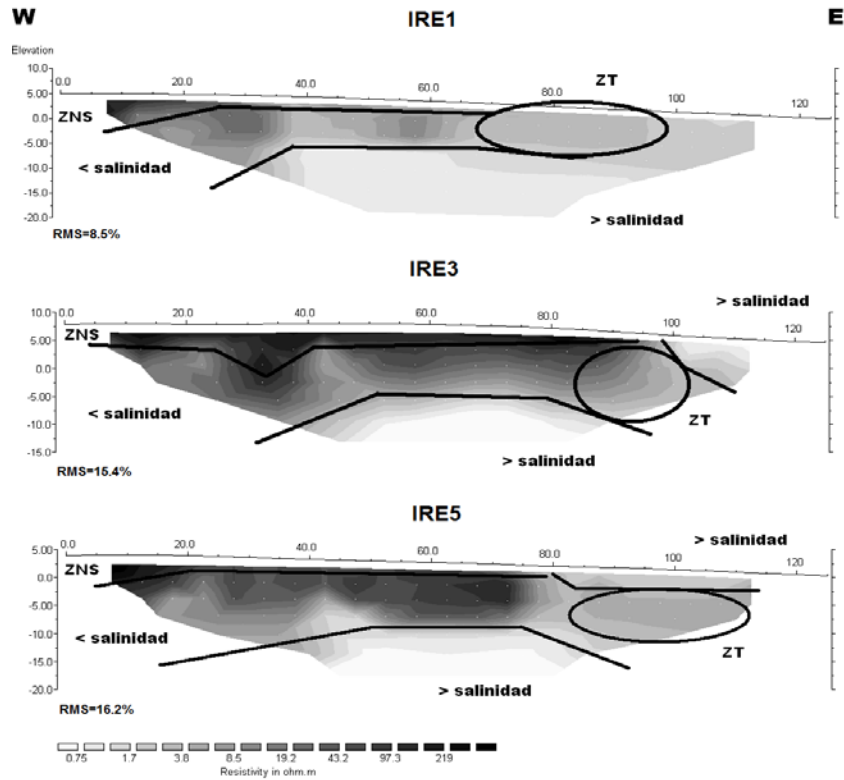
### IRE Costeras

Las tres IRE costeras se realizaron en la zona de playa, integrando un sector de médanos de baja altura y otro de playa afectado por la dinámica mareal.

En las imágenes eléctricas planteadas (Figura 5) se ve el comportamiento resistivo de la zona no saturada (ZNS), el acuífero con resistividades intermedias (10-100 Ohm m) por encima de una capa conductiva, debido a la presencia de agua de elevada salinidad

Un comportamiento anómalo se observa en el sector oriental de las tres secciones. Este sector presenta resistividades intermedias entre el acuífero de agua dulce y el agua salina. Esto podría atribuirse a una zona de mezcla entre agua con diferentes grados de salinidad (ZT). En la IRE 1 se observa entre las progresivas de 70 a 100m; en la IRE 3 por debajo de una capa conductiva en la progresiva de 100m y en la IRE 5 entre la progresiva de 80m hacia el final del perfil.

Figura 5: IRE Costeras. Mediante la escala logarítmica de valores es posible ver el contraste de resistividades entre la ZNS (resistiva), la presencia de agua dulce y la de mayor salinidad (conductiva) y una ZT, próxima a la costa.



### IRE Centrales

El siguiente grupo de IRE se realizó en el sector central de la localidad donde no se observan desniveles topográficos significativos (Figura 6).

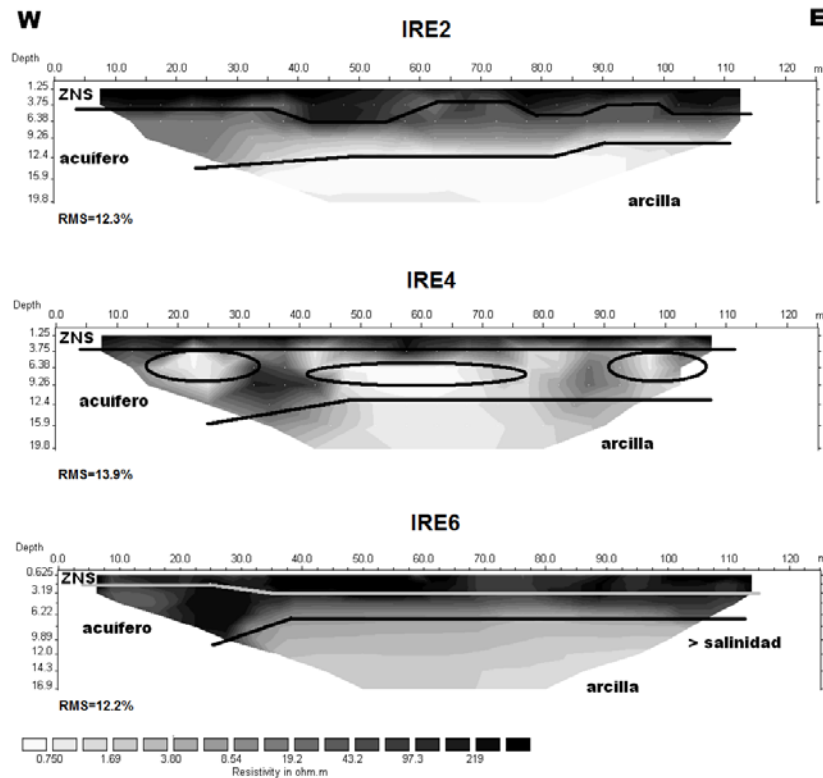


Figura 6: IRE Centrales. La escala de valores utilizada es logarítmica. Se observa una capa resistiva superior (ZNS), por debajo la zona acuifero (resistividades intermedias) y las capas más profundas (conductivas).

Puede observarse que presentan una ZNS de muy alta resistividad con un espesor máximo de 4m. Por debajo se caracteriza a la zona acuífera con valores de resistividad intermedia (10-100 Ohm m.), apoyada sobre una zona conductiva que se desarrolla desde los 9m hasta la profundidad máxima de exploración (aproximadamente 20 m).

En la IRE 4 se observa una disminución importante en el espesor de la capa acuífera e incluso presenta sectores de muy baja resistividad, que podrían interpretarse como intercalaciones arcillosas.

El sector más profundo de baja resistividad en la IRE 6, realizada próxima a la estación de bombeo de Cooperativa de Obras y Servicios (COS) presenta valores de resistividad relativamente superiores en relación a las secciones anteriores.

### IRE Occidentales.

La IRE 7 presenta valores muy resistivos superficialmente (ZNS), en contacto con una zona de valores muy bajos de resistividad, por lo que el espesor de la capa asignable al acuífero de agua dulce sería muy inferior a lo observado en la zona central y costera (ver Figura 7).

Entre las progresivas de 35 a 50 m se observa un sector con resistividades intermedias, hasta una profundidad de 10m, que podría estar indicando la presencia de un banco arenoso (crestas de playa), al igual que la anomalía entre las progresivas 80 y 100m.

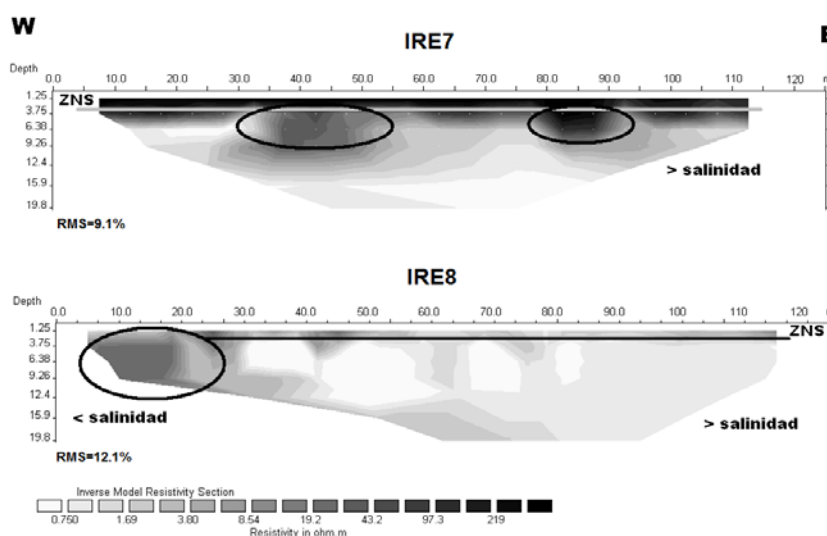


Figura 7: IRE Occidentales. Los valores están en escala logarítmica. La distribución de resistividades propuestas es más conductiva que en las zonas anteriores. En la IRE7 es posible inferir la presencia de bancos arenosos (mayor resistividad), al igual que hacia el inicio de la IRE8.

El perfil analizado con la IRE 8 atraviesa una zona baja caracterizada por la presencia de cangreales en los alrededores. La distribución de resistividades propuesta muestra en gran parte características conductivas (muy baja resistividad), en concordancia con las características de un acuífero de agua salobre. Sin embargo, desde el inicio del perfil hasta la progresiva de 40m las resistividades aumentan a valores intermedios hasta una profundidad de 10m. Este comportamiento podría deberse a la presencia de un banco de arena, donde puede albergarse agua de menor salinidad que en los alrededores.

## CONCLUSIONES

Las IRE permitieron la delimitación del acuífero de agua dulce (resistivas) en relación a las formaciones arcillosas subyacentes (conductivas).

El contraste eléctrico observado entre la zona no saturada (altas resistividades), acuífero de agua dulce (resistividades medias) y formaciones con arcilla y agua salina o salobre (resistividades muy bajas) hace que las IRE y la metodología planteada sean adecuadas para el monitoreo del sistema acuífero. Los espesores estimados están en correspondencia con los valores medidos en las perforaciones realizadas.

Se reconoce con precisión la presencia e interacción con el agua salina en el margen oriental asociado a la dinámica costera. En zona occidental permite detectar no sólo la relación con el agua salobre, sino también la presencia de bancos de arena que constituyen reservorios restringidos de agua dulce.

## REFERENCIAS

- Carretero S. y Kruse E.** 2009 Evaluación espacio-temporal de la calidad química del agua subterránea en el sector norte del Partido de la Costa, Provincia de Buenos Aires. XXII Congreso Nacional del Agua, Trelew, Chubut. Resumen pp 47. Trabajo completo en CD.
- Consejo Federal de Inversiones**, 1989. Evaluación del Recurso Hídrico Subterráneo de la Región Costera Atlántica de la Provincia de Buenos Aires Regiones I y II Punta Rasa-Punta Médanos. Provincia de Buenos Aires Informe Final. Tomo II. Geología y Geomorfología. 192 p.
- Consejo Federal de Inversiones**, 1990. Evaluación del Recurso Hídrico Subterráneo de la Región Costera Atlántica de la Provincia de Buenos Aires Región 1 Punta Rasa-Punta Médanos. Informe Final. Tomo I. Hidrología Subterránea. 177 p.
- González, N.** 2005. Los ambientes hidrogeológicos de la Provincia de Buenos Aires. En: R. de Barrio, R, Etcheverry, M, Caballé y E, Llambías (eds): Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata, Buenos Aires, pp. 359 – 374.
- Nassir, A.S.S., Loke, M.H., Lee, C.Y. and Nawawi, M.N.M.** 2000 Salt–water intrusion mapping by geoelectrical imaging surveys, Geophysical Prospecting, Vol. 48, pp. 647–661.
- Nowroozi, A. A., Horrocks, S. B and Henderson, P.** 1999. Saltwater intrusion into the freshwater aquifer in the eastern shore of Virginia: a reconnaissance electrical resistivity survey. Journal of Applied Geophysics, 42, pp. 1–22.
- Satriani, A.; Loperte, A.; Proto, M.** 2011. Electrical Resistivity Tomography for coastal salt water intrusion characterization along the Ionian coast of Basilicata region (Southern Italy) Fifteenth International Water Technology Conference, IWTC-15 2011, Alexandria, Egypt.