



Aplicación de Tomografía Eléctrica e identificación del Permafrost en la Isla Rey Jorge, Antártida

Abelenda, E.¹; Curbelo, A.¹; Arduin, F.¹, González, D.²; Sánchez Bettucci, L.³

(1) Dirección Nacional de Minería y Geología - MIEM
(2) Ingeniero de aplicaciones Guideline Geo AB
(3) Facultad de Ciencias - UdelaR

Resumen

OPEN ACCESS

Edited by:
PhD. Leda Sánchez Bettucci
DINAMIGE
Uruguay

Reviewed by:
Anónimo

Corresponding author:
Anahí Curbelo
acurbelo@fcien.edu.uy

Received: 21 Jun 2020

Accepted: 20 Jul 2020

Published: 31 Jul 2020

Citation:

Abelenda et al. (2020) Aplicación de Tomografía Eléctrica e identificación del Permafrost en la Isla Rey Jorge, Antártida. Revista Investigaciones, Montevideo, 3(1):14-26

Durante dos campañas de investigación realizadas en el verano del 2018 y 2019, se utilizó el método Tomografía Eléctrica para la evaluación de su potencial como método para estudiar la estructuración del subsuelo de la isla Rey Jorge, próximo al continente antártico. Los estudios se realizaron en los alrededores de la base científica uruguaya BCAA (Base Científica Antártica Artigas) obteniéndose perfiles 2D y 3D que muestran distintos niveles interpretados como capas de sedimentos y en algunos casos se observa un posible basamento técnico. El equipo utilizado fue el Terrameter LS de ABEM y las líneas de medida tuvieron longitudes desde 20 m a 200 m mientras que las tomografías 3D abarcaron áreas de hasta 77 m². Las profundidades alcanzadas fueron variables, alcanzando casi 30 m para las tomografías de mayor extensión, pudiendo identificarse diferentes características del subsuelo.

Introducción

La Isla Rey Jorge es la isla más grande del archipiélago Shetland del Sur ubicado en la península del continente Antártico. Sus dimensiones son de 95 km de largo por 25 km de ancho y su altura máxima alcanza los 705 m. En esta isla se encuentra instalada la Base Científica Antártica Artigas (BCAA), particularmente en la conocida Península Fildes, ubicada al Suroeste, en zona periglacial. Dentro del proyecto financiado por el Instituto Antártico Uruguayo (IAU) denominado “Propiedades físicas y características geológicas de la BCAA” se aplicó el método de tomografía eléctrica para el estudio del subsuelo sin generar daños físicos en el ambiente, particularmente con dos objetivos puntuales: evaluar la aplicación del método geofísico para el estudio de la estructura del subsuelo, identificar el nivel de permafrost y estructuras de tipo frágil en los márgenes del “Lago Uruguay” ubicado inmediatamente al Este de la base uruguaya.

Estos objetivos se enmarcaron bajo el concepto de que, en zonas meteorológicamente hostiles como la Antártida, con incluso actividad sísmica bastante recurrente, el conocimiento de las propiedades físicas del subsuelo es de gran relevancia a la hora de planificar obras de infraestructura. Desde el punto de vista de la estabilidad de las estructuras a construir, cabe mencionar, por ejemplo, que algunas bases Antárticas ya han sufrido algún tipo de “movilidad” debido a los procesos resultantes como son el “congelamiento” y “descongelamiento” del suelo. Por

otro lado, se ha identificado en el sustrato de los márgenes del Lago Uruguay la presencia de grietas. Este lago es la principal fuente de abastecimiento de agua para la base científica uruguaya. La identificación de estructuras de tipo frágiles presentes en sus márgenes podrían ser susceptibles a deslizamientos y provocar daños en las obras ingenieriles para el suministro del recurso.

La utilización de métodos geofísicos acompañado de mediciones de variaciones de temperatura en profundidad del suelo para el monitoreo e identificación del permafrost y la capa activa ha sido utilizada tanto en diferentes partes de la península antártica como en otras partes del mundo (Bockheim, 1995, Hilbich et al., 2009, Ramos et al., 2009, You et al., 2013).

En base a los objetivos planteados y la justificación de los mismos, se realizaron cuatro líneas de tomografía eléctrica, en tres arreglos tridimensionales para modelos de resistividad 3D, y cinco pozos denominados “DIN” de un metro y medio de profundidad (Figura 1) donde se colocaron los sensores de temperatura marca Hobo (Pendant® Temperature/Light 64K Data Logger), el que puede llegar a almacenar aproximadamente 52,000 mediciones de lecturas de 10 bits.

Geología y Geomorfología

El relieve es predominantemente suave con sectores más escarpados donde es posible apreciar afloramientos

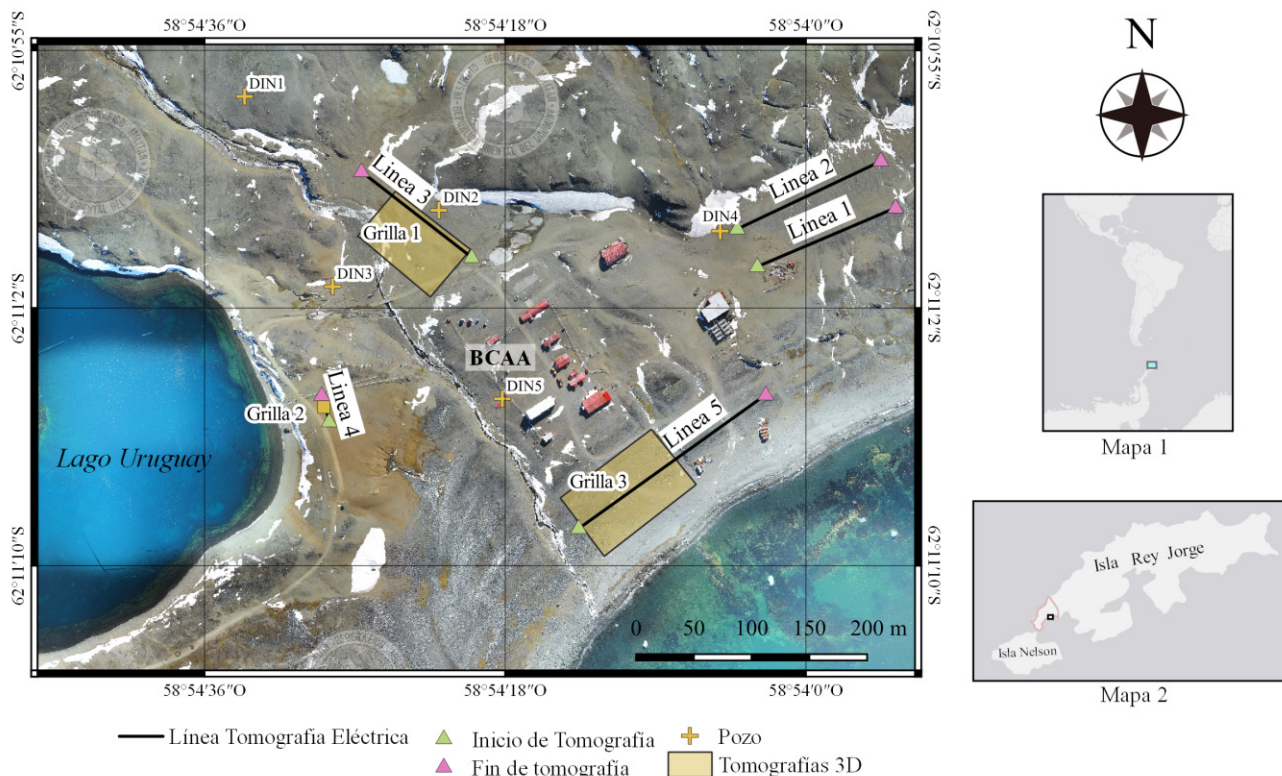


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio con la localización de las medidas realizadas con tomografía eléctrica y los pozos “DIN” que alcanzan 0,85 a 1 m de profundidad. En el “Mapa 1” se indica la ubicación de la Isla Rey Jorge y en el “Mapa 2” se señala la Península Fildes en contornos de color rosa y el área de estudio en recuadro negro (Fotografía proporcionada por el Instituto Geográfico Militar, 2019.)

rocosos intensamente meteorizados y fracturados. En la bahía ubicada al Sur en la [Figura 1](#) se encuentran antiguos cordones litorales abarcando un espacio de 230 a 235 m, considerando una línea perpendicular a la línea de costa. Esta zona está constituida, por la intercalación de cordones conglomerádicos y predominantemente arenosos.

La zona de estudio se encuentra limitada al Sur-Sureste por la Bahía Collins, al Oeste por el Lago Uruguay y al Norte y Noreste por el sistema de morrenas frontales del Glaciar Collins. El Lago Uruguay se encuentra en una de las zonas más altas del área de estudio. Este cuerpo de agua constituye un verdadero reservorio de información geocientífica.

Los altos topográficos están formados por afloramientos rocosos que sobre la costa generan importantes acantilados. Se observan en estas regiones procesos de gelifracción muy desarrollados. Las zonas bajas ([Figura 2](#)), relacionadas a cursos fluviales o cuerpos de agua, se encuentran cubiertas por coluviones y sedimentos actuales.

En cuanto a la geología de la región, [Barton \(1965\)](#) indicó que en la península son predominantes las litologías volcánicas -basaltos andesíticos- y aglomerados volcánicos tales como brechas y escombros volcánicos, además de la presencia de rocas sedimentarias como areniscas tobáceas y lodolitas. [Masquelin & Tabó \(1992\)](#) señalaron la presencia de sedimentos lacustres y brechas piroclásticas verdes en la zona de estudio.

Tomografía Eléctrica

La tomografía eléctrica es un método geofísico indirecto que genera información acerca de la distribución de la resistividad en el subsuelo, tanto en la lateral como en profundidad. Consiste en inyectar corriente eléctrica continua al subsuelo y medir las diferencias de potenciales generadas. Posteriormente se calcula la resistividad aparente y se procesa el resultado utilizando *software* específico en donde a través de métodos iterativos se alcanza un modelo final de resistividades sea bidimensional (perfil) o tridimensional (tipo bloque).

La técnica en sí misma consiste en la inserción de un conjunto de varillas de metal no polarizables (“electrodos”) al suelo a lo largo de una línea o formando una grilla. A estos electrodos se les conecta un cable de corriente el cual a su vez se conecta a la consola de comando y fuente de energía. A través de la consola, el usuario debe seleccionar una serie de parámetros iniciales tales como: distancia entre electrodos, corriente mínima y máxima, potencial mínimo y máximo y lo que se conoce como “dispositivo electródico” o “arreglo electródico”. Este último parámetro, establecerá cuáles van a ser los electrodos que inyectan corriente y cuáles realizan la medida de diferencia de potencial para cada instancia a lo largo de toda la adquisición de datos. Cada dispositivo presenta sus características, ventajas y desventajas frente al producto final obtenido ([Reynolds 2011](#)). Esto es debido a que, por ejemplo, cada uno presenta sensibilidades

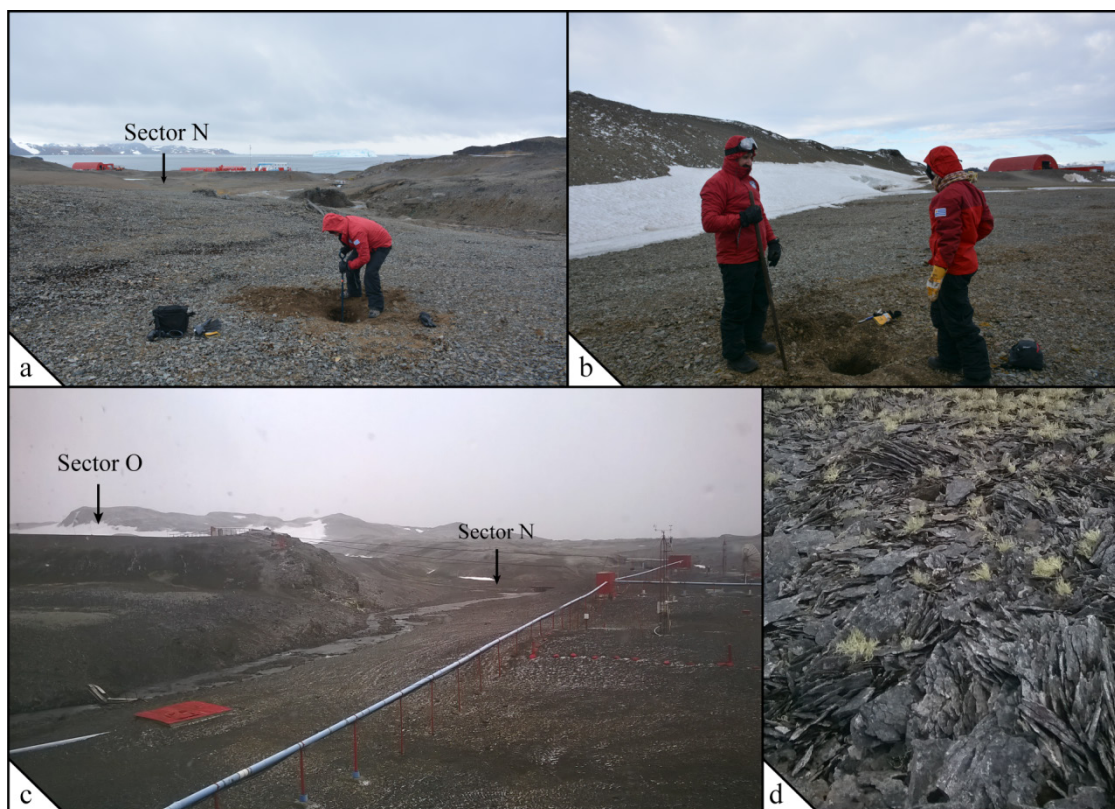


Figura 2. Imágenes de la expresión topográfica de la zona de estudio donde se observan relieves suaves correspondientes a los bajos ondulados y el desarrollo de planicies en los bajos (a,b,c). En (d) se muestra el efecto de la gelifracción en las rocas aflorantes en las zonas altas

Tabla 1. Características de los tendidos eléctricos.

Tendido eléctrico	Largo total o dimensiones	Distancia entre electrodos
Línea 1	140 m	1 m
Línea 2	140 m	1 m
Línea 3	120 m	2 m
Línea 4	20 m	0,5 m
Grilla 1	80x50 m	10 m
Grilla 2	4x2,5 m	0,5 m/0,5 m
Grilla 3	100x60 m	10 m

diferentes frente a las variaciones de resistividad de los materiales y al ruido de fondo, genera diferente densidad de puntos de medida y distribución espacial de las mismas. Esto implica que en función del objetivo final de la investigación es conveniente, o recomendable, usar determinados dispositivos frente a otros.

Metodología

Las tomografías fueron realizadas con el equipo Terrameter LS de ABEM, el cual tiene la capacidad de trabajar hasta con cuatro rollos de cable con capacidad de conectar 21 electrodos cada uno (ABEM 2012). Cada rollo presenta 200 m de largo por lo que podrían realizarse tendidos eléctricos de hasta 800 m y alcanzar una profundidad de hasta 153 m (según las especificaciones técnicas del equipo). Presenta preconfigurado los dispositivos electródicos de: *Wenner - α* , *Dipolo-Dipolo*, *Schlumberger* y *Gradient* aunque el usuario puede crear su propio dispositivo. Además, es posible trabajar en línea utilizando dos o cuatro rollos de cable de corriente, usar la técnica *roll-along* (Terrameter LS, 2012) o armar grillas para modelos tridimensionales en arreglos de 8x5 y 6x10 electrodos.

En el presente estudio se realizaron cuatro tomografías 2D mediante *Wenner - α* , *Dipolo-Dipolo* y *Gradient* mientras que las tomografías 3D se obtuvieron

usando este último. Las ubicaciones correspondientes se muestran en la Figura 1. Las tomografías 3D correspondientes a los sectores N y O fueron obtenidas siguiendo arreglos de 8x5 electrodos mientras que en el caso del Sector S fue de 6x10 (por mayores detalles de la configuración de los arreglos electródicos, ver Tabla 1, Figura 3).

La Línea 1 fue realizada en secciones continuas de 40 m de largo mientras que la Línea 2 se realizó siguiendo la técnica *roll-along*. Esta técnica se diferencia de aquella aplicada en la Línea 1 en que la adquisición de la medida se realiza de forma continua sin generar perfiles individuales. Los tendidos correspondientes a las líneas 3, 4 y 5 se realizaron de una única tirada alcanzando distancias de 120, 20 y 200 m.

Por otro lado, el procesamiento de las medidas y la generación de los modelos finales de resistividad se realizaron utilizando el software RES2DINV de Geotomo Software (Loke 2003). En cuanto a los modelos 3D, para la inversión de los datos se usó el programa RES3DINV y Voxler 3 para la modelización del cubo tridimensional. Dado que las variaciones topográficas en las zonas donde se instalaron los tendidos eléctricos no son significativas (Figura 4), estos datos no fueron incorporados a los modelos de inversión.

A efectos de clasificar las tomografías en función de su localización geográfica, se ordena al área en tres



Figura 3. Tomografía eléctrica. (a) Armado de línea para generar modelo 2D sobre cordones litorales de la bahía; (b) Armado de grilla para generar modelo 3D a los márgenes del Lago Uruguay.

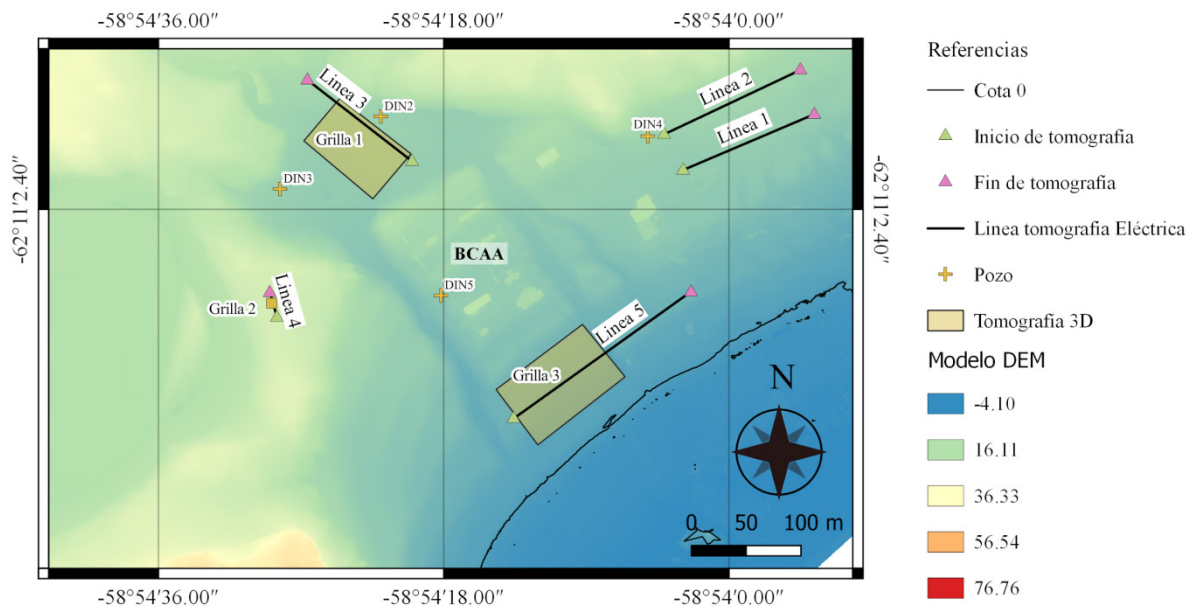


Figura 4. Modelo Digital del Terreno del área de estudio proporcionado por el Instituto Geográfico Militar. Los valores se encuentran en metros sobre el nivel del mar

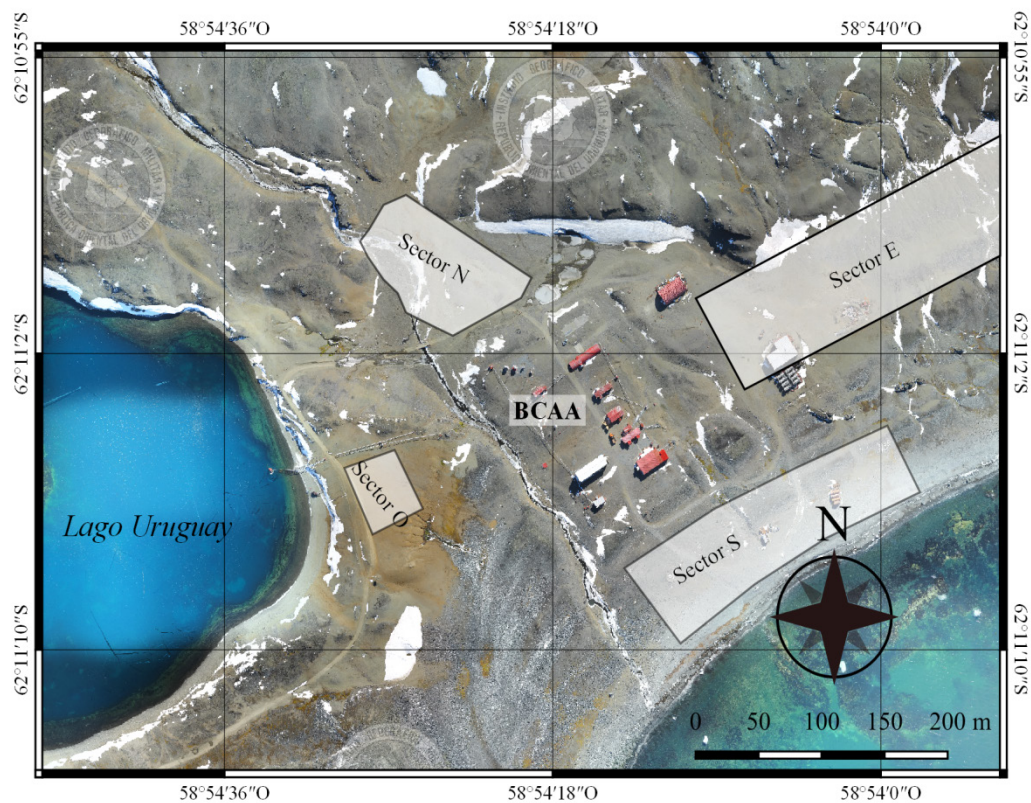


Figura 5. Ubicación de los tres sectores de trabajo: Sector O (Oeste), Sector N (Norte) y Sector Sur (Este). El mapa de base fue proporcionado por el Instituto Geográfico Militar.

Tabla 2. Datos de ubicación de pozos y descripción.

ID Pozo	Coordenadas	Elevación (m)	Largo del tubo/ Profundidad alcanzada (m)	Litología
DIN1	x= - 62°10'56,48575''	46,9	0,85	Primer nivel de conglomerados angulosos. Arena gruesa a fina con clastos inmersos de tamaño bloque tipo brecha. Entre los 70-80 cm, roca dura intensamente fracturada.
	y= - 58°54'33,60081''			
DIN2	x= - 62°10'59,66598''	34,035	1,00	Arena gruesa a fina y grava media. Zona húmeda aproximadamente a los 50 cm. Se llegó al agua a los 85 cm de profundidad.
	y= - 58°54'21,97031''			
DIN3	x= - 62°11'01,80063''	33,674	0,85	Primer nivel de sedimentos tamaño bloques. En profundidad, arena gruesa con algunos bloques. Se llegó al agua a los 75 cm de profundidad.
	y= - 58°54'28,33159''			
DIN4	x= - 62°11'00,24699''	34,513	0,85	Arena gruesa con bloques.
	y= - 58°54'05,12477''			
DIN5	x= - 62°11'04,93699''	31,773	0,85	Dominantemente bloques redondeados en los primeros niveles. Más en profundidad, bloques de 20 cm aprox. dentro de una matriz de arena gruesa a fina.
	y= - 58°54'18,16591''			

sectores, tal como se muestra en la [Figura 5](#).

Fueron realizados además cinco pozos de entre 0,85 m y 1 m cuyas descripciones se encuentran en la [Tabla 2](#) y sus ubicaciones se encuentran en la [Figura 1](#).

Resultados

Tomografías eléctricas

La mayor dificultad presentada fue la de generar buen estado de conexión entre los electrodos y el suelo. Esto, debido a la presencia en los niveles más superficiales de conglomerados de grandes dimensiones, por lo que fue necesario ir ajustando la colocación de los electrodos en el suelo y contar con disponibilidad de agua para mejorar la conductividad eléctrica. Fuera de eso, todas las tomografías

realizadas mostraron buenos resultados tanto en lo que refiere a buena calidad de la señal recibida como en las correlaciones entre los resultados que se pueden establecer entre ellas.

Sector E

En este sector se realizaron dos líneas paralelas, a su vez paralelas a la costa (Línea 1 y Línea 2, ver [Figura 1](#)).

En la Línea 1, se identifica un nivel superior de altas resistividades (>4000 Ωm) cuya base se encuentra a los 3,15 m de profundidad. Esta electrofacie presenta un espesor variable, alcanzando los 3,7 m de profundidad en algunos sectores. Dentro de este nivel de altas resistividades se observan anomalías locales con valores superiores a 10000 Ωm. Se puede observar, además, que hasta los primeros 60 m ([Figura 6a, b](#)) se identifican

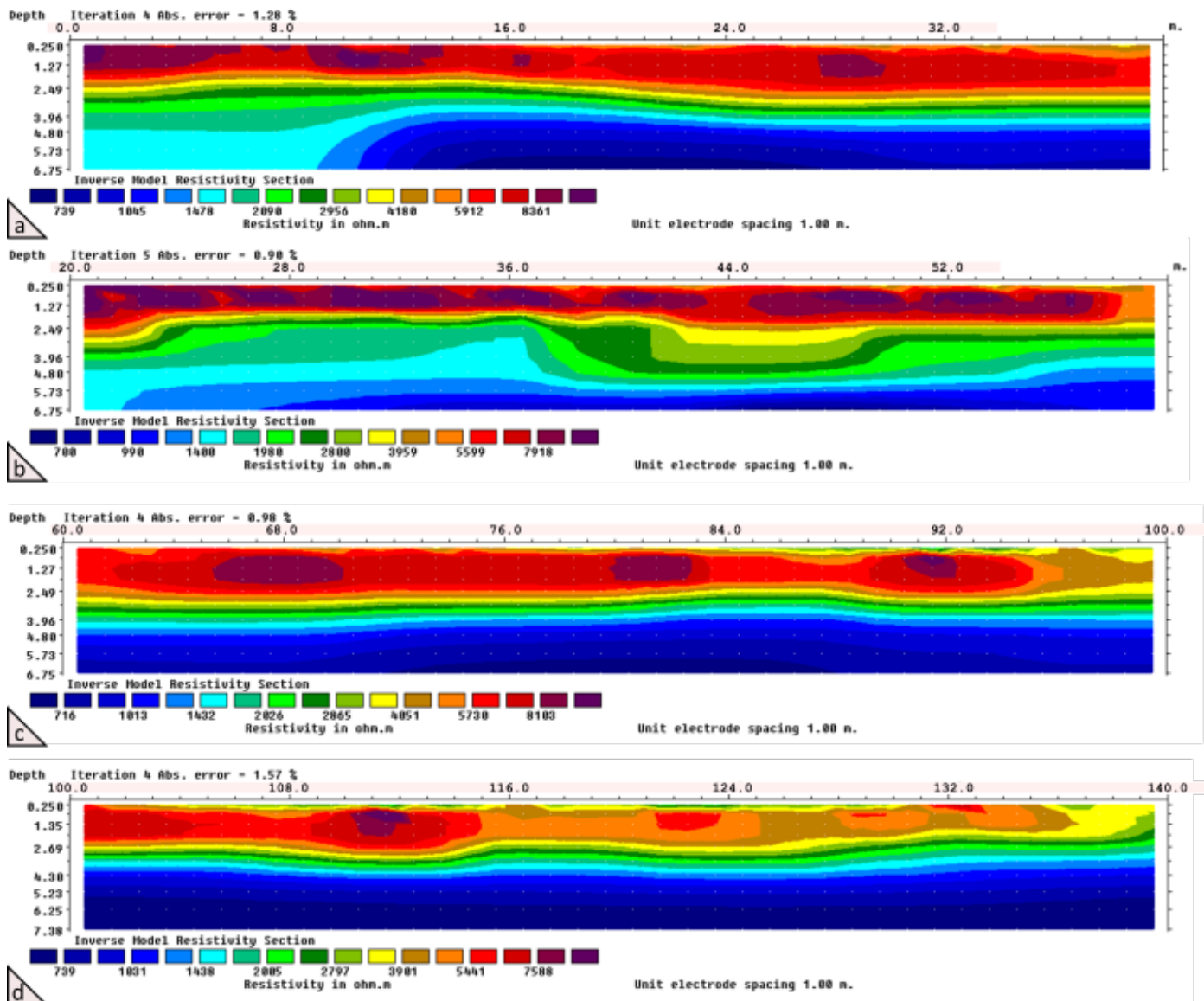


Figura 6. Tomografía eléctrica correspondiente a la Línea 1. Cada perfil es una sección de 40 m de longitud. Se utilizaron los métodos de *Wenner* excepto en (b) donde se muestran los resultados según *Dipolo-Dipolo*.

rangos de resistividades entre 700 y 3000 Ωm por debajo de la región de mayores resistividades. A partir de los 60 m, hacia el final del tendido los valores son entre 700 y 1400 Ωm .

En el caso de la Línea 2 (Figura 7), los resultados muestran un nivel superficial, de 2,5 m de espesor, de altas resistividades con valores entre 5000 y 9000 Ωm y anomalías localizadas de mayores resistividades de más de 19000 Ωm en profundidades de hasta 4,80 m. Este nivel, se desarrolla mejor en los primeros 64 m. Hacia el Este, los valores superficiales disminuyen alcanzando con un promedio de 2800 Ωm . Por debajo, resistividades relativamente bajas, entre 500 y 1500 Ωm son dominantes.

Sector N

Dentro de esta zona, se realizó un perfil bidimensional (Línea 3, Figura 8) y un modelo tridimensional de resistividades (Figura 9). La tomografía 2D utilizando *Dipolo-Dipolo* reveló contrastes importantes de resistividades. Como se observa en la figura correspondiente, entre los 2,5 y 4 m de profundidad, se registran resistividades bajas (150 - 500 Ωm) y subyacentemente, un sector con resistividades de hasta 50000 Ωm . Hacia el Nor-Oeste, en contacto brusco con lo anterior se detectan resistividades de entre 600 y 1200 Ωm . Comparando con la tomografía 3D, los resultados son similares. Esta última sin embargo resalta el contraste de resistividades localizado hacia el Sureste pero no así el contraste hacia el Noroeste.

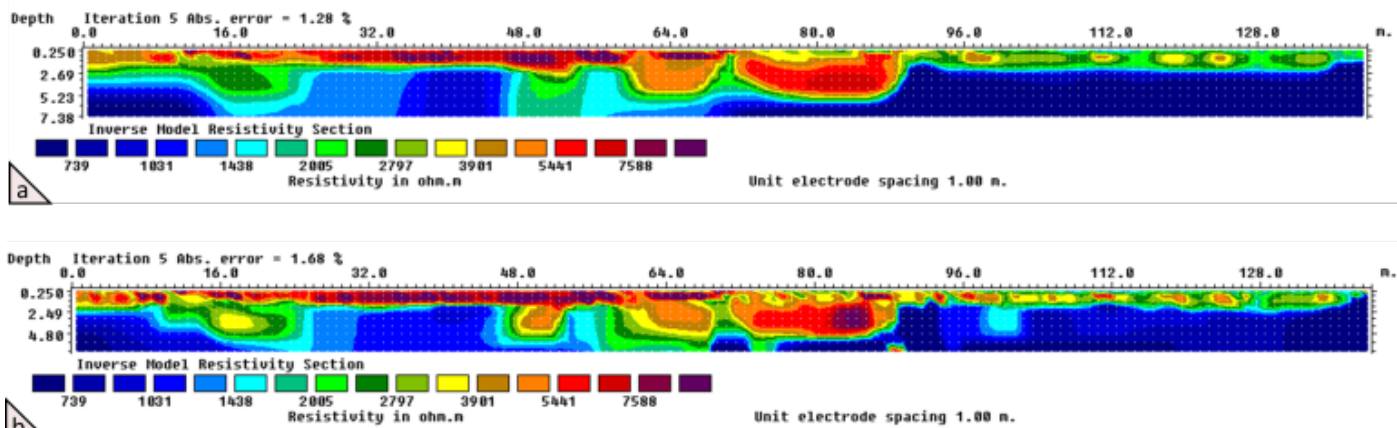


Figura 7. Tomografías eléctricas de la Línea 2 según: (a) Wenner; (b) Dipolo - Dipolo

Sector O

En el margen oriental del Lago Uruguay se identifican grietas en superficie con dimensiones próximas a los 10 cm de ancho y 10 de largo (Figura 10d). La distancia entre electrodos seleccionada entonces se redujo considerablemente respecto a las otras tomografías realizadas para alcanzar mayor resolución en superficie. Sin embargo, los resultados no permitieron identificar la estructura de forma clara. Esto puede deberse a alguna de las siguientes situaciones: por un lado, que la estructura sea de carácter superficial, pudiendo ser vista en planta y no presentar continuidad significativa en profundidad, que la corta distancia entre electrodos aún haya sido insuficiente para generar suficiente resolución o que el cambio de resistividades identificado a aproximadamente la mitad del tendido corresponda con la estructura en cuestión. En los resultados se distingue importante variación en las resistividades con mayores valores hacia el SO con una transición bastante marcada donde en los resultados generados con Gradient adopta una geometría más vertical; aunque se entiende que esta posibilidad sea la menos probable.

Sector S

Las tomografías 2D y 3D realizadas en este sector generaron resultados correlacionables (Figura 11). En estas tomografías se alcanzaron los valores más bajos de resistividad los cuales alcanzan las zonas más superficiales hacia el Este y abarcan mayor volumen en profundidad. En la tomografía 3D se obtuvo un error en el modelo final (RMS) del 3,3%, de los más altos de las medidas realizadas, posiblemente asociado a la pérdida de resolución en la señal medida en profundidad, donde se calcularon valores de resistividad negativos.

Análisis de la variación de temperatura del suelo

Los resultados a continuación corresponden al período de medición desde marzo del 2019 hasta marzo del 2020. En la Figura 12 se expone para cada uno de los cinco pozos las curvas de variación a diferentes profundidades. A partir de ello se observa que el comportamiento general parece responder a un ciclo de descenso y ascenso de las temperaturas donde los valores mayores a 0°C se concentran predominantemente desde diciembre hasta abril (cinco meses) e inferiores a 0 °C desde mayo hasta noviembre (siete meses). Es notoria la diferencia de comportamiento en la transición desde las temperaturas sobre cero a bajo cero al inicio del ciclo y la transición desde los valores sub-zero a sobre cero hacia noviembre. En el primer caso, denota una tendencia decreciente gradual pero irregular mientras que en el segundo es creciente abrupto, formándose un “escalón”. Dentro del período “sub-zero” sin embargo, son notorios diferentes subciclos de ascenso y descenso de temperatura. Aquél que más se destaca es el ciclo completo que tiene su inicio a mediados de mayo donde se observa una caída importante de temperatura y una recuperación hacia junio. Es en este período donde se alcanzan en todos los pozos los valores más bajos de temperatura (entre -5 y -7 °C). Otra observación es que la curva que corresponde al sensor ubicado a mayor profundidad es la más estable a lo largo del año, lo cual presenta sentido considerando la menor afectación de los cambios meteorológicos debido a la menor interacción con la superficie.

Cabe destacar que en la campaña de verano 2020 se realizaron ocho nuevos pozos con sensores de temperatura alrededor de la BCAA ampliando la densidad de medida. Estos datos serán recogidos y procesados después del verano 2021 comparándolos con los datos ya existentes.

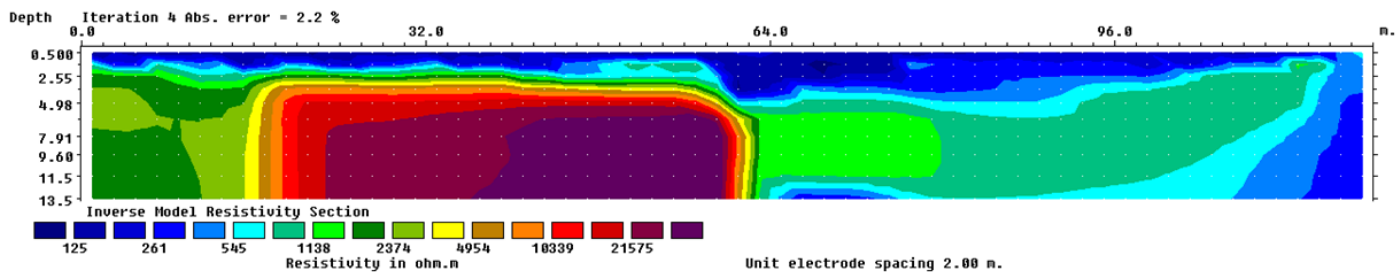


Figura 8. Tomografía 2D que corresponde a la Línea 3 con *Dipolo-Dipolo*.

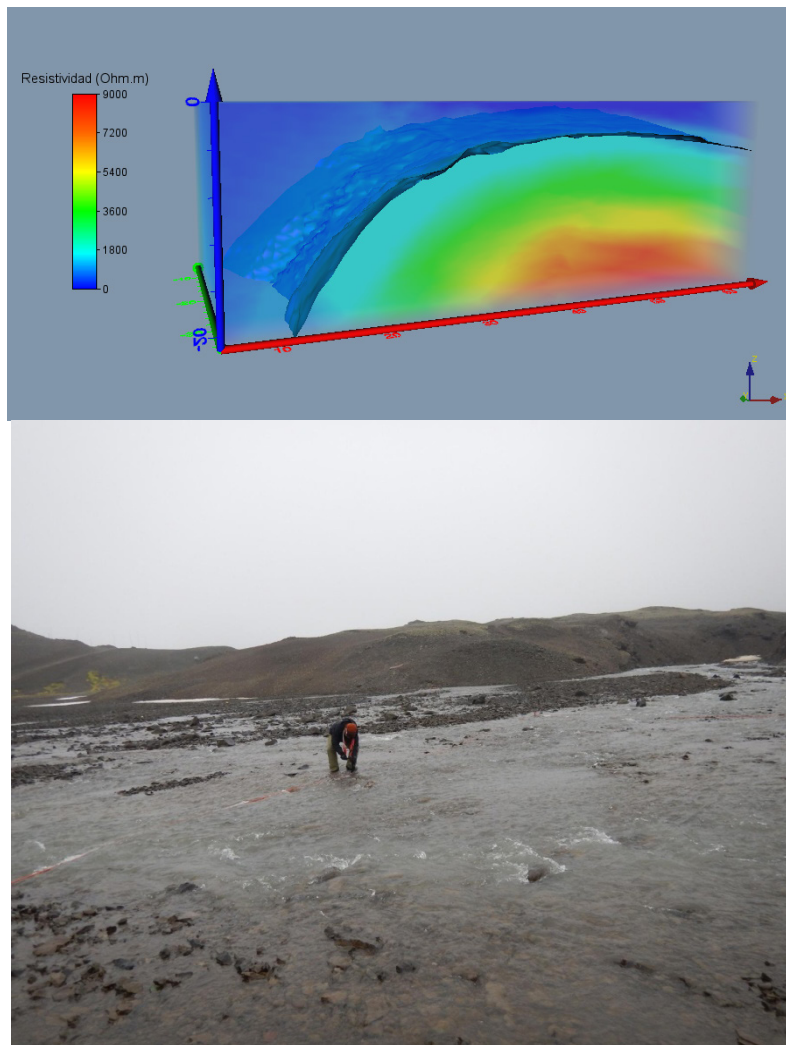


Figura 9. Tomografía 3D según Gradient (superior) que correspondería aproximadamente al área en recuadro negro discontinuo en Figura 9 e imagen de la zona (inferior)

Discusión

De los resultados obtenidos, se puede observar diferencias en la distribución de resistividades del subsuelo entre los tres sectores. Comparando el Sector E y el Sector N, el nivel más superficial es de altas resistividades y a más profundidad, este valor disminuye. De forma contraria ocurre en el Sector N evidenciado tanto en el perfil 2D como en el modelo 3D. Como primera observación, las

líneas de tomografía 1 y 2 fueron realizadas sobre los depósitos costeros que componen la costa de la bahía, mientras que, la Línea 3 y la tomografía 3D se realizaron sobre sedimentos aluviales. Las diferencias obtenidas entre los perfiles seguramente respondan a las diferencias en los procesos geológicos actuantes en las distintas partes del área estudiada. Así, esta inversión en la sucesión de electrofacies puede estar vinculada a que en el primer caso nos encontramos sobre un subsuelo compuesto por

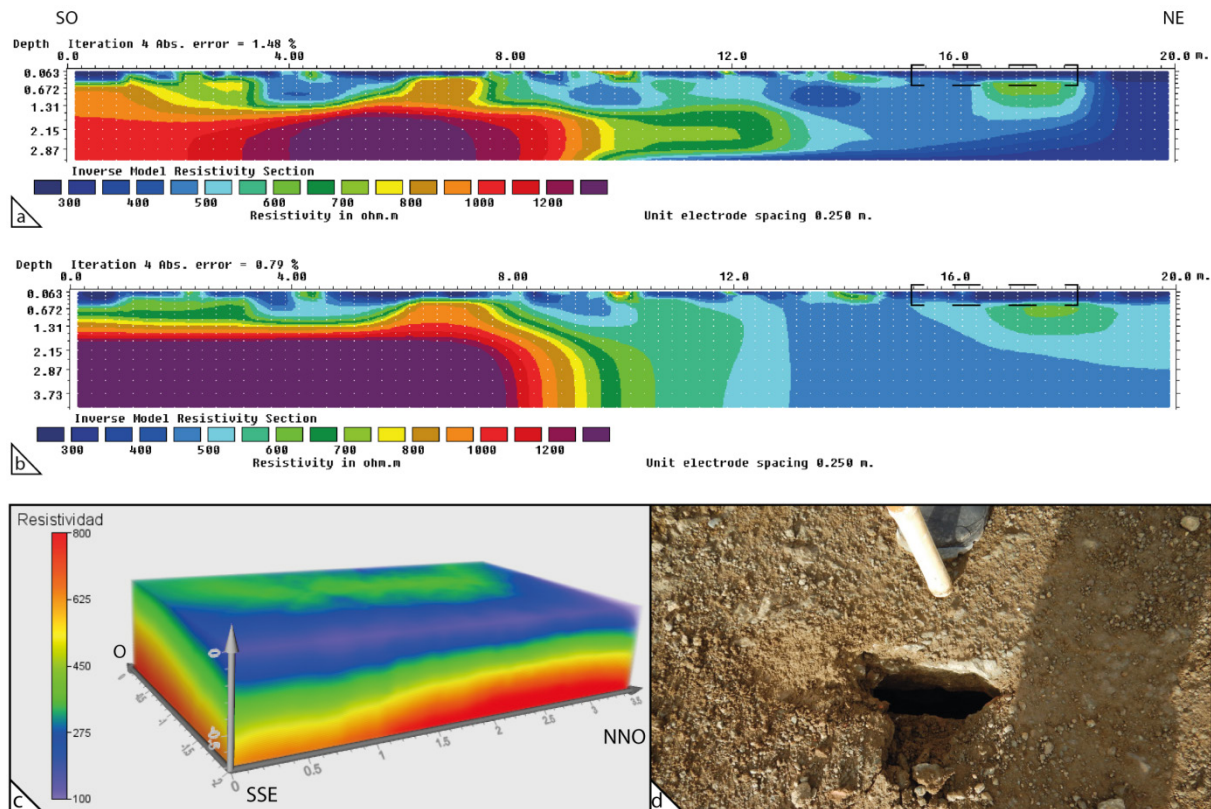


Figura 10. Tomografía 2D aplicando Dipolo-Dipolo (a) y Gradient (b). En (c), tomografía 3D abarcando aproximadamente la zona enmarcada en línea discontinua en (a) y (b). (d) Imagen de la grieta vista en campo.

sedimentos costeros y un primer nivel donde se identifican gravas de tamaño bloque. Por otro lado, el subsuelo del Sector N está constituido por sedimentos aluviales de arena gruesa a fina, grava media y en algunos casos ocurrencia de pequeños niveles superficiales de bloques donde el basamento volcánico podría estar presente a no mucha profundidad, identificándose en las tomografías con resistividades muy altas. Así también se identificó la zona húmeda a los 50 cm de profundidad en el pozo DIN2 y la napa freática a los 85 y 75 cm en los pozos DIN2 y DIN3 respectivamente.

En la zona de la bahía, resulta clara la incidencia del agua salada del océano en los sedimentos costeros bajando los valores de resistividad considerablemente. Observando la tomografía 3D, esta influencia presentaría una geometría de ensanchamiento en profundidad y acuñaamiento terreno adentro. Las zonas superficiales de mayor resistividad corresponden a las gravas de canto rodado que conforman la costa y en profundidad la presencia de basamento. Esto último se desprende de la observación en las imágenes aéreas obtenidas por el Instituto Geográfico Militar donde se identifica roca dura a poca profundidad bajo la superficie del cuerpo de agua marino. Esto indicaría que el espesor de los depósitos costeros que conforman la playa no es muy importante. Por otro lado, se destaca que a 6 msnm al Sur del sector E, se encuentra un afloramiento de un dique basáltico (Eguía et al., 2018) lo cual sugiere que el basamento se encuentra en esa región a aproximadamente esa cota topográfica.

Particularmente, en cuanto al resultado de la Línea 3, desplegada en dirección Noroeste/Sureste como se muestra en la Figura 1, el primer nivel superficial de baja resistividad podría deberse a los depósitos sedimentarios aluviales, de tamaños arena, los cuales se encuentran saturados en agua a partir de los 85 cm, como se puede ver en la descripción del pozo correspondiente. La anomalía de mayor resistividad, con máximo de 49000 Ωm , sería coincidente con la presencia del basamento volcánico aunque dado los altos valores de resistividad podría asociarse a la presencia de suelo congelado o permafrost, mientras que la zona ubicada en la porción subyacente Noroeste del perfil, de resistividades intermedias a bajas (600 – 1200 Ωm) podría deberse a sedimentos fluviales y/o de inundación.

En cuanto a la identificación del nivel de permafrost, este nivel de suelo, que se conoce como “suelo congelado”, se ha identificado en otras islas próximas a la Isla Rey Jorge que componen el archipiélago de Shetland del Sur (South Shetland Islands). Tal es el caso de la isla Livingston donde, por ejemplo, en el trabajo de Ramos & Viera (2003) estudian el comportamiento de la capa activa del suelo registrando los cambios de temperatura en suelo y aire. Este estudio señala que la capa activa se encuentra bastante superficial, a una profundidad de casi un metro. Es posible la identificación con tomografía eléctrica y sísmica de refracción este nivel a profundidades someras con valores de resistividades desde 7000 hasta 40000 Ωm (Hauck et al., 2007; You et al., 2013).

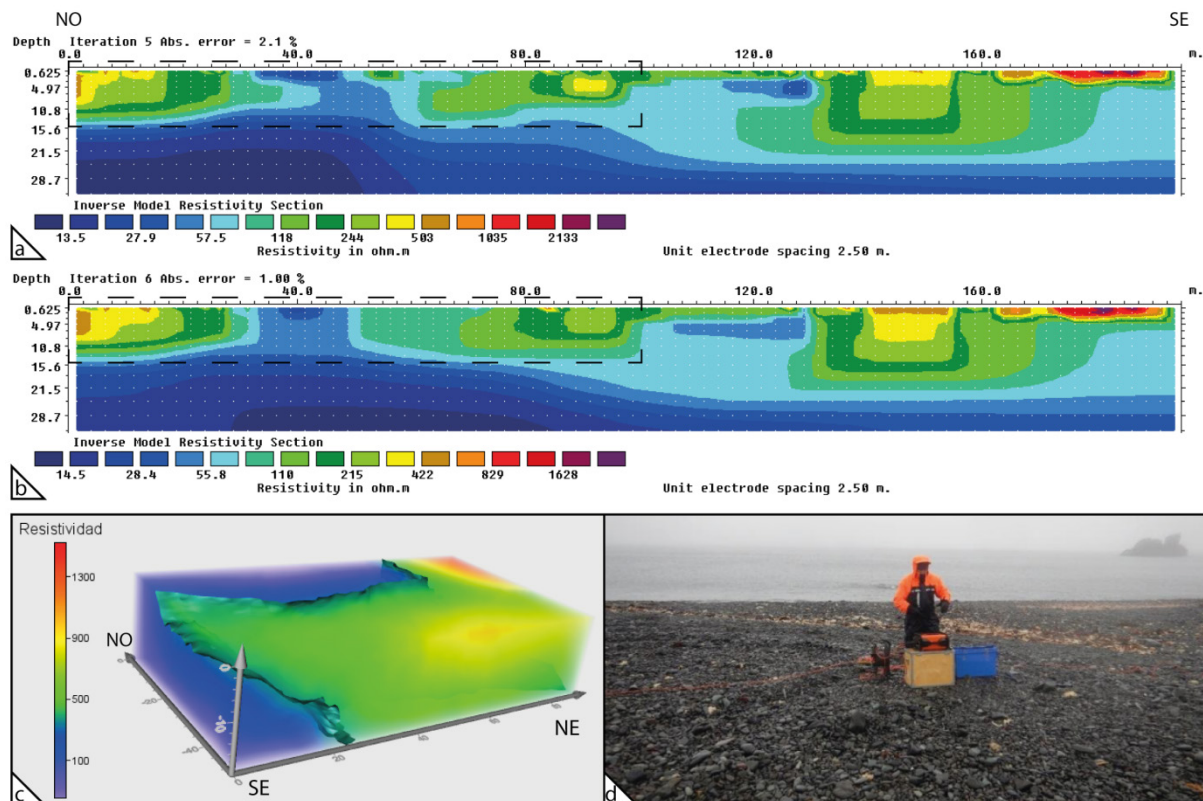


Figura 11. Tomografía 2D aplicando Dipolo-Dipolo (a) y Gradient (b). En (c), tomografía 3D abarcando aproximadamente la zona enmarcada en línea discontinua en (a) y (b). (d) Imagen de la grieta vista en campo.

En el presente trabajo se entiende, en principio, que el nivel de permafrost no estaría presente en el Sector E debido a que los mayores valores de resistividad se encuentran a nivel superficial, sin embargo, los datos de temperatura del pozo más cercano, DIN4, no indican valores menores a 0 °C constantes a lo largo del año. La respuesta en tomografía eléctrica más significativa es aquella de altísimos valores de resistividad generada en el Sector N con su techo a los 2,5 m de profundidad (fuera del alcance de los pozos) sin embargo, como se menciona anteriormente también podría ser coincidente con la presencia del basamento volcánico. Así también, los resultados mostrados en este trabajo son válidos para la época del año en el que fue realizado el estudio. Los valores bajos de resistividad en las líneas 1 y 2 pueden estar asociados a presencia de agua de lluvia o de deshielo del glaciar, por lo que es necesario tener en cuenta la posibilidad de generación de hielo intersticial durante el invierno. En este sentido, si observamos las curvas de variación de temperatura anual para el año 2019, los valores de temperatura ≤ 0 °C se registran en el primer metro de profundidad desde marzo a noviembre por lo que en esta época seguramente el agua intersticial o filtrada se congele. Para profundidades mayores, la presión de confinamiento juega un rol fundamental en el congelamiento del agua ya que, a más presión, son necesarias temperaturas más bajas. En la época de realización de las tomografías eléctricas, para el primer metro de profundidad, los valores rondaban los 0 – 4 °C.

En cuanto a las fracturas en el sustrato del Lago Uruguay, no pudieron ser identificadas mediante tomografía, posiblemente debido a que la distancia entre electrodos no generó la suficiente resolución o que la continuidad de estas estructuras en profundidad es escasa.

Conclusiones

La tomografía eléctrica permitió identificar diferentes condiciones geológicas en el área de estudio. Aquellas medidas que se realizaron próximas entre sí mostraron resultados semejantes validando el método aplicado. En base a las descripciones de campo y de perfiles de pozos se entiende que aquello que reflejan los resultados de las tomografías corresponde a los diferentes procesos de sedimentación, granulometría y circulación de agua tanto fluvial o pluvial como de deshielo glacial e intrusión salina. Particularmente en el Sector S se identifica la influencia del agua de mar, incrementando la conductividad del medio. Las zonas de mayor resistividad en el Sector E se asocian a los niveles conglomerádicos de los cordones litorales. Sin embargo, es probable la presencia de hielo intersticial asociado a los núcleos de mayores resistividades. El nivel inmediato subyacente responde a sedimentos más arenosos y posiblemente con contenido de agua. En cuanto al Sector N, la anomalía de alta resistividad se entiende que corresponde a un bloque de basamento volcánico cubierto por sedimento fluvial y de inundación (los más

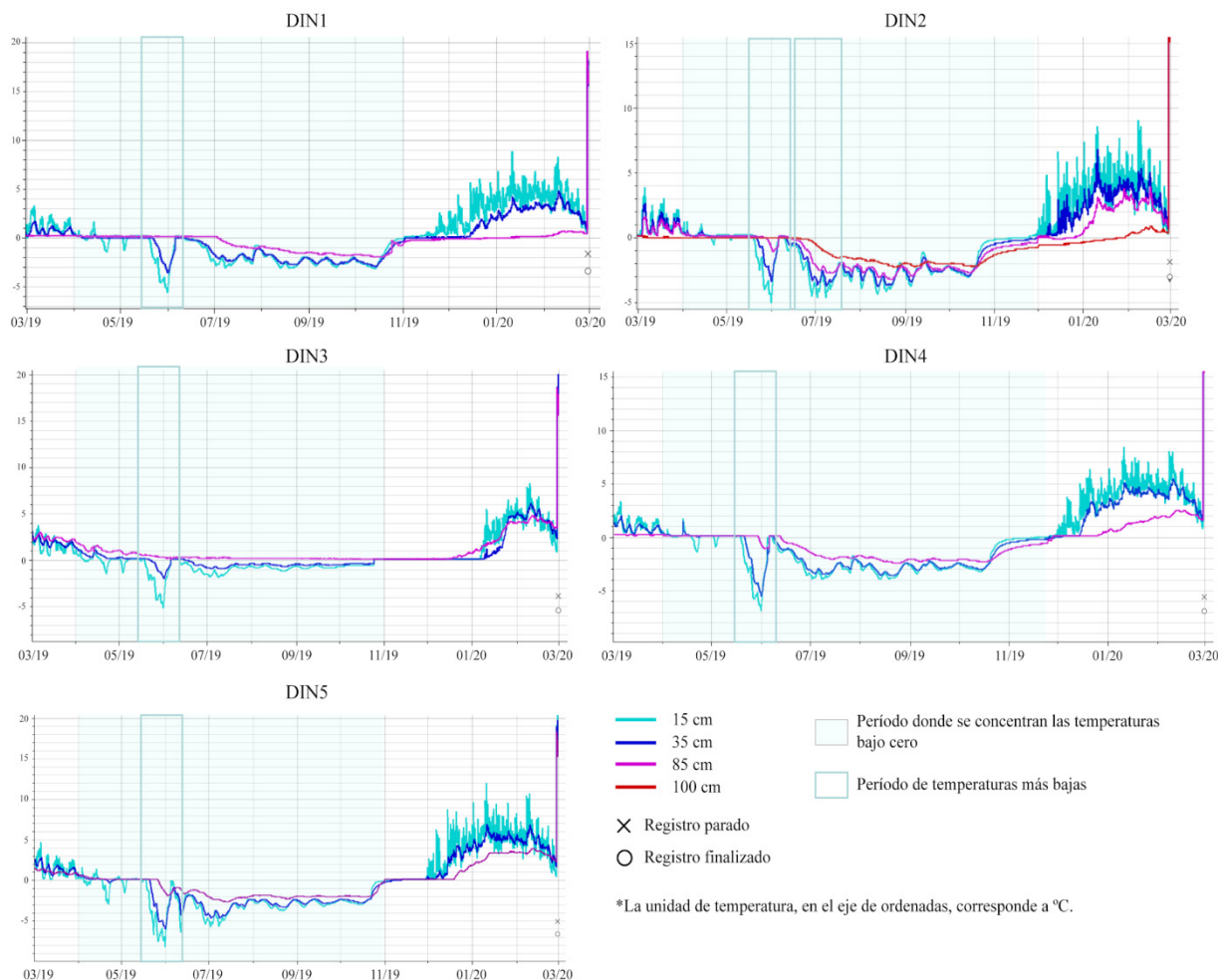


Figura 12. Curvas de temperaturas correspondientes al registro durante 2019 y primer trimestre del 2020 un año de los sensores instalados en los pozos DIN*. El pico de altas temperaturas registrado al final del registro corresponde con el momento de extracción del sensor

superficiales) aunque los valores altos de resistividad son comparables con aquellos obtenidos en otras regiones de las islas Shetland del Sur asociadas a la presencia de permafrost. Por otro lado, las medidas realizadas en los márgenes del Lago Uruguay no permitieron identificar la continuación en profundidad de grietas que sí fueron encontradas en superficie.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen al Instituto Antártico Uruguayo (IAU) por la confianza brindada. En particular a Álvaro Soutullo y a Eduardo Juri quienes estuvieron junto a nosotros guiándonos y aconsejándonos en los dos períodos de campaña en la isla antártica. Así también, agradecer a los integrantes de la dotación de la Base Científica Antártica Artigas quienes nos brindaron su apoyo logístico durante los dos períodos. Al Instituto Geográfico Militar quienes nos brindaron los datos topográficos y las imágenes aéreas captadas por VANT (vehículo aéreo no tripulado). Al director de la Dirección Nacional de Minería y Geología (DINAMIGE 2016-2020), Lic. Néstor Campal.

Un agradecimiento especial al equipo de investigación del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET), al Instituto Antártico Peruano con quienes se estableció la coordinación en la instalación y recolección de datos de los sensores de temperatura. Este trabajo se realizó en el marco del Proyecto de Investigación “Relevamientos y estudios geológicos y geofísicos en la Antártida” financiado por el Instituto Antártico Uruguayo (responsable: Dra. Leda Sánchez Bettucci; Equipo: Matías Eguía, Martín Rodríguez Kacevas, Damián Dell’Acqua, Anahí Curbelo, Hernán Castro Valle, Fiorella Arduin, Esteban Abelenda).

Referencias

- Abem, A. (2012). Terrameter LS Instruction Manual. ABEM Instrument Sundbyberg.
- Barton, C. M. (1965). The geology of the South Shetland Islands: III. The stratigraphy of King George Island (Vol. 44). British Antarctic Survey.
- Bockheim, J. G. (1995). Permafrost distribution in the

- southern circumpolar region and its relation to the environment: a review and recommendations for further research. *Permafrost and Periglacial Processes*, 6(1), 27-45.
- Eguía, M., DellAcqua, D., Saracho, A., Curbelo, A., Rodríguez, M., & Bettucci, L. S. (2019). Relevamiento Magnetométrico Terrestre en los alrededores de la Base Científica Antártica Artigas, Isla Rey Jorge. *Revista Investigaciones*, Montevideo, 1(2), 30-41.
- Hauck, C., Vieira, G., Gruber, S., Blanco, J., Ramos, M. (2007). Geophysical identification of permafrost in Livingston Island, maritime Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(F2).
- Hilbich, C., Marescot, L., Hauck, C., Loke, M. H., Mäusbacher, R. (2009). Applicability of electrical resistivity tomography monitoring to coarse blocky and ice-rich permafrost landforms. *Permafrost and Periglacial Processes*, 20(3), 269-284.
- Loke, M. H. (2003). *Rapid 2D Resistivity & IP Inversion using the least-squares method*. Geotomo Software. Manual.
- Masquelin, H., Tabó, F., 1992. Fenómenos de flujo diferencial en un filón ácido de la Formación Bahía Schneider en los alrededores de la Base Artigas, Isla Rey Jorge, Shetland del Sur. *Boletín de Actividades Científicas del Instituto Antártico Uruguayo*, 4: 33-46, 7 fig., 3 pl., Montevideo. ISSN 0797-2644.
- Ramos, M., Vieira, G. (2003, July). Active layer and permafrost monitoring in Livingston Island, Antarctic. First results from 2000 to 2001. In *Proceedings of the Eighth International Conference on Permafrost*, Lisse, Zurich (pp. 929-933).
- Ramos, M., Hasler, A., Vieira, G., Hauck, C., Gruber, S. (2009). Drilling and installation of boreholes for permafrost thermal monitoring on Livingston Island in the maritime Antarctic. *Permafrost and Periglacial Processes*, 20(1), 57-64.
- Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons.
- Terrameter, L. S. (2012). *Instruction Manual*.
- Ugalde, R., Benvenuto, A., García, G., Samaniego, L., Fernández, M., Piñeiro, V. (2017). Geomorfología del margen occidental del Domo Bellingshausen (Glaciar Collins), Isla Rey Jorge, Shetland del Sur. *Actas IX Congreso Latinoamericano de Ciencia Antártica*. Punta Arenas, Chile. I: 878-881.
- You, Y., Yu, Q., Pan, X., Wang, X., Guo, L. (2013). Application of electrical resistivity tomography in investigating depth of permafrost base and permafrost structure in Tibetan Plateau. *Cold Regions Science and Technology*, 87, 19-26.