

DESARROLLO DE UN EQUIPO PARA LA DETECCIÓN RÁPIDA DE ANOMALÍAS ELÉCTRICAS SUPERFICIALES EN REGIONES EXTENSAS Y SU APLICACIÓN PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SITIOS ARQUEOLÓGICOS

María Victoria Bongiovanni
Facultad de Ingeniería, Universidad Austral
Grupo de Geofísica Aplicada y Ambiental, UBA - CONICET

Matías de la Vega
Grupo de Geofísica Aplicada y Ambiental, UBA – CONICET

Resumen

En estudios de subsuelos muy resistivos el método geoelectrico de contacto galvánico no es eficaz debido a la dificultad para lograr un buen contacto y por lo tanto una buena circulación de corriente. Las diferencias de potencial generadas son muy pequeñas y se confunden con el nivel de ruido. En este trabajo se ha desarrollado una técnica para facilitar el contacto eléctrico en esos casos.

Con el fin de hacer más eficiente el contacto eléctrico, se diseñó y construyó un equipo de prospección geoelectrica de baja potencia cuyo sistema de acople con el suelo es por contacto capacitivo, de manera tal que se puede utilizar en medios altamente resistivos y no sólo sobre suelos, donde es posible enterrar los electrodos, sino también sobre asfalto o concreto. Se han estudiado el procesamiento y la interpretación de los datos obtenidos con este equipo. En particular se han estudiado las condiciones bajo las cuales el equipo puede operar de manera tal que los datos puedan ser analizados bajo los mismos esquemas de interpretación que geoelectrica de contacto galvánico.

Los estudios realizados en modelos a escala que simulan suelos de muy alta resistividad con el equipo desarrollado, concuerdan con los resultados de geoelectrica de contacto galvánico.

Palabras clave: método geoelectrico de contacto capacitivo, alta resistividad.

Abstract

In studies of highly resistive subsoils, geoelectric method of galvanic contact is not effective due to the difficulty to obtain a good contact and therefore a good current flow. The potential differences generated are very small, of similar magnitude to the noise level. The aim of this work is to develop a technique in order to facilitate the electric contact in such cases.

In order to do more efficient the electrical contact, we design and developed a low power geoelectric equipment with source of alternating current, with capacitive coupling which can be used in highly resistive mediums and also on hard surfaces like asphalt or concrete. We have studied the processing and interpretation of data obtained with this equipment. It was studied the conditions under which the equipment can operate similarly to geoelectric galvanic contact so that data can be interpreted under the same patterns of interpretation.

The studies made on scale models that simulate soils with very high resistivity media with the capacitive equipment, agree with the results of geoelectrics of galvanic contact.

Keywords: geoelectrical method of capacitive coupling, high resistivity.

Introducción

El método geoelectrico es uno de los métodos geofísicos de más frecuente aplicación para exploración subsuperficial. Uno de los motivos es la posibilidad de obtener tomografías eléctricas del subsuelo mediante el post-procesamiento de los datos adquiridos. Esto posibilita no sólo detectar anomalías sino también hallar sus dimensiones, su localización y su valor de resistividad. Otro aspecto del método es su carácter no invasivo, motivo por el cual es utilizado, junto con otros métodos, para la investigación arqueológica, para estudios ambientales y de ingeniería. Comúnmente el método se utiliza con electrodos de material conductor que se introducen en el suelo; es decir, el contacto es galvánico. Una de las limitaciones de este tipo de contacto radica en la necesidad de clavar los electrodos en el suelo para realizar las mediciones. Esto es un problema a la hora de estudiar suelos rígidos. Otra limitación en la aplicación del método consiste en la dificultad de contacto en suelos altamente resistivos. La circulación de corriente y la consecuente detección de diferencia de potencial, puede ser conseguida únicamente humedeciendo la superficie a prospectar con pequeñas canaletas de agua (Martino 2006), lo cual insume mucho tiempo. Una solución posible a este

problema, es utilizar un sistema de electrodos de contacto capacitivo, donde el acople con el suelo es por contacto entre superficies. Este tipo de acople también posee la ventaja de ser apto para el estudio de suelos rígidos, ya que no hay que clavar electrodos en el subsuelo. Para que circule corriente por medio de los capacitores, la corriente debe ser alterna, por lo que la medición debe incluir no sólo la magnitud sino también el desfase entre la corriente de entrada y la diferencia de potencial de salida. Este método resulta alternativo a los métodos de radar y de inducción electromagnética (EMI) en cuanto a la rapidez en las mediciones y complementario ya que permite una caracterización no solo cualitativa sino también cuantitativa. Los equipos comerciales que se han desarrollado hasta el presente (Ohmmapper, Corim) no tienen en cuenta las diferencias de fase. En algunos casos ésta es una severa restricción. Si bien Kurus (2006) ha desarrollado un equipo de contacto capacitivo de frecuencia fija capaz de medir la impedancia de transferencia compleja, no se ha desarrollado hasta el momento el proceso de inversión de los datos correspondiente. Sin embargo, si se logran condiciones bajo las cuales la impedancia de transferencia resulta ser resistiva pura, los datos pueden ser analizados bajo los mismos esquemas de interpretación que geoeléctrica de contacto galvánico. Para cada medio en particular, hay una frecuencia para la cual el sistema se comporta como resistivo puro. En el presente trabajo se ha desarrollado un equipo con la posibilidad no solo de medir el desfase sino de variar la frecuencia con el fin de posibilitar el uso de las técnicas de interpretación usuales.

Contacto Capacitivo (GCC)

En el caso de Geoeléctrica de Contacto Galvánico (GCG) la resistividad se deduce de campos electrostáticos o de muy baja frecuencia producidos por corriente continua. Para que esta fluya, es necesario un contacto galvánico entre el suelo y los electrodos. A altas frecuencias, como las que se utilizan en GPR, el acople es electromagnético, por medio de la propagación de ondas. La técnica GCC opera en frecuencias intermedias, en un régimen cuasi-estático que permite el acoplamiento capacitivo entre los sensores y la tierra. GCC cumple con las siguientes condiciones de funcionamiento:

- Cuando se aplica un potencial a una placa conductora separada una distancia del suelo, se induce una carga eléctrica en la superficie del mismo, generando a su vez un campo eléctrico. Si el potencial es oscilante y está unido a otra placa conductora cercana, es posible generar una corriente alterna en la tierra.
- Al igual que en GCG, se mide la diferencia de potencial producida por los electrodos de corriente, por medio de otro par de electrodos capacitivos alejados una cierta distancia, dependiendo de la configuración elegida.
- Para estudiar este modelo, se considera a los electrodos capacitivos como puntuales, tal como en GCG. La realización práctica de un electrodo capacitivo puntual es una placa conductora separada de la superficie por medio de otra capa aislante, cuyas dimensiones son pequeñas comparadas con la distancia entre los centros de los electrodos. Si bien la descripción no está limitada a un diseño particular de electrodos, las distancias entre electrodos están sujetas a la condición anterior.
- Si la frecuencia es suficientemente baja, este potencial oscilante se comporta en forma cuasi-estática, i.e., cuando la máxima dimensión característica utilizada es muy pequeña frente a la longitud de onda de los campos emitidos (Benderitter y otros, 1994). En este caso, los efectos inductivos son despreciables. Esta condición impone una frecuencia máxima a partir de la cual los efectos inductivos dejan de ser despreciables. Con las dimensiones y resistividades típicas utilizadas en este caso, la frecuencia máxima estimada es de 2500 kHz.
- Se emplean frecuencias intermedias, en el orden de los 10 kHz. Si se emplean frecuencias demasiado bajas, la resistencia capacitiva impide la circulación de corriente. Para obtener una corriente alterna de aproximadamente 1 mA de amplitud, la frecuencia mínima debe ser de 4.6 kHz.
- Bajo condiciones cuasiestáticas y en la región que corresponde a un régimen conductivo, las mediciones de resistividad del método GCC son equivalentes a las de GCG, con lo cual pueden usarse los mismos métodos de interpretación.

La impedancia de transferencia Z es la razón entre la diferencia de potencial $U(t) = U_0 e^{i\omega t} e^{i\varphi}$ entre los puntos M y N, donde φ es la diferencia de fase, y la corriente inyectada en el dipolo A-B, $I(t) = I_0 e^{i\omega t}$.

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{U_0 e^{i\varphi}}{I_0} = \frac{U_0 (\cos\varphi + i \sin\varphi)}{I_0} \quad (1)$$

Las magnitudes que son medidas en la práctica son \hat{V} , \hat{I} y ϕ , que pueden ser amplitudes o valores RMS, ambos del mismo tipo. Para posibilitar la interpretación de los datos tomados en el trabajo de campo, se debe resolver el problema inverso, es decir, a partir de los datos de la geometría del dispositivo y de la impedancia de transferencia medida, se deben poder deducir las propiedades eléctricas del subsuelo. Este proceso está ampliamente desarrollado para el caso GCG, donde la resistividad aparente es una relación lineal con el cociente $\Delta V/I$. Se puede notar de la expresión (1) que cuando ϕ es muy chico, la impedancia de transferencia es similar a la relación para el caso GCG.

Equipo de Medición para la Técnica GCC

Se ha diseñado y construido un equipo para pruebas a escala de frecuencia variable entre 5 y 20 kHz y la tensión de salida está en el rango de 10 a 70 V. El mismo dispositivo a su vez, toma y almacena los datos para su posterior análisis. Los electrodos son placas de cobre de 3x3 cm con un acrílico dieléctrico de 1 mm de espesor.

Como dieléctrico se utilizó un adhesivo de acrílico de fácil aplicación sobre la superficie de los electrodos de metal de permitividad relativa 4. Los electrodos están directamente apoyados sobre la superficie. Debido a las irregularidades de la misma, en promedio se estimó que la distancia electrodo-suelo es de 1 mm. Para obtener una cantidad de mediciones razonables dentro de la longitud de la cubeta utilizada, el tamaño de electrodos de 3 cm era adecuado, si se considera que deben estar suficientemente separados como para que valga la aproximación de electrodo puntual. Se estimó que una separación interelectródica de 4 veces el lado era adecuada. En la Figura 1 se muestra un esquema del dispositivo experimental desarrollado.

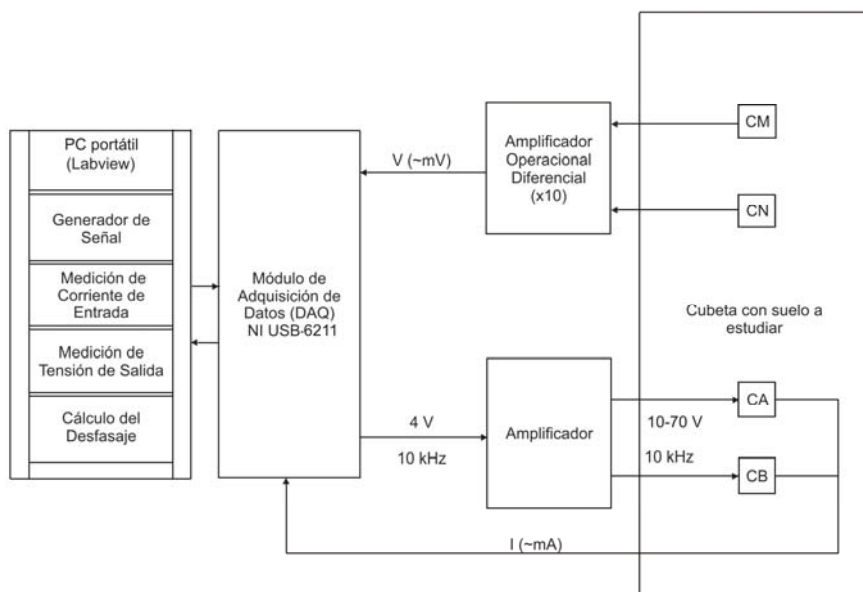


Figura 1: Esquema del dispositivo experimental.

Se generó una señal de 4 V y con un rango de frecuencias de 5 a 20 kHz mediante un módulo de adquisición de datos (DAQ). Esta señal se elevó a un rango de 10 a 70 V mediante un amplificador, y transmitida a los electrodos de corriente. Para medir la diferencia de potencial entre los electrodos receptores, se conectaron a un amplificador diferencial operacional. Éste aumenta 10 veces la señal al llegar al DAQ, y para poder visualizar la señal con su valor real, mediante la programación del software se filtró la misma para aislarla del ruido y se la disminuyó 10 veces. El mismo software se programó para calcular la diferencia de fase y la impedancia de transferencia, es decir, la tensión de salida sobre la corriente de entrada. Luego se exportaron los datos para su posterior análisis en una planilla de cálculo.

Estudio del Funcionamiento del Equipo Desarrollado. Se han realizado una serie de pruebas con el equipo de contacto capacitivo para su puesta a punto, incluyendo el estudio de los límites de funcionamiento del mismo y la posibilidad de trabajar en condiciones tales que se puedan invertir los datos como en geoelectrica de contacto galvánico. A continuación se muestran los resultados obtenidos al utilizar el equipo en un experimento controlado a escala, con el fin de evaluar su desempeño. Se rellenó con arena seca una cubeta de

1.50 x 0.78 m² de superficie, y de 27 cm de profundidad. Se realizaron mediciones con los métodos GCC y GCG, a fin de verificar el funcionamiento del equipo. Se tomaron aproximadamente 20 mediciones en cada experiencia y se calculó el cociente entre la desviación estándar y el promedio estadístico. En casi todos los casos este cociente fue menor a 0.1. Para poder comparar las dos técnicas, fue necesario trabajar en la frecuencia tal que el desfase fuera cercano a cero de modo que la expresión para la resistividad aparente fuera análoga en ambos métodos. De este modo, para analizar los datos de GCC fue posible utilizar los mismos programas de inversión usados en GCG (Loke, 1996). Se colocó un conjunto de ladrillos húmedos a fin de evaluar el funcionamiento del equipo en condiciones de estructuras enterradas a profundidades someras en un medio de alta resistividad. Esto es, a 6 cm de profundidad, de 7 cm de ancho y 7 cm de altura.

Método GCC con la configuración Dipolo-Dipolo. Se utilizó la configuración Dipolo-Dipolo con una abertura eléctrica de 10 cm y $n = 6$, empleando los electrodos de 3 cm de lado.

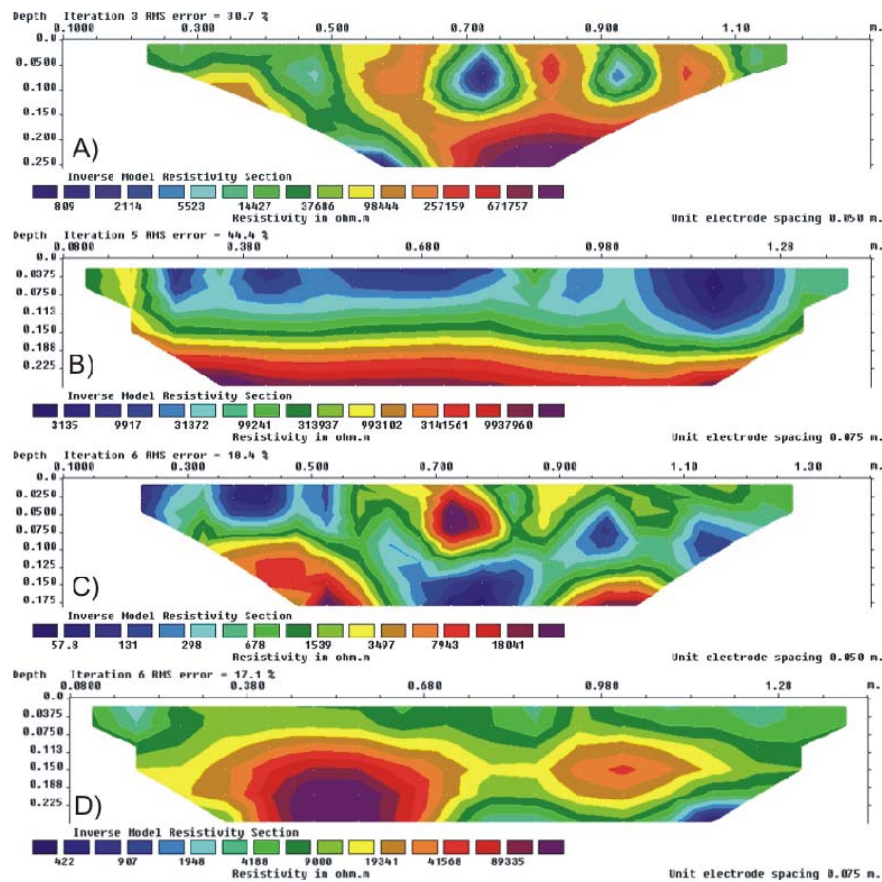


Figura 2: Modelo de resistividad obtenido A) con el método GCC Dipolo-Dipolo, B) con el método GCC Ecuatorial, C) con el método GCG Dipolo-Dipolo y D) con el método GCG Ecuatorial.

Se realizó un barrido de frecuencias para hallar la que producía el menor desfase entre la corriente de entrada y la tensión en los receptores. La frecuencia utilizada fue de 20 kHz.

Los ángulos de desfase en la mayor parte de los casos no superaban los 20°. En la Figura 2 A) se puede observar el modelo de resistividad obtenido con un error del 30.7 %. Se puede ver claramente una anomalía alrededor de los 75 cm, a una profundidad de 5 cm, de 5 cm de altura y de 5 cm de ancho aproximadamente, que se corresponde con la posición del ladrillo enterrado. La anomalía es más conductora que los alrededores, cerca de los 1000 ohm.m. Cerca de los 90 cm se ve otra anomalía que se asocia con arena húmeda que se encontró en la zona.

Método GCC con la configuración Ecuatorial. Se realizó una segunda prospección pero con el método dipolo ecuatorial, con una distancia A-B de 15 cm y un $n = 4$. En la Figura 2 B) se muestran los resultados obtenidos. La convergencia se logró con un error de 44.1 %. Cerca de los 83 cm se ve una anomalía de mayor resistividad que el medio circundante. Esta configuración no llegó a detectar de manera adecuada el ladrillo enterrado.

Método GCG con la configuración Dipolo-Dipolo. Con las mismas condiciones descritas anteriormente, se realizó una prospección con el método GCG a fin de comparar las mediciones con el método capacitivo. Se hicieron canaletas de agua para posibilitar la circulación de la corriente. En la Figura 2 C) se muestra la resistividad aparente, la calculada y el modelo de resistividad del subsuelo para el caso Dipolo-Dipolo. La convergencia se obtuvo con un error del 18.4 %. En la misma se puede ver la anomalía asociada con el ladrillo, cuyo valor de resistividad alrededor de 18000 ohm.m es en este caso mayor que el del medio circundante. Cabe consignar que esta medición fue realizada tres días después de la correspondiente con el método GCC. Durante esos tres días, la humedad inicial del ladrillo difundió alrededor del mismo, lo que trajo como consecuencia la detección del ladrillo como anomalía más resistiva que el entorno. Esto fue comprobado al inspeccionar directamente la zona.

Método GCC con la configuración Ecuatorial. En la Figura 2 D) se muestran los gráficos correspondientes a la configuración dipolo ecuatorial. A los 70 cm aproximadamente se ve una zona de resistividad cercana a 9000 ohm.m, de mayor resistividad que el entorno. En este caso, el método no resuelve bien la anomalía correspondiente al ladrillo, como en el caso Dipolo-Dipolo.

Discusión y Conclusiones

Si bien el ladrillo enterrado no pudo ser detectado con la configuración ecuatorial, este es un problema de la misma, y no del método, ya que sucedió lo mismo con las dos técnicas usadas, GCC y GCG. La configuración ecuatorial posee los electrodos de potencial enfrentados con los de corriente. Es por eso que la diferencia de potencial que mide es menor que en el caso Dipolo-Dipolo, donde los electrodos de potencial están en línea y alejándose de los de corriente. De este modo, este último arreglo es más sensible a las diferencias de potencial, por eso logra resolver mucho mejor las estructuras ubicadas en forma perpendicular a la línea de prospección, como en este caso.

Con respecto a la configuración Dipolo-Dipolo, los resultados obtenidos son acordes, ya que en ambos casos se ha detectado el ladrillo enterrado. Esto nos indica que estamos en condiciones de utilizar el equipo en suelos altamente resistivos y la configuración Dipolo-Dipolo es la más adecuada entre las dos estudiadas, si se espera detectar anomalías localizadas.

Los estudios realizados en modelos a escala que simulan suelos de muy alta resistividad con el equipo desarrollado, concuerdan con los resultados de geoelectrica de contacto galvánico. Un equipo con este tipo de contacto va a ser apto también para medios menos resistivos como tierra, o rígidos como asfalto o concreto.

Bajo ciertas condiciones se pueden utilizar los mismos métodos de interpretación que se utilizan en geoelectrica común y los resultados son aceptables, aunque el desfase entre la diferencia de potencial y la corriente sea distinto de cero. En caso que los desfases sean superiores a 20°, no se puede asegurar que los métodos de interpretación comunes arrojen resultados correctos. La importancia de poder medir el desfase reside en el hecho que es importante conocer éste, para saber si se está en condiciones de aplicar las técnicas de interpretación conocidas o no. Esto no se puede conocer a priori, con lo cual la aplicación de estas técnicas sin saber alrededor de qué valores de desfases están presentes en el sistema, podría conducir a interpretaciones erróneas. Además, la medida del desfase da lugar a la posibilidad de encontrar una frecuencia para la cual el sistema se comporte como resistivo puro. Para esto es necesario que el ancho de banda del equipo sea lo más amplio posible dentro del rango de frecuencias determinados por la aproximación cuasi-estática, para poder encontrar la frecuencia adecuada para cada medio.

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por CONICET, ANPCyT y por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Austral.

Referencias

- Benderitter, Y., Jolivet, A., Mounir, A. and Tabbagh, A., Application of the electrostatic quadripole to sounding in the hectometric depth range: *J. Appl. Geophys.*, 31, 1-6, 1994.
- Kuras, O., D. Beamish, P. I. Meldrum and R. D. Ogilvy, 2006. Fundamentals of the capacitive resistivity technique. *Geophysics*, 71(3): G135-G152.
- Martino, L., N. Bonomo, E. Lascano, A. Osella and N. Ratto, 2006. Electrical and GPR prospecting at Palo Blanco archaeological site, northwestern Argentina. *Geophysics*, 71(6): B193-B199.
- Loke, M. H. and R. D. Barker, 1996. RES2DInv, Programa distribuido por Geotomo, basado en Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophys. Prosp.*, 44: 499-523.