



RESPUESTA DE UN DIPOLO MAGNÉTICO VERTICAL ANTE LA PRESENCIA DE CARACTERÍSTICAS PALEOAMBIENTALES DE SITIOS PREHISPANICOS

^{1,2}Louis Pastor, ¹Christian Camerlynck, ¹Nicolas Florsch, ¹Eric Marmet, ¹Roger Guerin, ²Richard Vanhoeserlande, ³Alexis Mojica, ⁴Muriel Llubes, ⁵Ricardo Tascón, ⁶Rene Viel

¹Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, Francia, Département de Géophysique Appliquée, UMR 7619 Sisyphé.

²Université de Paris 7, Francia.

³Universidad de Panamá, Departamento de Física, CITEN e Instituto de Geociencias.

⁴Université de La Rochelle, Francia.

⁵Université de Reims, Francia.

⁶Asociación Copán, Honduras.

RESUMEN

La utilización de corrientes inducidas en el subsuelo ha constituido, hoy día, un punto muy importante en el desarrollo de instrumentos complejos, capaces de cuantificar el nivel de conducción de carga eléctrica a través de un determinado volumen de terreno. En este trabajo se analiza la respuesta, como señal física, de ciertos dispositivos electromagnéticos basados en el principio físico de inducción (dipolos magnéticos), ante la presencia de estructuras arqueológicas y ciertos elementos que formaron parte de los alrededores de uno de los centros político-religiosos más importantes de toda la civilización mesoamericana. Se presenta, como caso específico, la respuesta de un paleocanal obtenida en la zona oeste del Conjunto Principal de Copán – Ruinas, Honduras.

PALABRAS CLAVES

Análisis cartográfico, campo electromagnético, conductividad eléctrica, dipolo magnético, paleocanal, Slingram.

INTRODUCCIÓN

En el marco de un proyecto de investigación desarrollado por la Asociación Copán, en Honduras, en conjunto con las Universidades de París VI y 7 de Francia y la Universidad de Panamá, se han empleado nuevas herramientas geofísicas, aplicadas a la detección de características arqueológicas en los alrededores del complejo arqueológico de Copán, o también conocido como Conjunto Principal de Copán - Ruinas. Dichas herramientas han permitido el reconocimiento de la naturaleza del subsuelo, tanto a nivel superficial como también a profundidad.

Gracias a los avances tecnológicos de hoy día, en cuanto a la prospección geofísica se refiere, el registro de la data puede efectuarse de manera automática, en donde la misma es almacenada y trasladada a un ordenador bajo extensiones informáticas específicas. Estas características fueron analizadas para la detección de antiguos conductos naturales de agua o paleocanales, pero sin dejar de lado la importancia de algunos tópicos teóricos muy relevantes concernientes al método empleado en dicho análisis.

MARCO TEÓRICO

Los métodos electromagnéticos reagrupan una gran cantidad de instrumentos diferentes destinados a medir ciertos parámetros geofísicos, como lo son la conductividad eléctrica, la susceptibilidad magnética o la permitividad dieléctrica. En este trabajo nos hemos interesado en aplicar las características de los dipolos magnéticos verticales y su importancia en el estudio de la conductividad eléctrica del subsuelo.

Para entender la naturaleza de la respuesta de un dipolo magnético, es necesario considerar el esquema de la figura 1, el cual presenta dos bobinas localizadas sobre la superficie de un terreno uniforme y homogéneo. Una de ellas, la emisora \mathfrak{S}_x se encuentra alimentada por una corriente alterna, en el rango de las audio frecuencias, mientras que la segunda bobina \mathfrak{R}_x (receptora) se localiza a una distancia d de la emisora.

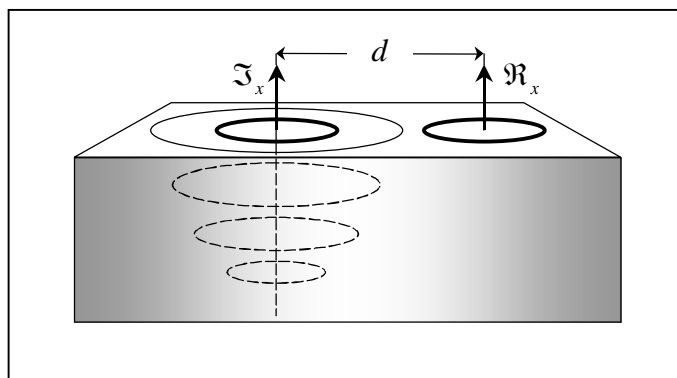


Fig. 1. Distribución de las bobinas emisora y receptora en un arreglo vertical sobre un terreno uniforme y homogéneo.

La circulación de una corriente alterna sobre la bobina emisora genera un campo magnético primario B_p , cuya variación temporal inducirá en el subsuelo corrientes de pequeñas intensidades. Estas a su vez generarán un campo magnético secundario B_s , el cual es detectado por la bobina receptora.

Generalmente, este campo magnético secundario es una función complicada de la separación d entre las bobinas, de la frecuencia y de la conductividad eléctrica del subsuelo (McNeill, 1980). Sobre el terreno, lo que normalmente se obtiene es la razón entre el campo magnético secundario y primario, de manera tal que es posible expresar dicho resultado en términos de la conductividad σ , es decir que:

$$\frac{B_s}{B_p} = 2 \left\{ 9 - \left[9 + 9\sqrt{i\omega\mu_0\sigma} d + 4i\omega\mu_0\sigma d^2 + \sqrt{(i\omega\mu_0\sigma)^3} d^3 \right] \frac{1}{e^{\sqrt{i\omega\mu_0\sigma} d}} \right\} \frac{1}{i\omega\mu_0\sigma d^2} \quad (1)$$

en donde el valor de ω está dado en términos de la frecuencia f ($\omega = 2\pi f$). La permeabilidad del espacio vacío está dada por μ_0 . La expresión (1) puede ser simplificada bajo ciertas condiciones, ya que es posible definir, además, un parámetro muy importante que caracteriza el semi-espacio homogéneo que se estudia, al mismo se le conoce con

el nombre de profundidad de piel (λ). Esta profundidad es la distancia (en dicho espacio homogéneo) que una onda plana recorre cuando su amplitud ha sido atenuada e^{-1} veces con respecto a la de la superficie. De acuerdo a McNeill, la profundidad de piel está dada en términos de:

$$\lambda = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\sigma}} \quad (2)$$

Y ahora, es posible definir una razón entre la distancia d de separación entre las bobinas y la profundidad de piel λ , la cual se conoce con el nombre de *número de inducción* β . Es decir que $\beta = d/\lambda$. Para un número de inducción pequeño, la expresión (1) puede reducirse a la forma:

$$\frac{B_s}{B_p} = i\omega\mu_0\sigma \frac{d^2}{4} \quad (3)$$

En realidad, el instrumento de prospección electromagnética puede ser capaz de medir la conductividad eléctrica del suelo, si se escogen valores bajos de la frecuencia de operación. De esta forma, es posible derivar una expresión de la conductividad eléctrica registrada por el dispositivo a partir de la ecuación (3):

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega\mu_0 d^2} \left| \frac{B_s}{B_p} \right|_{\substack{comp. \\ cuadratura}} \quad (4)$$

INSTRUMENTACIÓN

El sistema empleado en el análisis corresponde al dispositivo EM31, perteneciente a la familia Slingram (nombre sueco asignado a los dispositivos electromagnéticos que se basan en el principio físico de inducción). Este dispositivo posee una distancia d fija, de 3,66 m y funciona a una frecuencia de 9,8 kHz. La figura 2 muestra la disposición y uso del sistema en el terreno.



Fig. 2. Dispositivo EM31 de la familia Slingram.

Con el dispositivo EM31, es posible obtener información acerca de la naturaleza del subsuelo hasta una profundidad de exploración de 5 m (McNeill, 1980). Sin embargo, es necesario considerar que esta profundidad depende de las propiedades físicas del subsuelo. Las medidas pueden ser tomadas punto a punto, a lo largo de un perfil o varios perfiles, para efectos de mapeo, y gracias a la adaptación de un panel de almacenamiento automático sobre la estructura central, los datos de la conductividad eléctrica medidos en cada punto sobre la superficie de interés, pueden ser registrados y posteriormente trasladados de manera automática a un ordenador, en forma de archivo, con una extensión específica.

Los principales elementos que conforman este dispositivo (las espiras receptora y emisora) se encuentran localizados en los extremos del tubo blanco que se aprecia en la figura 2.

EL SITIO DE INTERES

En Honduras se encuentra uno de los vestigios arqueológicos más importante de toda la cultura mesoamericana, hacemos referencia al Conjunto Monumental de Copán, (localizado en el Valle de Copán), el cual ocupa un lugar trascendental en la historia de la civilización maya.

El origen de la civilización maya, que de acuerdo a los resultados de las investigaciones arqueológicas realizadas por (Murphy, 1999), fechada a partir de 2000 años a.C., se encuentra estrechamente relacionado con la llegada del hombre al Continente Americano por el estrecho de Bering. Existen hipótesis fuertemente apoyadas, según (De Blas et al, 2000), que establecen dos penetraciones de grupos humanos provenientes del continente asiático, la primera, realizada 40000 años a.C. y una posterior 12000 años a.C. Los resultados de las investigaciones arqueológicas obtenidas sobre la zona maya, comprendida por Guatemala, Belize, El Salvador, Honduras y la parte sureste de México (Yucatán), indican que la misma fue ocupada después de esta época arcaica comprendida entre 6000 y 4000 años a.C. (Laughton, 1999).

Copán se encuentra a 600 m de altitud, y ocupa la zona oriental de la civilización maya (ver figura 3).



Fig. 3. Posición geográfica de Copán en Honduras.

En cuanto a la arquitectura maya se refiere, sus viviendas eran construidas de un tipo de material orgánico perecedero (Berges, 1999). Sin embargo, las estructuras destinadas al desarrollo de actividades cívico - religiosos conservan su postura, no solamente en Copán, sino también en una gran cantidad de ciudades mayas. Dichas estructuras se caracterizan por el tipo de material con la cual fueron edificadas, hacemos referencia a la piedra caliza como material de construcción.

Estos elementos comunes presentan, sin embargo, variantes regionales y temporales que permiten reconocer estilos o provincias arquitectónicas. De acuerdo a los sondeos arqueológicos llevados a cabo en el sitio, la Acrópolis se estableció sobre una zona poco elevada, en tierras pantanosas adyacentes al río Copán (Sharer, 1996).

A pesar de toda la valiosa información arqueológica que ha sido recolectada hasta la fecha, sobre el origen de la Acrópolis de Copán, hoy día gran parte de los esfuerzos han sido encaminados a estudiar las características arqueológicas y paleoambientales de las zonas que rodean a este conjunto monumental. Este trabajo centra su atención en analizar la respuesta de la conductividad eléctrica del subsuelo, empleando dipolos magnéticos en la sección occidental del Bosque, situado también al suroeste de la Acrópolis de Copán (ver figura 4).

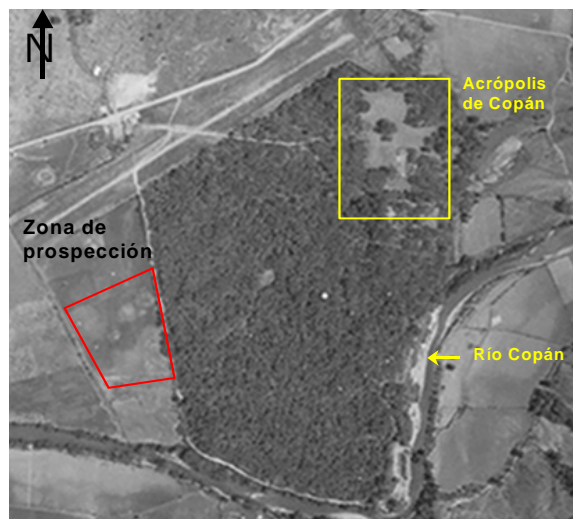


Fig. 4. Delimitación de la sección suroeste de la Acrópolis de Copán o zona de interés.

PARTE EXPERIMENTAL

El proceso de medición de la conductividad eléctrica del subsuelo se llevó a cabo cada 10 m a lo largo de un perfil, y éstos a su vez, separados una distancia de 10 m sobre la zona. Era necesario tomar en consideración la misma altura a la cual el sistema EM31 se disponía para cada usuario.

La data obtenida se procesó posteriormente sobre un ordenador. Con la ayuda del programa Mk2, los datos almacenados en el sistema electromagnético pudieron ser transferidos; posteriormente, dichos datos (en extensión .dat) pudieron ser tratados numéricamente en Wumap 2001 y, al final, representados en Surfer 7. Esta prospección electromagnética conllevó a la definición de una de malla de interpolación de $(5 \times 5) m^2$ mediante la aplicación del algoritmo de curvatura mínima. La figura 5 muestra la distribución de los datos sobre la zona prospectada, en coordenadas simples de terreno.

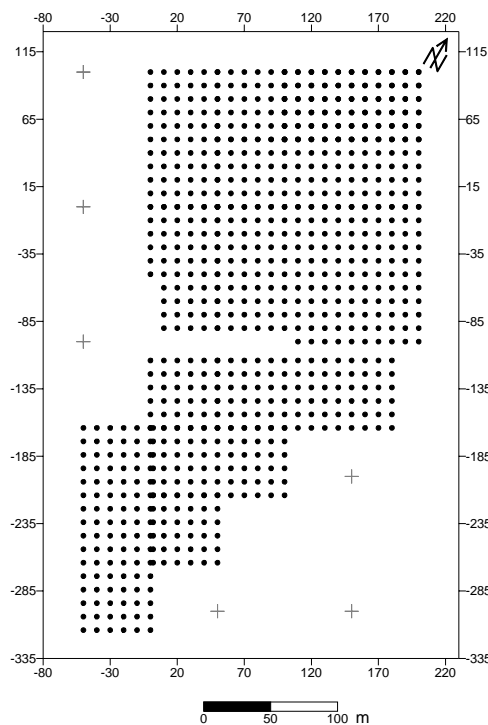


Fig. 5. Distribución de los puntos en los cuales, se midió el valor de la conductividad eléctrica.

En resumen, se prospectó en total una superficie de 6,30 hectáreas, con una cantidad de datos de 874 en total.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los datos de campo generados a través de la campaña de prospección y una posterior definición de algunos parámetros necesarios a la hora de desarrollar el mapeo, como la distancia mínima

de interpolación y las dimensiones de las ventanas de filtraje, se obtuvo el resultado de la figura 6. El mismo presenta valores de la conductividad eléctrica que van desde los 40 a 148 mS/m. Una notable anomalía de este parámetro se hace evidente a lo largo de toda la zona prospectada, con valores que superan los 115 mS/m, la cual es representada por un polígono de líneas blancas punteadas (ver figura 6). Las investigaciones arqueológicas han arrojado a la luz la existencia de deposición de material de tipo aluvial, la cual se encuentra estrechamente relacionada con un paleocanal que se extendía desde la sección norte de las estructuras principales del Complejo Arqueológico, hasta lo que representa hoy día el cause actual del Río Copán.

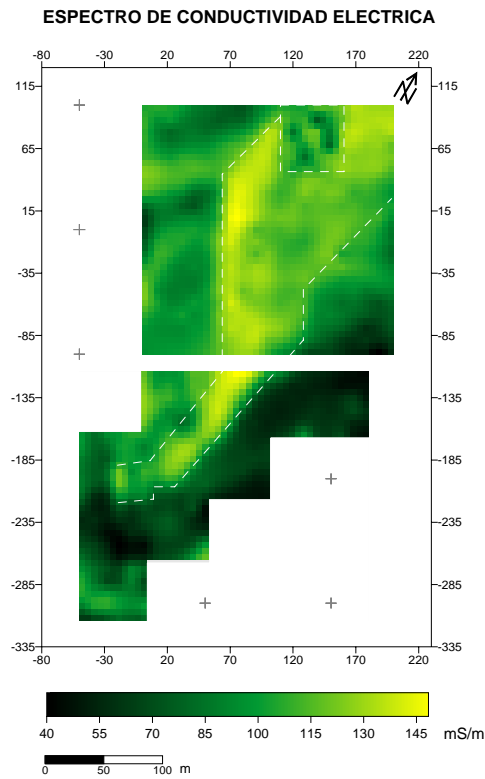


Fig. 6. Espectro de conductividad eléctrica obtenida en Surfer 7, en la zona occidental del Bosque.

El recuadro hecho a base de líneas punteadas que se observa en el extremo superior de este espectro, revela la presencia de cuatro anomalías puntuales con valores bajos de la conductividad eléctrica. Las anomalías encerradas en dicho recuadro se encuentran estrechamente relacionada con la presencia de las bases de una estructura arqueológica prehispánica de tipo piramidal, que ha sido reportada por las investigaciones arqueológicas desarrolladas en el área. Estas anomalías presentan valores de la conductividad eléctrica muy bajos, en el orden de los 45 *mS/m*.

CONCLUSIONES

El espectro de conductividad eléctrica obtenido en la zona occidental de la Acrópolis de Copán, con el dispositivo EM31, muestra de manera general, dos anomalías importantes, propias de características arqueológicas diferentes. Una de ellas constituye una clara zona de valores bajos, con un alineamiento NE – SW, revelando la dirección de un drenaje antiguo o paleocanal y, en la sección superior, una segunda anomalía de altos valores de dicho parámetro, cuya distribución se encuentra asociada a las bases de un posible antiguo montículo maya. Existen dos hipótesis concernientes a dicho montículo, uno de ellos que lo relaciona al producto del desmantelamiento de las estructuras arqueológicas, y la otra, que la relaciona al límite de la zona de hábitat del Bosque.

Las investigaciones arqueológicas de hoy día han logrado demostrar la existencia de una rivera antigua, propia del entorno paleoambiental del valle de Copán, y que posiblemente existió mucho antes de la ocupación maya.

ABSTRACT

The utilization of induced currents in the subsoil has currently constituted an outstanding point in the development of complex systems, capable to quantitatively assess the electrical charge conduction level by a determined ground volume. This study analyzes the response, as a physical sign, by certain devices based in the physics principle of induction (magnetic dipoles) with regard to archaeological structures and certain elements that once were part of the surroundings of one of the most important political – religious sites of the mesoamerican civilization. As a specific case, the response of a paleochannel obtained in the western zone of the Conjunto Principal de Copán - Ruinas, Honduras, is presented.

KEYWORDS

Cartographic analysis, electromagnetic field, electrical conductivity, magnetic dipole, paleochannel, Slingram.

REFERENCIAS

Agurcia, R. 1996. Rosalila, el corazón de la Acrópolis. El templo del Rey – Sol. Revista Yaxkin. Vol. 14, pp 5 – 18.

Berges, L. 1999. Arquitectura Maya. Revista Arqueohispania. N° 15.

Dabas, M.; H. Deletang, A. Ferdière, C. Jung & W. Zimmermann 1998. La Prospection. Collection Archéologiques. Ediciones Errance, Francia.

De Blas, P.; J. De La Puente, M. Servia, E. Roca, & R. Rivas. 2000. Historia común de Iberoamérica. Ediciones Edaf y Albatros, S.A. España.

Edet, A. 1990. Application of photogeologic and electromagnetic techniques to groundwater exploration in northwestern Nigeria. Journal of African Earth Sciences. Vol. 11, N° 3/4, pp 321-328.

Guérin, R.; Y. Meheni, G. Rakotondrasoa & A. Tabbagh. 1996. Interpretation of slingram conductivity mapping in near – surface geophysics: using a single parameter fitting with 1D model. Geophysical Prospecting. N° 44, pp 233 – 249.

Hazell, J.; C. Cratchley & A. Preston. 1988. The location of aquifers in crystalline rocks and alluvium in Northern Nigeria using combined electromagnetic and resistivity techniques. Quarterly Journal of Engineering Geology. Vol. 21, pp 159-175.

Laughton, T. 1999. Les Mayas. Ediciones Gründ, Francia.

McNeill, J. 1980. Applications of transient electromagnetic techniques. Notas Técnicas editadas por la Geonics Instruments, Ontario, Canadá.

Mojica, A. & N. Florsch. 1998. Aplicación de los espectros de conductividad y resistividad eléctrica a problemas hidrogeológicos en el suroccidente de Francia. *Scientia*. Vol. 13, N° 2, pp 73 – 81.

Murphy, V. 1999. Copán: en el Valle de los Reyes. *Revista Arqueohispania*. N° 15.

Parasnis, D. 1997. *Principles of Applied Geophysics*. Ediciones Chapman & Hall, Londres.

Sedat, D. 1996. Etapas tempranas en la evolución de la Acrópolis de Copán. *Revista Yaxkin*. Vol. 14, pp 19 – 27.

Sharer, R. 1996. Los patrones de desarrollo arquitectónico en la Acrópolis de Copán del Clásico Temprano. *Revista Yaxkin*. Vol. 14, pp 28 – 34.

Tabbagh, A. 1986. Applications and advantages of Slingram electromagnetic method for archaeological prospecting. *Geophysics*. Vol. 51, N° 3, pp 576 – 584.

Tabbagh, A. 1992. Méthodes géophysiques appliquées à la prospection archéologique. *Mém. Soc. géol. France*. N° 161, pp 9 – 15.

Telford, W.M.; L.P. Geldart & Sheriff, R.E. 1996. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, Londres.

AGRADECIMIENTO

Deseamos extender nuestro más profundo agradecimiento a la Asociación Copán en Honduras y al CCCAC con sede en Costa Rica, por todo el apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo. Al Dr. Pierre Mechler, como director del Laboratorio de Geofísica Aplicada de la Universidad de París 6, por facilitarnos el uso de gran parte de los dispositivos de prospección geofísica. De igual manera, a todos los participantes de la III Escuela de Geofísica Aplicada para América Central, celebrada en Copán a mediados de 2000, cuyos resultados de las prospecciones geofísicas sirvieron de base para la correlación y continuación de los trabajos de investigación que este escrito presenta.

Al Departamento de Física, Instituto de Geociencias y al Centro de Investigaciones con Técnicas Nucleares (CITEN) de la Universidad de Panamá, por la total ayuda brindada a lo largo de este trabajo.

Recibido mayo del 2002, aceptado julio del 2002.