

Prospección geofísica aplicada a la arqueología

La importancia de los procesos de modelización y simulación numérica

Alexis Mojica

Universidad Tecnológica de Panamá, *alexis.mojica@utp.ac.pa*

Leomar Acosta

Universidad Latina de Panamá, Santiago – Veraguas, *lacosta@ve.ulatina.ac.pa*

Palabras claves: Detección remota, modelización, prospección geofísica, simulación numérica.

Resumen

Los últimos años del siglo veinte se caracterizaron por el desarrollo de grandes proyectos científicos de los cuales conviene mencionar la aparición de medios de cálculo computacionales; estas herramientas permiten el estudio de sistemas muy complejos. Hoy en día la simulación por computadora constituye una herramienta clave en el análisis de dichos sistemas. Ésta evita la realización de experiencias costosas, reproduciendo la realidad (con la ayuda de las computadoras y lenguajes de programación) a través de un modelo que, a su vez, representa la traducción de un fenómeno en el lenguaje de las ecuaciones matemáticas. En este artículo, se presentan los resultados de un proceso de simulación numérica como producto de la modelización de estructuras arqueológicas enterradas; dicho proceso puede ayudar a comprender mejor e interpretar los resultados obtenidos durante

una prospección geofísica. En este caso, se presentan datos obtenidos en el sitio de Panamá Viejo.

Key words: Archaeological geophysics, computer modeling, numerical simulation, remote sensing.

Abstract

Many great scientific projects were carried out in the last years of the twentieth century, among which it is worth mentioning those resulting in the development of computer-based calculation methods allowing the study of highly complex systems. Today, computer modeling and simulation has become a key element for the analysis and understanding of such systems. Models can spare researchers lots of efforts and resources by reproducing reality through computers and programming languages which can translate one particular phenomenon into a mathematical language. This article describes a numerical simulation process resulting from the modeling of buried archaeological structures on the site of Panamá Viejo. This process may contribute to a better understanding of the data obtained in remote sensing studies in archaeological sites.

La prospección geofísica es una disciplina científica que reúne varias técnicas destinadas a detectar estructuras enterradas. En arqueología, esta disciplina ha sido ampliamente utilizada, ya que permite la detección de rasgos culturales sin necesidad de llevar a cabo una excavación, siendo entonces una herramienta poderosa que ofrece al investigador información *a priori* sobre los posibles rasgos arqueológicos enterrados en un sitio dado. Como en otras áreas del conocimiento científico, en el campo de la prospección geofísica también se desarrollan modelos que permiten describir la naturaleza de las estructuras subsuperficiales (estructuras arqueológicas en nuestro caso). Un modelo corresponde a una representación conceptual, matemática, gráfica o informática de ciertos objetos y de relaciones que existen entre ellos en un dominio limitado del mundo real. Una vez descrito el modelo teórico que caracteriza el fenómeno a estudiar (rasgos arqueológicos), se lleva a cabo la simulación numérica que ayuda a comprender el funcionamiento y las propiedades del fenómeno o sistema y a predecir su evolución. Ante todo proceso de simulación numérica, es necesario comprender bien el fenómeno que se estudia y explicar claramente, en términos matemáticos, la modelización del problema (Dormy 2002). En este artículo describimos el resultado de la simulación numérica de un conjunto de estructuras enterradas, cuyo modelo teórico se encuentra basado en la interacción de campos electromagnéticos producidos por dichas estructuras y su alrededor (Dabas *et al.* 1994). Presentaremos una comparación entre los resultados de una simulación numérica y los de una jornada de prospección eléctrica realizada al Oeste del convento de Santo Domingo.

Modelización y simulación

La modelización es una técnica que permite estudiar el comportamiento de sistemas complejos utilizando el lenguaje de las matemáticas; ella emplea parámetros, variables y las relaciones entre éstas. De este proceso, se obtiene un modelo el cual corresponde a una traducción de la realidad física o a la representación de una idea y constituye una parte fundamental en muchos contextos científicos (Hartmann y Frigg 2006). Estos elementos son instrumentos importantes de la ciencia moderna pues se utilizan para relacionar la teoría con el mundo real ya que permiten imitar

un proceso (Hartmann 1996).

La simulación numérica, por su parte, consiste en el uso de un modelo para desarrollar conclusiones que provean información del comportamiento de algún elemento del mundo real (McHaney 1991). Ésta busca representar un fenómeno físico mediante el uso de programas computacionales. En muchos casos, las simulaciones generan respuestas de situaciones que por múltiples razones no pueden llevarse a cabo experimentalmente, como por ejemplo el pasado.

La modelización de procesos y fenómenos comenzó con el inicio de las computadoras (Mahoney 1988) utilizándose únicamente en operaciones matemáticas básicas. En la actualidad su uso abarca diversos campos, como las ciencias de la tierra, en donde se utiliza la simulación de ondas sísmicas para el conocimiento de la estructura interna del subsuelo (Komatitsch y Tromp 2001); o en la prospección geofísica, en la que la simulación de la respuesta magnética producida por estructuras regulares (semejantes a algunas de tipo cultural) ha sido objeto de diversas investigaciones (Sambuelli *et al.* 1999; Tabbagh 2003).

La importancia de la modelización y la simulación en prospección geofísica

Existe una gama de técnicas de prospección geofísica que permiten medir ciertas propiedades físicas del subsuelo. Una de las más utilizadas en arqueología es la prospección eléctrica (Tabbagh 1992; Dabas *et al.* 1998). El objetivo de esta técnica consiste en medir el grado de dificultad que experimentan las cargas eléctricas al atravesar un determinado volumen de terreno; dicho grado de dificultad se cuantifica a través de la resistividad eléctrica medida sobre la superficie del terreno (valores que corresponden a las medidas obtenidas a partir del suelo hasta una cierta profundidad). Esto se hace introduciendo cierta cantidad de corriente eléctrica en el subsuelo, a través de una fuente regulada y conectada a dos electrodos metálicos; esta corriente a su vez genera una diferencia de potencial o voltaje que puede ser medido en la superficie del terreno por medio de otros dos electrodos metálicos. Finalmente, la resistividad eléctrica puede calcularse para un punto en particular si se conocen estos dos parámetros y el arreglo de electrodos desplegados sobre el terreno. Si

se efectúa la misma operación en diferentes puntos sobre la superficie de interés (cada uno de estos puntos con su respectiva coordenada métrica de terreno), se obtiene un arreglo numérico que posee los valores de las resistividades medidas en superficie y las coordenadas X y Y.

Los datos obtenidos en superficie son posteriormente procesados en un computador lo que dará como resultado una imagen a escala de grises o a colores sobre las variaciones de dichos parámetros físicos a una profundidad establecida. Las variaciones o anomalías se presentan como manchas en una tonalidad de color o a una escala de grises. Como las estructuras arqueológicas poseen propiedades físicas diferentes al medio que les rodea, las anomalías resultantes presentarán una determinada geometría. El proceso final del estudio corresponde a la interpretación de dichas geometrías identificadas en la imagen final. En muchos casos, esta fase no es evidente y por ende, es necesario llevar a cabo correlaciones con otras fuentes (perforaciones, reconocimiento superficial, etcétera). Con las anomalías desplegadas en un mapa, el arqueólogo tendrá los elementos necesarios para llevar a cabo una intervención arqueológica. Para complementar todo este trabajo, se realiza una simulación de la respuesta eléctrica a partir de un modelo dado.

Jeanne Tabbagh (2003) ha propuesto un código computacional que permite simular la respuesta eléctrica de cuerpos tridimensionales ubicados a cierta profundidad. El mismo se encuentra basado en el método de momentos descrito por Dabas *et al.* (1994), el cual consiste en reemplazar el o los cuerpos (paralelepípedos) por una distribución equivalente de fuentes de corriente. Se trata, entonces, de calcular el potencial eléctrico para un punto cualquiera, después de inyectar una cantidad de corriente eléctrica en otro punto de la superficie de un suelo homogéneo de resistividad eléctrica dada, que contiene una o varias estructuras tridimensionales de resistividades conocidas. Los tópicos teóricos concernientes a este método se basan en el estudio de los campos electromagnéticos totales, generados por el o los cuerpos y el medio que los rodea; el resultado de este proceso corresponde a dos ecuaciones complejas que contienen información referente a las propiedades eléctricas de ambas estructuras (cuerpos y medio que los rodea).

Si el o los paralelepípedos definidos en el modelo son divididos en

pequeñas celdas o células, la resolución de una de las ecuaciones dadas permitirá computar el campo total E en el interior de cada celda (Dabas *et al.* 1994). Esto se hace resolviendo un sistema de ecuaciones que puede ser representado como:

$$TE = E_p$$

Donde E_p corresponde a un campo que es independiente del o los paralelepípedos establecidos en el modelo y T , un arreglo numérico cuyos elementos representan el efecto de cada celda sobre las otras ubicadas en los alrededores. Finalmente, el programa genera un archivo con los valores calculados de las resistividades eléctricas de los paralelepípedos y el medio que los rodea.

Simulación de la respuesta eléctrica de un conjunto de paralelepípedos

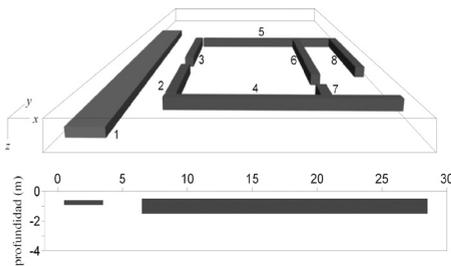


Figura 1. Representación tridimensional de los paralelepípedos establecidos en este análisis. El diagrama bidimensional, ubicado en la parte baja de la figura, muestra una visualización frontal del sistema con sus respectivas dimensiones métricas.

Consideremos una serie de paralelepípedos ubicados a cierta profundidad en un medio homogéneo de 10 ohm.m de resistividad eléctrica que podrá aproximarse a un conjunto de rasgos culturales enterrados. Por ejemplo, la Estructura 1 de la Figura 1 podría asociarse a una calle de cantos rodados. Dicha estructura posee 30cm de espesor (proyección a lo largo del eje Z), 3m de ancho (proyección a lo largo del eje X) y 39m de largo (proyección a lo largo del eje Y).

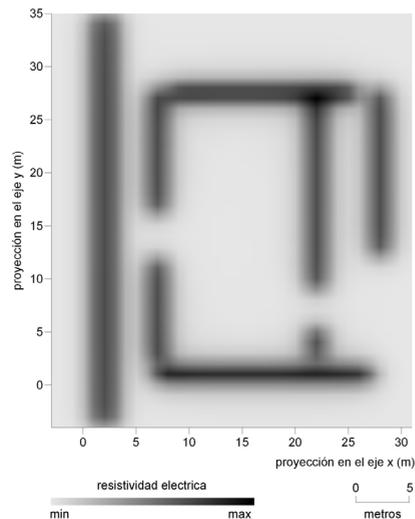
También se han establecido otras siete estructuras (paralelepípedos) localizadas a una profundidad menor que la Estructura 1. Dichas estructuras corresponden a un conjunto de cimientos de una edificación colonial (ver Figura 1).

Tabla 1. Características físicas de las estructuras ilustradas en la Figura 1.

| Estructura | Resistividad eléctrica (ohm.m) | Posición del centro de la estructura en (m) | | | Dimensiones de la estructura en (m) | | |
|------------|--------------------------------|---|------|------|-------------------------------------|-------|---------|
| | | en X | en Y | en Z | Ancho | Largo | Espesor |
| 1 | 60 | 2,0 | 15,5 | 0,75 | 3,0 | 39,0 | 0,3 |
| 2 | 60 | 7,0 | 7,0 | 1,0 | 1,0 | 10,0 | 1,0 |
| 3 | 60 | 7,0 | 22,0 | 1,0 | 1,0 | 12,0 | 1,0 |
| 4 | 60 | 17,0 | 1,0 | 1,0 | 21,0 | 1,0 | 1,0 |
| 5 | 60 | 17,0 | 27,5 | 1,0 | 18,0 | 1,0 | 1,0 |
| 6 | 60 | 22,0 | 17,8 | 1,0 | 1,0 | 18,0 | 1,0 |
| 7 | 60 | 22,0 | 4,0 | 1,0 | 1,0 | 3,0 | 1,0 |
| 8 | 60 | 28,0 | 20,0 | 1,0 | 1,0 | 16,0 | 1,0 |

Los datos de resistividad eléctrica que figuran en esta tabla se encuentran basados en los resultados de las prospecciones geofísicas desarrolladas por Caballero *et al.* (2004) y Mojica (2007). Los valores de resistividad eléctrica están en ohm.m.

La Figura 2 presenta la simulación de la respuesta eléctrica generada por el conjunto de paralelepípedos en el modelo de la Figura 1. Como puede observarse, este resultado representa la distribución espacial de la resistividad eléctrica calculada para el conjunto de paralelepípedos propuestos en el modelo de terreno. Las anomalías de la resistividad calculada son claramente observadas por la geometría y la intensidad en la tonalidad en gris de la imagen.



El caso de la calle al Oeste del convento de Santo Domingo

Veamos ahora un caso real relacionado con una prospección eléctrica desarrollada en el sector

Figura 2. Mapa a escala de grises de la resistividad eléctrica calculada a partir del modelo propuesto para este estudio.

central de Panamá Viejo. La prueba consistió en estudiar la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo al Oeste de las ruinas del convento de Santo Domingo¹.

Utilizando una configuración electródica específica, se obtuvo la imagen a escala de grises de la Figura 3a; las mediciones de la resistividad eléctrica se llevaron a cabo cada metro sobre una superficie de 708m², a lo largo de perfiles separados 1m. En este resultado se presenta una anomalía eléctrica alargada en tonalidad oscura. Dicha anomalía se encuentra asociada a la calle de cantos rodados ubicada al Oeste del convento de Santo Domingo (Caballero *et al.* 2004; Mojica 2007) localizada a una profundidad no mayor a 50cm. Las áreas oscuras representan zonas de alta resistividad eléctrica. El área de alta resistividad localizada al fondo de este mapa, corresponde a roca basáltica típica del sitio.

Con base en estos resultados experimentales, se propuso un modelo de un paralelepípedo de 27m de

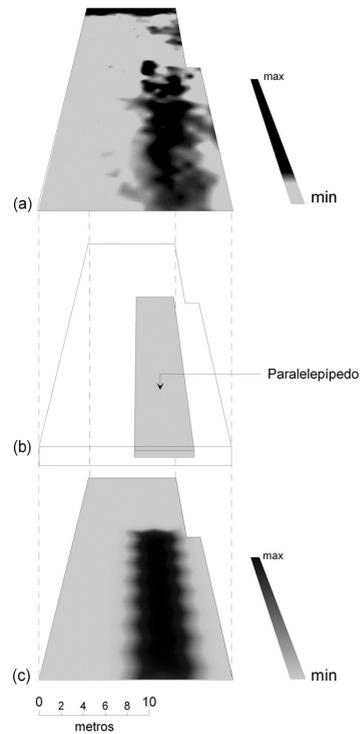


Figura 3. Presentación en perspectiva de: (a). Los resultados de la prospección eléctrica (Caballero *et al.* 2004; Mojica 2007) (b). El modelo de un paralelepípedo de 30 ohm.m de resistividad ubicado en el interior de un suelo de 9 ohm.m y, (c). El resultado de la simulación realizada sobre el modelo presentado en la Figura 3b.

¹ En el año 2000 se llevó a cabo una extensa prospección arqueológica del sector ubicado al Oeste del convento de Santo Domingo, como parte del proyecto de recuperación de la traza urbana colonial del sitio.

Durante dichos trabajos se localizó el empedrado al que alude este artículo, que entonces fue considerado colonial, tal como aparece en el informe de campo corres-

longitud, un espesor de 30cm y un ancho de 6m. Esta estructura posee un valor de resistividad eléctrica de 30 ohm.m y se encuentra ubicada a una profundidad de 25cm respecto a la parte superior de la misma.

El medio que lo rodea posee una resistividad eléctrica de 9 ohm.m; la Figura 3b ilustra una perspectiva de este modelo. Finalmente, la Figura 3c presenta el resultado de la simulación (mapa sintético) realizada a partir del modelo anteriormente descrito. Los parámetros requeridos para llevar a cabo la simulación son los mismos que se establecieron para desarrollar la prospección eléctrica. Con el objetivo de obtener un resultado más real, se adicionó un determinado nivel de distorsión; se observa una fuerte



Figura 4. Resultado de la prospección arqueológica llevada a cabo al Oeste del convento de Santo Domingo. (Tomado de PAPV 2000)

pendiente (PAPV 2000).

Sin embargo, datos más recientes apuntan a considerar que tal pavimento constituye parte de intervenciones realizadas durante la primera mitad del siglo veinte. El avance del conocimiento de los patrones constructivos de los pavimentos coloniales ha contribuido a establecer claras distinciones entre aquéllos que son coloniales y las intervenciones posteriores. No obstante, no se ve comprometida la validez de las técnicas de reconocimiento geofísico aquí discutidas. Sólo queda demostrada, una vez más, la necesidad de una minuciosa documentación con el fin de interpretar adecuadamente los datos arqueológicos (Nota editorial).

anomalía (tonalidad oscura) con el mismo alineamiento del resultado obtenido en la Figura 3a.

Al comparar los resultados obtenidos en las Figuras 3a y 3c, se hace evidente una analogía entre ellos, lo que indica que el modelo propuesto en este análisis ofrece valiosa información referente a la naturaleza de una estructura arqueológica. Las investigaciones arqueológicas realizadas en esta zona (PAPV 2000), revelaron la existencia de una calle de cantos rodados que comunicaba el centro de la antigua ciudad con el Puente del Rey ubicado al Norte del sitio. La Figura 4 presenta una fotografía de dicho resultado.

Conclusiones

En la prospección eléctrica de poca profundidad aplicada a la arqueología, los modelos propuestos ofrecen una buena aproximación a las estructuras que se encuentran enterradas. La respuesta eléctrica de las principales estructuras que caracterizan al sitio colonial de Panamá Viejo, puede ser simulada a través de un conjunto de paralelepípedos ubicados a una determinada profundidad. El resultado de la comparación del mapa sintético y de campo, demuestra que estos procesos constituyen una herramienta útil en la comprensión de rasgos culturales propios de los sitios patrimoniales.

Agradecimientos. Deseamos agradecer al Centro Experimental de Ingeniería de la Universidad Tecnológica de Panamá por todo el apoyo brindado y al Patronato Panamá Viejo por la ayuda suministrada.

Referencias bibliográficas

- Caballero, Orlando, Alexis Mojica y Juan Martín – Rincón
2004 Prospecciones geofísicas y arqueológicas para la recuperación de la traza urbana de Panamá La Vieja: El caso de la calle Santo Domingo. *Revista Geofísica* 60:43–64.
- Dabas, Michel, Alain Tabbagh y Jeanne Tabbagh
1994 3-D Inversion in subsurface electrical surveying – I. Theory. *Geophysical Journal International* 119:975–990.
- Dabas, Michel, Henri Déletang, Alain Ferdière, Cécile Young y Haio Zimmermann
1998 *La prospection – Collection archéologique*. Ediciones Errance, Francia.
- Dormy, Emmanuel
2002 Introduction aux expériences numériques. *Découverte* 294:30–44.
- Hartmann, Stephan
1996 The world as a process: Simulations in the natural and social sciences. En *Simulation and modeling in the social sciences from the philosophy of science point of view. Theory and decision library*, editado por R. Hegselmann *et al.*, pp. 77–100. Kluwer, Dordrecht.
- Hartmann, Stephan y Roman Frigg
2006 Models in science. En *The Stanford encyclopedia of philosophy*. Ediciones Zalta, E. N. Stanford University.
- Komatitsch, Dimitri y Jeroen Tromp
2001 Modeling seismic wave propagation on a 156GB PC cluster. Documento electrónico, <http://www.linuxjournal.com/article/4671> consultado el 30 de enero de 2008.
- Mahoney, Michael
1988 The history of computing in the history of technology. *Annals of the History of Computing* 10:113–125.
- McHaney, Roger
1991 *Computer simulation: A practical perspective*. Publisher Academic Press, USA.
- Mojica, Alexis
2007 Application des méthodes géophysiques à la détection des sites précolombiens dans la région centrale de Panama et paramétrisation géoarchéologique dans le site hispanique de Panama Viejo. Tesis doctoral inédita, Universidad de París 6, Francia.
- PAPV
2000 Informe síntesis de excavación. Coordenadas 450/650N – 1050/1200E, convento de Santo Domingo. Documento inédito presentado por Juan Guillermo Martín-Rincón al Patronato Panamá Viejo, Panamá.
- Sambuelli, Luigi, Laura Socco y Luisa Brecciaroli
1999 Acquisition and processing of electrical, magnetic and GPR data on a Roman site (Victimulae, Salussola, Biella). *Journal of Applied*

Geophysics 41:189–204.

Tabbagh, Alain

1992 Méthodes géophysiques appliquées à la prospection archéologique.

Mémoires de la Société Géologique de France 161:9 – 15.

Tabbagh, Jeanne

2003 Total field magnetic prospection: Are vertical gradiometer measurements preferable to single sensor survey? *Archaeological*

Prospection 10:75–83.