

Pérrot-Minnot, Sébastien, Erick Reyes, Beatriz Cosenza, Oswaldo Chinchilla, Alexis Mojica, Louis Pastor, Richard Vannooserlande y Roger Guérin

2005 Prospección geofísica en la zona de Cotzumalguapa: Resultados de la IV Escuela Centroamericana de Geofísica Aplicada. En XVIII Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 2004 (editado por J.P. Laporte, B. Arroyo y H. Mejía), pp.968-976. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala.

95

PROSPECCIÓN GEOFÍSICA EN LA ZONA DE COTZUMALGUAPA: RESULTADOS DE LA IV ESCUELA CENTROAMERICANA DE GEOFÍSICA APLICADA

Sébastien Pérrot-Minnot

Erick Reyes

Beatriz Cosenza

Oswaldo Chinchilla

Alexis Mojica

Louis Pastor

Richard Vannooserlande

Roger Guérin

Palabras clave:

Arqueología Maya, Guatemala, Costa Sur, Escuintla, Santa Lucía Cotzumalguapa, El Baúl, técnicas geofísicas, prospección geoeléctrica

La VI Escuela de Geofísica Aplicada para América Central se realizó en Guatemala del 5 al 17 de mayo del 2003, bajo la dirección de Louis Pastor y Richard Vanhoeserlande, con la participación de un grupo de profesores franceses, así como físicos y estudiantes centroamericanos. Anteriormente se realizaron escuelas similares en Nicaragua (1995), Costa Rica (1997), Honduras (2000), El Salvador (2001) y Panamá (2002). La de Guatemala fue enfocada a las aplicaciones en la arqueología, al igual que las escuelas realizadas en Honduras (Copan), y Panamá (Panamá Viejo).

La importancia de la geofísica aplicada a la arqueología radica en que permite ahorrar tiempo evitando excavaciones innecesarias y destrucciones, orientando futuras exploraciones. De acuerdo con el interés de los arqueólogos que trabajan en Centro América, se decidió realizar la escuela en el sitio arqueológico El Baúl, localizado en la zona sur (boca costa) de Guatemala, en el departamento de Escuintla, complementándola con cursos teóricos que se impartieron en Antigua Guatemala.

La Acrópolis de El Baúl se encuentra a 4 km al norte de la moderna ciudad de Santa Lucía Cotzumalguapa, a una altitud de 550 m, en una leve pendiente bajando hacia el Océano Pacífico, que está a unos 50 km al sur. Al este del sitio corre el río San Francisco, en una pequeña quebrada. El contexto geológico es volcánico, con numerosos afloramientos de lava. El sitio se encuentra a varios kilómetros del volcán de Fuego, que forma parte de una cadena volcánica que atraviesa la parte sur de Guatemala, y que ha mantenido una actividad continua, depositando gran cantidad de sedimentos en la región y en las estructuras prehispánicas. Estos depósitos dificultan el reconocimiento de las estructuras arqueológicas y hacen aún más necesario el uso de las técnicas geofísicas. Actualmente, la fértil zona de El Baúl está cultivada con caña de azúcar, siendo los terrenos propiedad de la empresa El Baúl, S.A... La parte sur de la Acrópolis fue destruida por la construcción de la Colonia Maya (Santa Lucía Cotzumalguapa), en 1997.

El sitio arqueológico formaba parte de un gran asentamiento prehispánico en el Clásico Tardío (600-1000 DC), de unos 10 km², denominado como “Zona Nuclear de Cotzumalguapa” por Chinchilla (1996, 1997). Además de El Baúl, esta antigua ciudad incluía los conjuntos de arquitectura monumental conocidos como Bilbao y El Castillo. La integración espacial del área estaba reforzada por un sistema de calzadas empedradas y puentes, y sus estructuras principales eran de tierra con revestimiento de piedras escogidas.

Más de 200 esculturas monumentales se han encontrado en la zona. La mayoría de ellas muestran el estilo de Cotzumalguapa, que floreció en el Clásico Tardío. Los trabajos de campo en la zona fueron realizados por Thompson (1948), Parsons (1967-1969), y Chinchilla (1996). Las investigaciones muestran a Cotzumalguapa como uno de los principales centros de poder político e innovación cultural del sur de Mesoamérica durante el Clásico. No obstante, la importancia de la actividad en dicho periodo no debe hacer olvidar los importantes vestigios del Preclásico de la zona, entre los cuales cabe mencionar el Monumento 1 de El Baúl, una estela mostrando una de las más antiguas inscripciones calendáricas conocidas en Mesoamérica, del año 36 DC.

Durante la Escuela de Geofísica Aplicada se realizaron prospecciones en tres sectores ubicados en los alrededores de la Acrópolis de El Baúl. Se utilizaron métodos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos. A cada uno de estos sectores se le dio un nombre coloquial, como sigue:

- Sitio de Las Vacas, con un área de 50 x 60 m, ubicado aproximadamente 150 m al oeste de la parte norte de la Acrópolis, en un potrero adyacente a la Colonia Maya, al lado este de la carretera que conduce al ingenio Los Tarros. Excavaciones realizadas allí en 1997 revelaron un conjunto habitacional con estructuras situadas alrededor de un patio empedrado. Estas estructuras poseen banquetas de piedra y, en uno de los casos, muros y escalones revestidos de piedra.
- Sitio del Juego de Pelota, situado 100 m al oeste del sitio de Las Vacas, en un cañaveral al lado oeste de la carretera a Los Tarros. Excavaciones efectuadas en 1998 demostraron la presencia de un Juego de Pelota. En 1997, Lawrence Conyers, geofísico de la Universidad de Denver, realizó una prospección con georadar en dicho sector (Chinchilla 2002).
- Sitio de la Ceiba, con dimensiones de 50 x 80 m, situado unos 500 m al norte de la Acrópolis. Los reconocimientos y colecciones de superficie realizados anteriormente en este sector indicaron la presencia de asentamientos densos. Además, excavaciones realizadas en el año 2002 confirmaron que este sector está comunicado con la Acrópolis por medio de las calzadas Eisen y Thompson (Chinchilla y Carpio 2003).

En esta ponencia se presentan los resultados de la aplicación de los métodos geofísicos en cada uno de estos sectores, después de una explicación resumida de los principios de cada uno de los métodos utilizados. En los casos del sitio de Las Vacas y del Juego de Pelota, los resultados se contrastan con las observaciones derivadas de las excavaciones arqueológicas. Estos resultados sirven como base para discutir las perspectivas que ofrecen los métodos geofísicos a la arqueología en Guatemala.

TEORÍA DE LOS MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

Etimológicamente hablando, la geofísica es una disciplina científica que se encarga del estudio de las propiedades físicas de la Tierra. Ésta puede dividirse en dos partes: La Geofísica Pura, que se encarga del estudio de la gravedad, el magnetismo, la electricidad y conductividad eléctrica, y la sismología terrestres; y la Geofísica Aplicada, que se encuentra consagrada a la aplicación de la Geofísica Pura.

La Geofísica Aplicada, cuyo objetivo es hacer uso de los conceptos físicos en el estudio de la parte superficial de la corteza terrestre, constituye una herramienta poderosa que puede ser explotada

en favor de la arqueología. El prospector geofísico centra toda su atención sobre las variaciones en todo punto del espacio-tiempo de ciertos parámetros físicos del suelo, tales como la resistividad y conductividad eléctrica, entre otros. La representación de estas variaciones sobre un mapa y su posterior interpretación permite hacer inferencias sobre la ausencia o presencia de estructuras arqueológicas en el subsuelo.

Los métodos geofísicos pueden clasificarse en métodos pasivos (asociados con un campo natural), y métodos activos (asociados con un campo artificial). El campo excitador (activo o pasivo), será modificado por las propiedades físicas del medio. Si se miden en algunos puntos los valores de este campo, entonces se tendrá una idea sobre las variaciones de las propiedades físicas del suelo.

MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA

Las medidas de resistividad superficial (ρ_a) constituyen la base de los métodos de prospección eléctrica de corriente continua, que consisten en introducir una corriente eléctrica continua de densidad conocida entre dos electrodos, y medir la diferencia de potencial entre otros dos. Este parámetro traduce la dificultad con la cual una corriente eléctrica puede atravesar un volumen de suelo dado. Todos los materiales tienen la propiedad de dejar pasar las cargas eléctricas; si lo hacen con facilidad, son conductores y, en el caso opuesto, son resistores. Si un suelo es muy seco o pedregoso, el valor de la resistividad será alto, pero si es un suelo húmedo o salado, su resistividad será baja.

Históricamente, este método es el más antiguo en prospección arqueológica. El parámetro medido es la resistividad aparente del suelo.

El método se basa en dos leyes fundamentales:

a) La ley de la conservación de la carga espacial

$$\nabla \cdot J = -\frac{\partial q}{\partial t} \quad (1)$$

b) La ley de Ohm

$$J = \sigma E \quad (2)$$

Donde el vector J representa una densidad de corriente (A/m^2), q es la densidad de carga espacial (C/m^3), t el tiempo, σ la conductividad eléctrica. Por otro lado E , el vector de campo eléctrico, se define como el gradiente del potencial eléctrico.

La ley de Ohm es válida sólo en medios isótropos, ya que para un medio anisótropo, la conductividad no podría considerarse como un escalar, sino como un tensor simétrico de segundo orden. Pero, considerando el primer caso con un régimen estacionario, la densidad de carga espacial será constante y la ley de la conservación de la carga espacial se simplifica. Entonces, haciendo uso de las dos leyes fundamentales, se llega a la siguiente ecuación:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (3)$$

Conocida como "ecuación de Laplace". Esta ecuación, aplicada en coordenadas esféricas al estudio de un semi-espacio formado por un terreno homogéneo e isótropo, en cuya superficie se supone una carga puntual (que será el electrodo de corriente en el punto considerado), con una referencia en el infinito, luego de un tratamiento matemático (Cantos 1987), produce la ecuación de potencial eléctrico:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (4)$$

Los elementos que se controlan en una prospección geoelectrica son la corriente inyectada y la separación entre los cuatro electrodos: dos de medición, denotados M y N (donde se obtiene la

diferencia de voltaje ΔV); y dos de inyección eléctrica A y B, como se muestra en la Figura 1. El objetivo es una medición de la resistividad eléctrica ρ , que se obtiene luego de introducir los parámetros geométricos de la posición de los electrodos en la ecuación (4), llegando a

$$\rho = \left[\frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right)} \right] * \left(\frac{\Delta V}{I}\right) \quad (5)$$

El primer término de la expresión se denomina factor geométrico k , que es una función que depende del tipo de dispositivo empleado (Figura 1). Para el dispositivo Wenner, la configuración es como la de la Figura 1, con igual separación entre los electrodos AM, MN y NB, cuyo valor a permanece constante, por lo que la ecuación (5), con su respectivo factor geométrico, se convierte en:

$$\rho = 2a\pi \frac{\Delta V}{I} \quad (6)$$

Por otro lado, para el dispositivo Schlumberger, la configuración de la Figura 1 establece una simetría a partir de un punto origen al centro del arreglo: los electrodos M y N están separados una distancia $2l$, y los electrodos A y B están separados una distancia $2L$. La ecuación resultante es:

$$\rho = \frac{\pi(L^2 - l^2) \Delta V}{2l I} \quad (7)$$

Por último, la configuración del dispositivo dipolo-dipolo (Figura 2), produce la ecuación:

$$\rho = n\pi(n+1)(n+2)a \frac{\Delta V}{I} \quad (8)$$

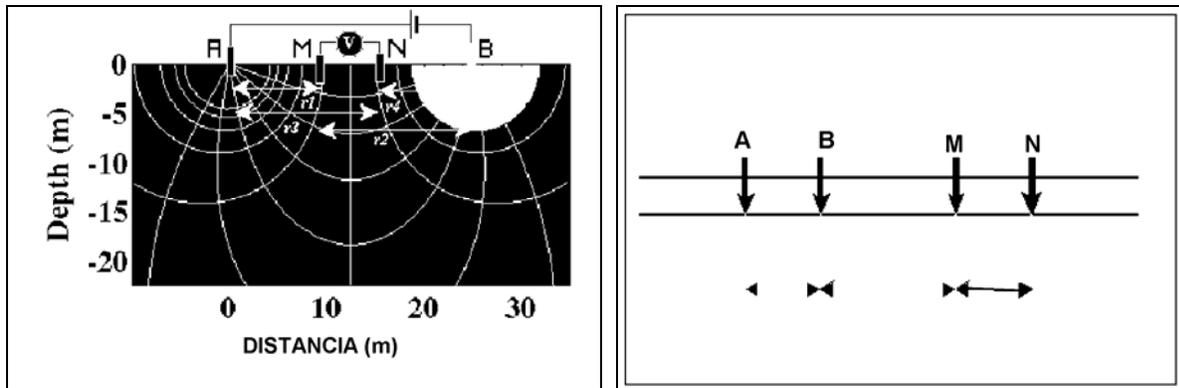


Figura 1 Algunos resultados
Figura 2 Algunos resultados

MÉTODO DE PROSPECCIÓN GEOMAGNÉTICA

La comprensión del comportamiento del magnetismo del suelo permite el uso de nuevas herramientas de prospección en sitios arqueológicos. Las variaciones espaciales del campo geomagnético o “anomalías magnéticas”, son provocadas por las variaciones en la cantidad de materiales magnéticos distribuidos en el suelo, o por objetos que tienen cierta cantidad de hierro. Dichas anomalías pueden medirse por medio de un magnetómetro de presesión protónica, que depende de la frecuencia libre de presesión de los protones que han sido polarizados en una dirección normal a la dirección del campo de la Tierra. Cuando el campo polarizado cambia, los protones precesan cerca del campo de la Tierra a una velocidad angular ω , conocida como frecuencia de Larmor, representada por la ecuación:

$$\omega = \gamma_p B \quad (9)$$

Donde la constante γ_p es el radio giro magnético del protón, que es un valor conocido, y B es el valor del campo magnético.

En la práctica, los óxidos magnéticos son los principales constituyentes responsables del magnetismo observado. La Figura 3 muestra un esquema del campo magnético correspondiente a una estructura en el subsuelo.

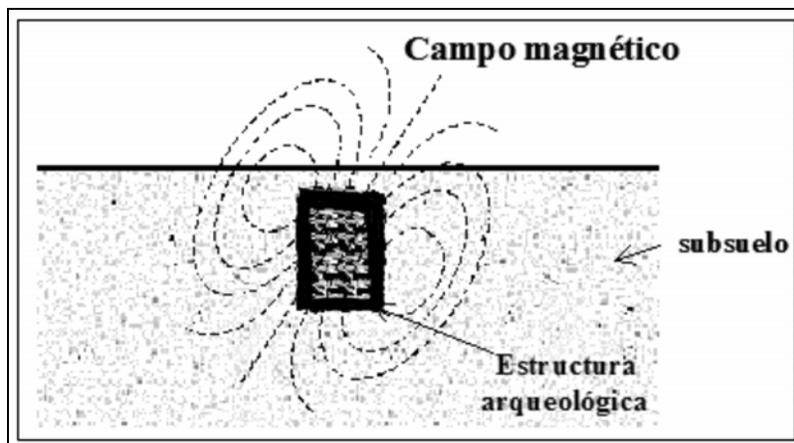


Figura 3 Algunos resultados

MÉTODO DE PROSPECCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Los sistemas electromagnéticos, llamados también SCM (*Soil Conductivity Meter*) pueden medir de manera muy precisa la conductividad eléctrica del subsuelo, que es el inverso de la resistividad eléctrica y se expresa en milisiemens por metro (mS/m). El fundamento teórico de estos sistemas se basa en la emisión de un campo magnético por medio de una bobina (como una antena), que se propaga en el aire y luego, en el volumen de subsuelo cercano a la vertical de la bobina. Este campo magnético induce corrientes eléctricas en el subsuelo, en las partes más conductoras y en los metales enterrados (Figura 4). Estas corrientes inducidas crean un campo magnético secundario que puede ser detectado por una segunda bobina receptora. Los principios básicos del método son la ley de Biot-Savart y la relación que se obtiene por medio de la inductancia mutua.

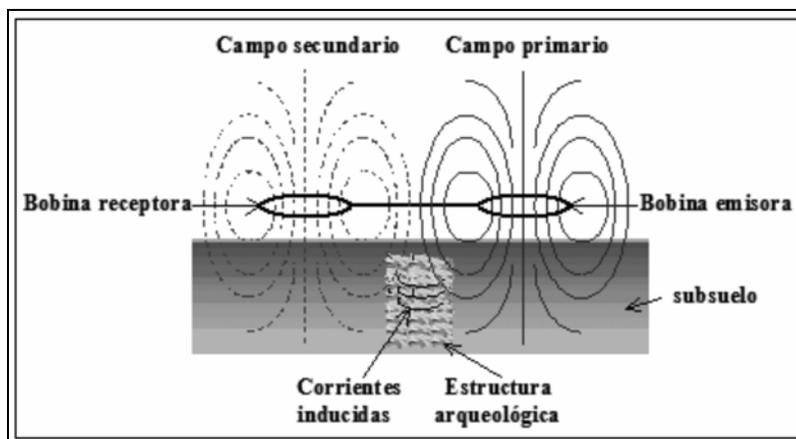


Figura 4 Algunos resultados

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Con el objetivo de recabar información acerca de los lugares donde podría haber estructuras precolombinas enterradas, se analizó el subsuelo de las tres zonas seleccionadas de El Baúl, aplicando las distintas técnicas geofísicas estudiadas en la sección anterior. La inversión de los datos se realizó por medio del programa Surfer 8. A continuación se presentan los resultados de la prospección geofísica.

SITIO DE LAS VACAS

En este sitio la prospección geofísica se realizó para verificar si las estructuras halladas anteriormente eran detectables por los métodos geofísicos descritos, y si éstos mostraban la continuación de las mismas u otras nuevas en el área que aún no había sido excavada.

Para la prospección geomagnética se definió una zona no regular, con una separación de 1.0 m entre perfiles, utilizando un magnetómetro de cesio. El sistema se programó para obtener 10 medidas por segundo y para realizar una interpolación de 0.20 m a lo largo del perfil.

El mapa geomagnético obtenido muestra algunas discontinuidades debido a que la prospección se desarrolló por etapas, durante varios días y por distintos operadores como parte de los talleres de la Escuela de Geofísica Aplicada. No obstante, se evidencian algunos alineamientos (línea continua), que podrían relacionarse con las estructuras habitacionales ya mencionadas, enterradas a poca profundidad. Las anomalías magnéticas sugieren también algunos alineamientos secundarios dentro de la estructura principal. Además, aparecen otras anomalías aisladas que pueden ser resultado de la presencia de algún material férreo disperso enterrado a poca profundidad, por lo que las mismas no son de interés arqueológico.

Las anomalías principales concuerdan satisfactoriamente con los resultados de las excavaciones previas, pues coinciden con la localización de las estructuras ya conocidas, o bien, con su orientación (línea discontinua).

Sobre el mismo sitio, prospeccionando solamente una fracción de la zona, se utilizó un magnetómetro de precesión protónica. El mapa geomagnético así obtenido muestra fuertes coincidencias con el mapa del magnetómetro de cesio. Los alineamientos de interés (línea continua), coinciden también con la orientación de las estructuras ya conocidas (línea discontinua).

Para la prospección geoelectrica se empleó el dispositivo dipolo-dipolo, con una frecuencia de medición de 2.0 m y una separación de 2.0 m entre perfiles. El mapa de resistividad aparente muestra anomalías muy evidentes que denotan una alineación de material de alta resistividad aparente (línea

continua), coincidente con la orientación esperada de las estructuras, que guardan estrecha relación con las anomalías geomagnéticas mostradas con anterioridad. Una superposición con los mapas geomagnéticos mostrará una clara correspondencia entre los patrones de alineación de las anomalías.

Todos estos resultados confirman la existencia de estructuras arqueológicas enterradas a pocos metros de profundidad en la zona.

SITIO DEL JUEGO DE PELOTA

Aquí se desarrollaron prospecciones de tipo magnético, electromagnético y eléctrico para determinar anomalías que pudieran revelar la presencia de otras estructuras alineadas a las ya encontradas, que formarían parte del complejo original. Sin embargo, los resultados generados por el método electromagnético se vieron altamente afectados por la irregularidad del terreno debido a la actividad agrícola, por lo que no se incluyen.

Para la prospección geomagnética en esta zona se utilizó el magnetómetro de vapor de cesio con una separación de 1.0 m entre perfiles. En el mapa geomagnético obtenido destacan tres anomalías A, B y C. Los polígonos A y B muestran dos grupos grandes de fuertes anomalías magnéticas difíciles de interpretar, pero que podrían estar relacionadas con las estructuras que forman parte del Juego de La pelota. Es necesario realizar una prospección arqueológica para definir su naturaleza. El patrón de alineación en la anomalía B corresponde al de las estructuras ya encontradas. Por otra parte, la anomalía C llama la atención por no ser co-lineal con el sentido de la prospección y podría estar también relacionada con el Juego de Pelota.

Para la prospección eléctrica se empleó el dispositivo dipolo-dipolo, con una frecuencia de medición de 2.0 m y una separación de 2.0 m entre perfiles.

SITIO DE LA CEIBA

En esta zona se aplicó la técnica de la prospección geomagnética para determinar las anomalías que podrían relacionarse con la presencia de alguna estructura arqueológica enterrada a baja profundidad para orientar la realización de excavaciones posteriores. Se realizaron varias sesiones de trabajo utilizando una frecuencia de 10 medidas por segundo y una distancia entre perfiles de 1.0 m.

Los resultados de la prospección revelan anomalías muy fuertes en el gradiente magnético vertical, las cuales se resaltan con la línea continua.

Las anomalías geomagnéticas puntuales pueden atribuirse a la presencia de pequeñas rocas ígneas dispersas, por lo que su respuesta geomagnética se superpone a la respuesta de las posibles estructuras arqueológicas enterradas. Sin embargo, las anomalías A, B, C, y D son muy marcadas, y su geometría podría corresponder a estructuras arqueológicas a poca profundidad, ya que su orientación coincide con la que se esperaría según las estructuras conocidas de las otras zonas (línea discontinua). Por otro lado, es interesante la alineación de las anomalías E y F, que podrían formar parte de un conjunto habitacional.

CONCLUSIÓN

La Geofísica de Prospección constituye una herramienta poderosa “no destructiva” que puede ser explotada por el arqueólogo en la búsqueda y parametrización de las posibles estructuras arqueológicas que se encuentran enterradas en el subsuelo. El principal objetivo de la VI Escuela de Geofísica Aplicada fue que los participantes de los países centroamericanos pudiesen compartir las experiencias de campo y conocimientos para un mejor desenvolvimiento en actividades científicas futuras. Este objetivo se cumplió a cabalidad, y se espera que haya generado interés y entrenamiento básico para la aplicación de métodos geofísicos a la investigación arqueológica en la región.

En el trabajo de prospección geofísica desarrollado, el método geomagnético mostró mayor resolución y constituyó ser la técnica que más resultados arrojó, en cuanto a la identificación de rasgos culturales en todos los sitios prospectados. Los métodos de prospección electromagnética y eléctrica se mostraron más susceptibles a las irregularidades del terreno, derivadas del paso constante del arado.

El área arqueológica de Cotzumalguapa ofrece un campo de aplicación para los métodos geofísicos, cuyos resultados serían de gran valor para orientar la investigación arqueológica. La importancia del sitio en el contexto de la arqueología mesoamericana apenas empieza a reconocerse, y los métodos geofísicos podrían convertirse en una herramienta importante en esta región, al igual que en otras.

En esta escuela se comprobó la aplicabilidad del método magnético utilizando un magnetómetro de presesión protónica que existe en Guatemala desde hace años, propiedad del Instituto Nacional de Electrificación. El alquiler de este equipo incluye el tiempo de un operario que conoce a fondo su manejo. También se utiliza actualmente en el país el equipo de prospección electromagnética EM-38, perteneciente a la Fundación de Antropología Forense. El personal de dicha fundación se ha manifestado en forma positiva a la idea de utilizar dicho equipo en otros trabajos de investigación arqueológica. Es de esperar que estos recursos sean aprovechados cada vez más por los arqueólogos guatemaltecos.

AGRADECIMIENTOS

A las siguientes instituciones: Centro Cultural y de Cooperación de Francia con América Central (CCCAC-Embajada de Francia en Costa Rica), por su apoyo financiero para la realización de la VI Escuela de Geofísica Aplicada; Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM), de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala; el Laboratorio de Geofísica Aplicada de las Universidades Paris 6 y Paris 7 (Francia); Centro Francés de Estudios Mexicanos y Centroamericanos (CEMCA); Museo Popol Vuh (Universidad Francisco Marroquín, Guatemala); Empresa El Baúl, S.A.; Fundación de Antropología Forense de Guatemala; y a las siguientes personas: Louis Pastor, Richard Vanhoeserlande, Ricardo Tascón, Albane Saintenoy, Nicholas Florsch, Myriam Schmutz, Roger Guérin y Muriel Llubes.

REFERENCIAS

Cantos Figuerola, D.

1987 *Tratado de Geofísica Aplicada*. Litoprint, España.

Chinchilla Mazariegos, Oswaldo

1996 *Settlement Patterns and Monumental Art at a Major Pre-Columbian Polity: Cotzumalguapa, Guatemala*. Tesis de Doctorado, Vanderbilt University.

1998a El Baúl: Un Sitio Defensivo en la Zona Nuclear de Cotzumalguapa. En *XI Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala*, (editado por J.P. Laporte, H. Escobedo y A.C. de Suasnávar), pp.375-386. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala.

1998b Pipiles y Cakchiqueles en Cotzumalguapa: La evidencia etnohistórica y arqueológica. *Anales de la Academia de Geografía e Historia de Guatemala* 73:143-184.

2002 Investigaciones por medio de radar de penetración al suelo (GPR) en la zona de Cotzumalguapa, Escuintla. En *XV Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 2001* (editado por J.P. Laporte, H. Escobedo y B. Arroyo), pp.493-512. Museo de Arqueología, Guatemala.

Chinchilla Mazariegos, Oswaldo y Edgar Carpio

2003 El taller de obsidiana de El Baúl, Zona Nuclear de Cotzumalguapa: Informe preliminar. En *XVI Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 2002* (editado por J.P. Laporte, B. Arroyo, H. Escobedo y E. Mejía), pp.787-796. Museo de Arqueología, Guatemala.

Parsons, Lee A.

1967a *Bilbao, Guatemala: An Archaeological Study of the Pacific Coast Cotzumalhuapa Region*, vol.1. Publications in Anthropology 11. Milwaukee Public Museum.

1967b An Early Maya Stela on the Pacific Coast of Guatemala. *Estudios de Cultura Maya* 6:171-198.

1969 *Bilbao, Guatemala: An Archaeological Study of the Pacific Coast Cotzumalhuapa Region*, vol.2. Publications in Anthropology 12. Milwaukee: Milwaukee Public Museum.

Thompson, J. Eric S.

1948 *An Archaeological Reconnaissance in the Cotzumalhuapa Region, Escuintla, Guatemala*. Contributions to American Anthropology and History 44. Carnegie Institution of Washington,.