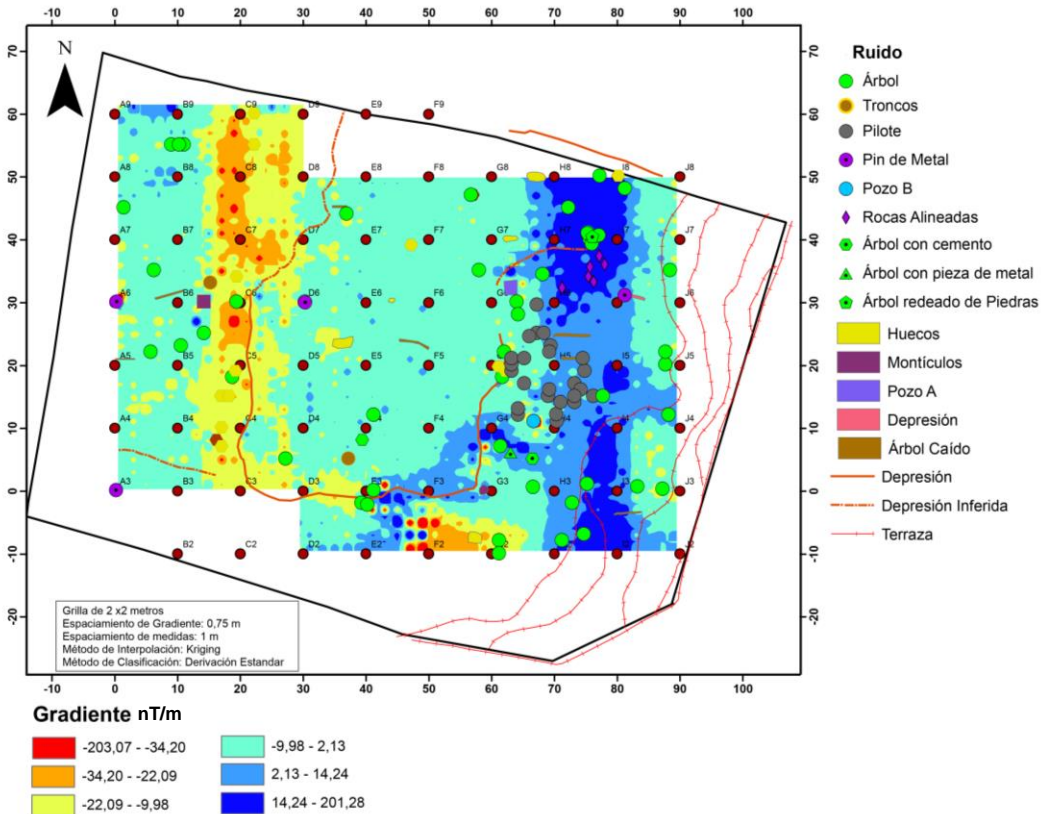


PROSPECCIÓN ARQUEOGEOFÍSICA



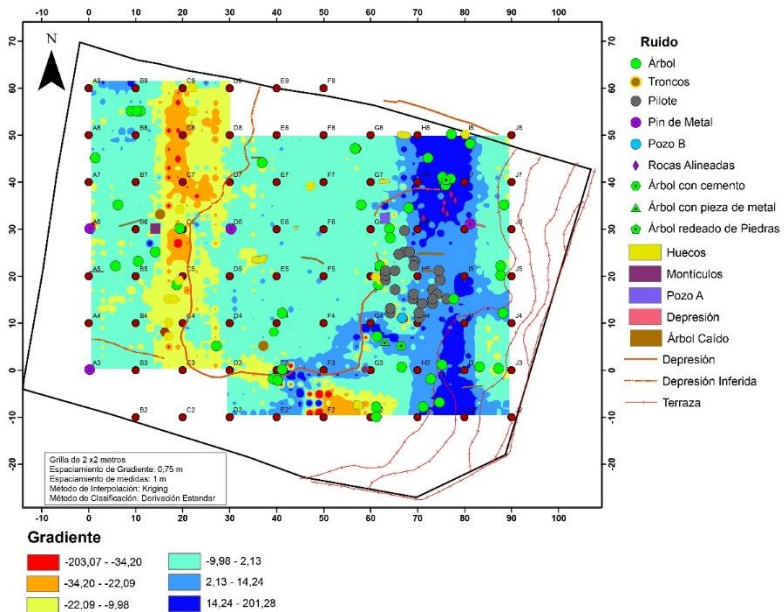
Mario Enrique Arias Salguero
2021



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



PROSPECCIÓN ARQUEOGEOFÍSICA



INTRODUCCIÓN

Prospección Arqueogeofísica, es un aporte del proyecto de investigación desarrollado en el Centro de Investigación en Ciencias Geológicas de la Universidad de Costa Rica, denominado: “Servicios especializados de laboratorio y servicios técnicos en geofísica y recursos hídricos”, No. 830-B4-806, vigente desde el 1/1/2014 hasta el 31/12/2021.

La prospección geofísica es una disciplina científica que reúne varias técnicas destinadas a conocer el subsuelo a partir del contraste de sus propiedades físicas, pudiendo delimitar anomalías que pueden ser utilizadas para detectar estructuras de origen antrópico. En la arqueología costarricense esta técnica ha comenzado a ser utilizadas, ya que permite la detección de rasgos culturales sin necesidad de llevar a cabo una excavación, siendo entonces una herramienta muy útil que ofrece al investigador información *a priori* sobre los posibles rasgos arqueológicos enterrados en un sitio dado.

Con este documento, se pretende dar una visión general del desarrollo de la arqueogeofísica en Costa Rica, enfocándose al proceso de planificación para que la prospección sea efectiva, por tal motivo; se detallan las etapas de Planeamiento, Planificación, Medición, Procesamiento e Interpretación.

Con la intención de que el documento sea divulgado y utilizado por todos aquellos que lo requieran, se autoriza su reproducción, parcial o total, siempre y cuando se cite apropiadamente la fuente.

ÍNDICE

Contenido	Página
Arqueogeofísica	1
Métodos	12
Sitio Hunter Robinson	33
Sitio Manzanillo	44
Sitio de la Batalla La Trinidad	55
Geoeléctrica del Sitio de la Batalla La Trinidad	62
Geomagnetismo del Sitio de la Batalla La Trinidad	70
Georadar del Sitio de la Batalla La Trinidad	77
Referencias	88
Anexo: Fotografía del proceso de prospección geofísica en varios sitios arqueológicos	97

ARQUEOGEOFÍSICA

Definición

El uso de los métodos geofísicos como parte de la investigación arqueológica se conoce con el nombre de arqueogeofísica, disciplina que incluye una variedad de métodos no invasivos para la delimitación y análisis de rasgos arqueológicos y de patrimonio histórico encontrados en el subsuelo (Lockhart y Green, 2006).

Las técnicas geofísicas de exploración o prospección, se basan en la utilización de métodos indirectos para medir propiedades físicas de los suelos. Esto significa que en el mejor de los casos, la prospección geofísica orienta en la localización de las zonas de interés geológico, en este caso particular desde el punto de vista arqueológico e histórico. La aplicación de las diferentes técnicas existentes dependerá de varios factores, entre ellos: el poder de resolución de la instrumentación disponible, la profundidad de investigación requerida, la ubicación y extensión del sitio a prospectar y naturalmente del contraste de las características intrínsecas del suelo y del objeto de búsqueda (Arias, 2007).

El uso de técnicas geofísicas de exploración en arqueología tiene como objetivo principal la determinación de existencia-ausencia de estructuras en el subsuelo mediante la medición de sus propiedades físicas, particularmente de la medición del contraste de sus propiedades, por lo que su uso normalmente permite conocer la distribución, ubicación y dimensión de éstas sin necesidad de excavar el área.

Las anomalías geofísicas son consideradas de gran importancia, ya que representan variaciones tanto laterales como verticales de los valores medidos, originados por los cambios en la distribución de materiales del subsuelo; tanto geológicos como producidos por actividades humanas.

Las técnicas geofísicas terrestres no invasivas más utilizadas en arqueología son las eléctricas, magnéticas y las electromagnéticas, que se describirán en la siguiente sección de este documento.

La calidad de los datos obtenidos depende directamente de las condiciones del sitio, ya que en algunas ocasiones las estructuras y los materiales en superficie limitan las maniobras para la adquisición de datos. Sin embargo, existen otros factores importantes como son la sensibilidad del instrumento geofísico, la técnica empleada, la profundidad del elemento enterrado y que el especialista a cargo del estudio cuente con la experiencia suficiente para elegir las técnicas adecuadas en función de los objetivos del proyecto.

Es importante resaltar que la combinación de distintas técnicas geofísicas complementarias entre ellas, sobre la misma área de estudio permite tener resultados más confiables y una visión más completa de la zona debido a que cada técnica expone una propiedad diferente de los materiales.

Existen diversos factores que favorecen el uso de alguna de las técnicas geofísicas y, dependiendo del contexto, hacen que funcionen mejor en un lugar o en otro. Las técnicas son totalmente dependientes de las propiedades físicas del terreno, del contraste entre ellas y de los materiales presentes.

Por ser técnicas indirectas, siempre existe incertidumbre de lo que se interpreta a partir de los resultados. Por lo mismo, cuando una técnica no proporcione datos confiables o de calidad suficiente para poder interpretarlos en un contexto geológico - arqueológico, es deseable utilizar técnicas geofísicas

adicionales para poder cruzar la información y ofrecer resultados que permitan realizar una mejor interpretación guiando las excavaciones arqueológicas y ofreciendo información sustancial para el proyecto.

Uno los casos que se detalla en este documento, relacionado con la prospección geofísica en el sitio de la Batalla La Trinidad, se enmarca dentro de lo que algunos llaman como arqueología de los campos de batalla. La arqueología militar es una rama de la disciplina arqueológica que ha alcanzado una cierta independencia conceptual, ya que tiene su propio y específico objeto de estudio –la evidencia material de la acción militar humana- en forma de armas, campos de batalla, campamentos militares, fortificaciones y fosas comunes.” Landa & Hernández (2020).

Un campo de batalla puede y debe ser considerado como un tipo particular de sitio arqueológico susceptible de ser ubicado, prospectado a partir de las técnicas geofísicas, delimitado y eventualmente excavado como cualquier otro tipo de sitio, aplicando una metodología apropiada a sus propias particularidades.

3

La prospección

El éxito de en la aplicación de los métodos geofísicos en un proyecto de cualquier tipo, incluyendo aquellos con objetivos arqueológicos, depende de cinco etapas principales, las cuales son: planeamiento, planificación, medición, procesamiento e interpretación conjunta (Cuadro 1).

Cuadro 1: Las cinco etapas de un estudio que usa los métodos geofísicos (Arias 2000).

Etapa	Descripción
Planeamiento	Definición del problema de investigación
Planificación	Traducción del problema en términos geofísicos
Medición	Toma de datos
Procesamiento	Análisis numérico y tratamiento de los datos
Interpretación	Expresión de los datos en términos arqueológicos

4

En la etapa de planeamiento, se define el problema de investigación y el papel de los métodos geofísicos y sus capacidades de corroborar o refutar la hipótesis establecida (Arias 2000, 2002, 2007; Arias y Mojica 2003). Debe comprenderse que la prospección geofísica es una herramienta con una capacidad mayor de corroborar o refutar hipótesis que para establecerlas. En esta etapa, es el profesional en arqueología quien debe establecer el problema a resolver. Por su parte; la persona geofísica debe indagar sobre las condiciones del sitio, las prácticas culturales y tipos o características de los objetos buscados.

Durante la etapa de planificación, el problema de investigación se traduce en términos geofísicos (Arias 2000, 2002, 2007; Arias y Mojica 2003). La persona especialista en geofísica debe establecer modelos directos que conceptualicen el objetivo de la

prospección. En esta etapa se realiza la selección de los métodos que tengan mayor poder de resolución en función del contraste del parámetro físico, así como del tipo, cantidad y distribución de las mediciones. Igualmente debe establecer todo el programa de visitas al campo, el número de personas requeridas y el presupuesto estimado de la prospección.

La etapa de medición corresponde a la recolección de datos en el campo (Arias 2000, 2002, 2007; Arias y Mojica 2003). A pesar de que en la actualidad, prácticamente todos los equipos geofísicos son muy amigables, pues trabajan con sistemas compatibles con programas de cómputo, y en muchos casos en esta etapa el trabajo se reduce a apretar un botón y registrar los resultados, lo cierto es que; requiere de mucho cuidado, pues es función del geofísico operario del equipo asegurarse que los datos recolectados sean representativos y tener el criterio suficiente para reconocer errores de medición en el campo que pueden incrementar el ruido y enmascarar la anomalía que se busca.

En la etapa de procesamiento es necesario convertir los datos en un documento útil para la interpretación de los resultados (Arias 2000, 2002, 2007; Arias y Mojica 2003). Dependiendo del método geofísico utilizado, habrá mayor o menor necesidad de procesar los datos con programas informáticos especializados, que incluye desde el cálculo básico, pasando por el filtrado de las señales y la representación gráfica de las anomalías.

Finalmente, la interpretación de los resultados geofísicos es la expresión de los datos en un documento explicativo (Arias 2000, 2002, 2007; Arias y Mojica 2003). Es imprescindible que el geofísico realice esta interpretación con la ayuda del arqueólogo, para que la misma no sea simplemente la delimitación de zonas anómalas, sino que tenga sentido arqueológico en el marco del contexto del sitio y de los objetivos de la investigación. Esto es lo que se denomina interpretación conjunta.

Larson et al. (2003) han propuesto una serie de principios para la prospección arqueogeofísica.

El primero de ellos hace referencia a la necesidad que en una investigación sean múltiples los métodos geofísicos empleados. Esto se debe fundamentalmente a que; cada uno de ellos tiene pros y contras que están relacionados tanto con las propiedades inherentes del registro arqueológico como con las del medio rocoso en que se encuentran.

El segundo principio explicita la necesidad de la participación conjunta de arqueólogos y geofísicos en todas las etapas del proceso de investigación -planeamiento, estudios de campo e interpretación-.

El tercer principio aconseja que los resultados geofísicos deban ser seguidos posteriormente por pruebas previas a la excavación que sirvan para la comprobación de la estructura y composición de los depósitos sub-superficiales. En otras palabras, la interpretación geofísica no debe ser la única fuente para decidir excavaciones futuras.

El cuarto principio establece, según estos autores que; el registro geofísico además de la información de conductas humanas determinadas, contiene evidencia o trazas de los ambientes en los cuales se desarrollaron. Es por ello que; debemos estar atentos pues los métodos geofísicos detectan información no visible a simple vista.

El quinto y último principio propuesto es que los métodos geofísicos brindan información sobre los procesos de formación del registro arqueológico, identificando tanto; actividades humanas como naturales.

Según Larson et al. (2003), estos principios permiten diagramar un programa de investigación arqueogeofísica partiendo de un marco teórico arqueológico científico explícito y seleccionando las unidades de análisis adecuadas, tanto arqueológicas como

geofísicas, lo que a su vez, tras el trabajo de campo, va a permitir generar alternativas de investigación y de interpretación.

Por su parte, Lanata & Osella (2006), proponen que la base de cualquier trabajo de prospección es la planificación, y se suele dividir en tres etapas: una etapa de pre-exploración, una siguiente etapa de exploración propiamente dicha y una tercera fase de evaluación de los resultados y definición de los pasos a seguir.

Su aplicación en Costa Rica

Sin pretender ser una recopilación exhaustiva, se citan algunas de las prospecciones geofísicas realizadas en Costa Rica con fines arqueológicos, algunas de ellas son prácticas de campo de cursos de antropología y/o geofísica, otras son parte de proyectos de investigación, tesis de licenciatura en geología y antropología, así como de maestría en antropología, todos de la Universidad de Costa Rica. Otros son informes internos de prospecciones geofísicas contratadas y los correspondientes al Museo Nacional, son parte de las labores realizadas por el Departamento de Antropología, a partir de la donación de un equipo GPR a partir del año 2016.

En el Anexo I, se adjuntan varias fotografías del proceso de prospección geofísica en varios de estos sitios.

Cuadro 1: Distribución de algunas prospecciones geofísicas con fines arqueológicos realizadas en Costa Rica.

Sitio	Técnica	Referencia
Finca 6	Magnetometría	Bonatti & Sáenz, 1992
Rivas	Inducción electromagnética	Quitter y Frost, 2002
La Botijuela	Resistividad Eléctrica	Sánchez, 2002
Agua Caliente	Magnetometría	Arias, M.E., 2003
Agua Caliente	Resistividad Eléctrica	Peytrequin & Aguilar, 2003
Rivas	Magnetometría	Conyers, 2007
Java	Resistividad Eléctrica	Castro, 2007
Hunter Robinson	Resistividad Eléctrica	Arias, M.E., 2007
Cubujuquí y Jesús María	Resistividad Eléctrica y Magnetometría	Maloof, G, 2008
Cubujuquí	Resistividad Eléctrica y Magnetometría	Maloof, G. & Arias, M:E., 2008
Jesús María	Resistividad Eléctrica y Magnetometría	Maloof, G. & Arias, M:E., 2008
Manzanillo	Resistividad Eléctrica	Arias, M.E., 2009
Nuevo Corinto	Resistividad Eléctrica y Magnetometría	Arias, M.E., 2009
P.H. El Diquis	Resistividad Eléctrica	Maloof, G.,2010

Sitio	Técnica	Referencia
Jesús María	Resistividad Eléctrica	Hernández, A., 2013
Piedra Alegre	Magnetometría	Arias, M.E., 2014
Playa Jícaro	Georadar	Arias, M.E., 2015
Nuevo Corinto	Georadar	Oviedo, 2015
Alto del Cardal	Georadar	Oviedo, 2015
Alto del Cardal	Georadar Magnetismo Resistividad Eléctrica	Oviedo, Acevedo, Barba, Arias, M.E., 2015
La Trinidad	Georadar Magnetismo Resistividad Eléctrica	Arias, M. E., López, & Vargas, 2017
Agua Caliente, El Viejo, Finca 6, Las Mercedes, Guayabo, Cenada, Manzanillo, El Silencio	Georadar	Museo Nacional, 2020

Quiero resaltar los trabajos de Maloof (2008), quien con su tesis de maestría en Antropología de la Universidad de Costa Rica, presenta la primera tesis en Arqueología utilizando aplicaciones geofísicas en dos sitios de interés. Así mismo el trabajo de Oviedo (2015), quien con su tesis de licenciatura en Geología de la Universidad de Costa Rica, aplica la tecnología del GPR en la prospección arqueológica. En ambos casos, se establecen la metodología específica de su aplicación.

Ventajas y Limitaciones

Los métodos geofísicos utilizados en arqueología son no invasivos y no destructivos, no perturban la estructura y pueden brindar información uni, bi y tridimensional del objeto de estudio.

La aplicación de los métodos geofísicos utilizados en arqueología se puede realizar sobre el terreno, en excavaciones, de forma aérea o incluso sobre y por debajo del nivel del agua, en función de los objetivos de la investigación y lógicamente de la disponibilidad de infinidad de equipos especializados.

El acceso a la excavación de un sitio arqueológico no siempre es sencillo. De hecho, sitios históricos o estructuras ubicadas bajo desarrollos urbanos no siempre son accesibles y los métodos geofísicos son una alternativa para estudiar lo que subyace, sin tener que intervenir el sitio.

Los arqueólogos pueden priorizar áreas de excavación a partir de los sondeos, perfiles, mapas, tomografías, bloques diagramas que se pueden obtener de una prospección geofísica.

En opinión de Lanata & Osella (2006), la arqueogeofísica ya ha dejado en gran medida de ser solamente una técnica que permitía delimitar las dimensiones de una estructura arqueológica. La multiplicidad de estudios que están al alcance de los investigadores hoy en día nos muestra un camino en el cual se unen la protección de patrimonio arqueológico, la exploración de grandes espacios a bajos costos, el modelado de usos humanos del espacio, y la recuperación selectiva de información paleoambiental, geomorfológica y paleoecológica.

Según Conveyrs (1999), la arqueogeofísica más que una herramienta para delimitar excavaciones o un mero elemento exploratorio, es un insumo básico para la formulación de modelos predictivos así como también para el mapeo y reconocimiento de rasgos arqueológicos subsuperficiales en grandes extensiones de terreno, en los que la excavación es

nula o innecesaria ya sea por problemas presupuestarios como también para preservar el registro arqueológico.

Algunos equipos o técnicas geofísicas, a pesar de ser apropiadas para la prospección arqueológica, pueden no estar disponibles para su utilización, y su adquisición (compra o alquiler) generalmente es costosa.

El objetivo arqueológico es, geofísicamente hablando una anomalía, y en el campo generalmente hay otras fuentes de anomalías que pueden alterar y/o confundirse con anomalías causadas por actividades culturales en magnitudes importantes. Esto puede ser resuelto con el empleo de distintos métodos que reduzcan esta ambigüedad propia de la *no unicidad en la resolución del problema inverso en geofísica* (Cosensa & Arias, 2006), y con personal no solamente altamente capacitado, sino con experiencia en la prospección geofísica con fines arqueológicos.

El efecto de ruido ambiental, producto de la infraestructura como líneas de alta tensión, carreteras, vehículos estacionados, aparatos electrónicos cercanos (teléfonos celulares, computadores), objetos metálicos en la superficie del área de prospección (cercas eléctricas, piezas de metal) o incluso objetos que porta la persona operaria del equipo como: zapatos con punta de metal, joyería que no sea de oro, monedas y otros, pueden ser fuente de error que se sobreponen con la señal generada por nuestro objetivo arqueológico, enmascarando la anomalía de interés. Otras fuentes de ruido pueden ser de origen natural como las tormentas eléctricas y hasta las fuertes precipitaciones.

Cuando el equipo de investigación geofísica no cuenta con suficiente experiencia en las aplicaciones para arqueología, la principal limitante y a su vez; fuente de error radica en la adaptación de los métodos de campo e interpretación de resultados a profundidades muy someras.

MÉTODOS

Las técnicas más utilizadas y apropiadas para trabajos arqueológicos son la resistividad eléctrica, utilizando diversos dispositivos como el wenner y polo – polo entre otros (Arias y Mojica 2003); la inducción electromagnética (Reynolds 1997); el GPR (Conyers 1996) y la magnetometría (Gaffney & Gates. 2003).

Geoeléctrica

Los métodos geoeléctricos se basan en la inyección de corriente continua a muy baja frecuencia para medir la resistividad del suelo al paso de esa corriente. Se utilizan dispositivos de cuatro electrodos que se clavan en el terreno a una separación determinada, la cual condiciona la profundidad de investigación prospectada.

Existe una notable variedad de dispositivos de medición (Schlumberger, Wenner, Polo-Polo, Dipolo-Dipolo, Cuadrado, entre otros), lo cual confiere a esta técnica una gran flexibilidad para investigar variaciones en la distribución de la resistividad del subsuelo, tanto lateral como a profundidad (Arias, 2007). Esta particularidad, junto con la abundante documentación y material interpretativo disponible, constituye una de las características más atractivas, a lo que también cabría añadir el costo relativamente bajo de la instrumentación necesaria para llevar a cabo las medidas en campo.

La resistividad eléctrica es un parámetro que exprime el inverso de la conductividad, y está relacionado con la capacidad de resistir al paso de la corriente, esta es una facultad estrechamente ligada a la naturaleza de las formaciones geológicas (composición mineralógica, edad, textura,

temperatura, presión), a la porosidad y permeabilidad del suelo y de las rocas, así como al contenido y tipo de los fluidos existentes entre los poros.

Arias (2007), indica que la geoelectrica es uno de los métodos geofísicos de prospección con mayor difusión y aplicación en las Ciencias de la Tierra. El equipo básico (figura 1), consta de un emisor de corriente eléctrica, una fuente de poder (batería), un receptor del voltaje generado en el suelo, cuatro electrodos metálicos con sus respectivos cables de conexión. En el caso del equipo del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas de la Universidad de Costa Rica, modelo Syscal R1 Plus SW 48, de la compañía Iris Instruments, tiene integrado emisor-receptor y fuente de poder.

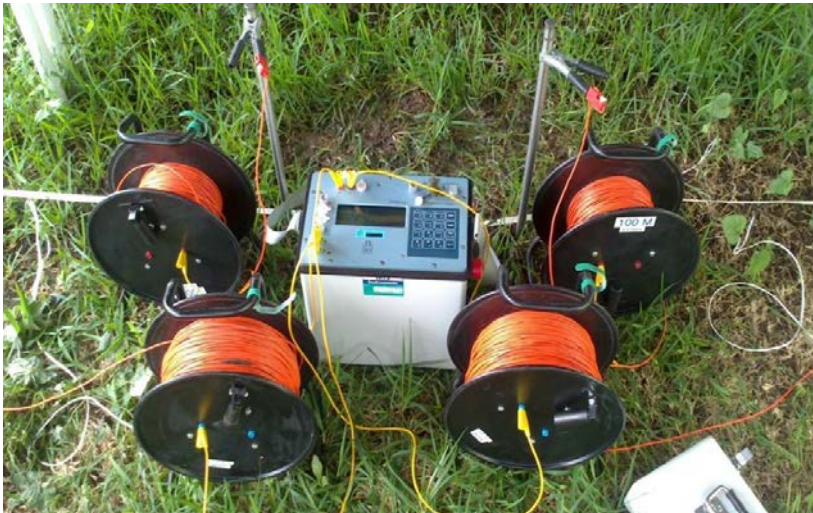


Figura 1: Equipo geoelectrico de prospección.

Estos métodos geofísicos consisten en la inyección de corriente eléctrica (I) al subsuelo y a partir del potencial (ΔV) generado en el mismo se determina la resistencia (R) del suelo. Este valor de resistencia es transformado a un valor de resistividad aparente (ρa), a partir de una constante geométrica (k) cuya magnitud dependerá del dispositivo empleado y de la separación de los electrodos, tanto de inyección de corriente (A, B) como de medición del potencial (M, N). La fórmula matemática utilizada para calcular la resistividad aparente del medio investigado para una determinada profundidad es la siguiente:

$$\rho a = k \frac{\Delta v}{I}$$

Dónde:

ρa resistividad aparente (Ohmio metro), ΔV diferencia de potencial (Voltio), I intensidad de corriente (Amperios), K coeficiente geométrico (adimensional)

14

Los dispositivos geoelectricos que brindan información uni, bi y tridimensional y hasta en cuatro dimensiones (considerando el tiempo) sobre una porción del terreno, se pueden representar entre otros en: sondeos, perfiles, cartografiado, pseudosecciones y tomografías eléctricas.

Un sondeo eléctrico vertical (SEV), determina la variación de la resistividad del suelo en función de la profundidad para el mismo sitio de interés, en general conforme se aumenta la separación de los electrodos, se aumenta la profundidad de investigación. Utiliza cuatro electrodos geoelectricos (A, B, M, N), los cuales dependiendo de su ubicación y distancia dan origen a los diversos dispositivos existentes. En estos sondeos, el centro del dispositivo de los electrodos es fijo y el espaciamiento entre ellos va aumentando para obtener información a mayor profundidad. (Arias, 2007).

El dispositivo Schlumberger (figura 2) consta de dos electrodos (M y N) que miden la diferencia de potencial “mV” (en milivoltios), los cuales, están ubicados en medio de otros dos electrodos (A y B) en los que se inyecta la corriente “I” (en miliamperios). La relación AB / MN debe ser lo más grande posible, cumpliéndose que AB debe ser al menos de cuatro a veinte veces mayor que MN. (Arias, 2002).

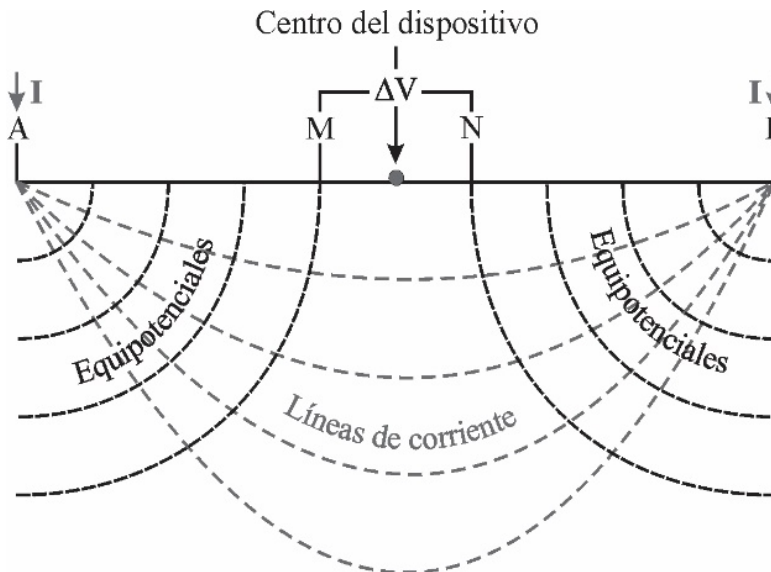


Figura 2. Esquema General del Dispositivo Schlumberger para un SEV.

La profundidad de prospección en el sondeo con dispositivo Schlumberger, está en parte en función de la separación AB, del medio y de la corriente, por lo que el procedimiento habitual contempla desplazamientos simétricos de A y B, los cuales han sido definidos previamente. La separación entre los electrodos M y N se mantiene constante, y solo debe aumentarse dicha

separación cuando medir la diferencia de potencial se torna difícil. El aspecto más importante en este dispositivo es mantener un voltaje suficientemente grande para ser medido, ya que conforme aumenta la separación entre A y B, la diferencia de potencial disminuye tal y como lo expone Arias (2002).

Por su parte, el perfil geoelectrico es la representación de la variación de la resistividad aparente a una profundidad determinada pero a lo largo de una línea de interés.

El cartografiado geoelectrico es un mapa de resistividad aparente, dibujado a partir de la correlación de varios perfiles con las mismas características de muestreo (separación de los electrodos y la sucesivas mediciones, profundidad de investigación, orientación de las líneas de perfil) evidencia las anomalías relativas que estarán en función de las propiedades geoelectricas del suelo, puede ser representado en planta (dos dimensiones) o como bloque diagrama (tres dimensiones).

El dispositivo OhmMapper, es un sistema diseñado para la medición de resistividades del subsuelo, especial para aquellas regiones en donde la exploración utilizando un sistema de resistividad convencional (SEV) resulta impráctico, lento y extensivo.

Su funcionamiento se basa en la propagación de una corriente eléctrica emitida por un transmisor electrónico, la cual electrifica dos cables coaxiales (dipolo transmisor), y es a su vez acoplada a la tierra a través de la capacitancia del cable, por su parte un receptor sintonizado automáticamente a la frecuencia del transmisor se encarga de medir el voltaje asociado recogido por los cables del dipolo receptor como una respuesta del medio ante el paso de la corriente emitida, este voltaje será proporcional a la resistividad del suelo ubicado en medio de los dipolos.

El OhmMapper está diseñado para ser halado a lo largo del terreno ya sea por una persona (figura 3) proporcionando un perfil de resistividad aparente del medio casi continuo. Algunas de sus ventajas con respecto a los sistemas de medición de resistividad convencionales es por ejemplo el poder ser manipulado por una sola persona, el no requerir electrodos metálicos, su bajo consumo de poder, además de un rápido ensamblaje y obtención de datos.

El equipo se caracteriza por la rápida adquisición al ser un método diseñado para investigaciones someras y más detalladas que los convencionales, además de tener un alcance mayor en sitios de difícil obtención como por ejemplo caminos pavimentados, donde influye tiempo que se consume al clavar los electrodos en pavimento, asfalto, roca dura, suelo húmedo o terreno congelado, bajo condiciones ambientales extremas.

17



Figura 3: Esquema del arreglo y componentes del dispositivo OhmMapper.

Previo a la utilización del OhmMapper es necesario definir la configuración del arreglo dipolo-dipolo a utilizar, incluyendo el espaciamiento entre los electrodos, la distancia entre los dipolos, así como también la línea de medición y la distancia entre cada punto de medición. Esta información resulta necesaria para calcular el factor n utilizado tanto para la elaboración de pseudosecciones o bien para exportar a diferentes software de inversión.

La profundidad máxima a la que el OhmMapper puede detectar cambios de resistividad en cualquier localización depende de la separación máxima entre el transmisor y el receptor, en el que la señal del transmisor puede ser detectada y decodificada de forma fiable. En otras palabras la máxima profundidad de investigación dependerá de que tan lejos el receptor pueda detectar la señal del transmisor.

En general, la atenuación de la señal es rápida tanto en medios conductores como resistivos, pero debido a que la señal comienza mucho más baja en suelos conductores suele desaparecer mucho más rápido, por lo tanto, el transmisor puede ser detectado a una mayor separación por el receptor en medios resistivos que en medios con características más conductivas.

Magnetometría

La magnetometría es el método geofísico de prospección más antiguo. Durante la Edad Media en Suecia se usaban brújulas para encontrar magnetita y la magnetometría todavía es el método más utilizado en la geofísica aplicada (Milsom, 1989) y de prospección arqueológica (Gaffney & Gater, 2003). El método de la magnetometría trabaja con las propiedades físicas del magnetismo de la tierra (Aitken, 1961; Arias, 1998; Garrison, 2003).

En la arqueología, los magnetómetros detectan alteraciones magnéticas causadas por las variaciones en el óxido férrico que son producidas arqueológicamente, y están normalmente presentes en la mayoría de los rasgos o restos antrópicos (Aitken, 1961). Los magnetómetros son particularmente útiles para encontrar rasgos quemados como hornos, pisos de arcilla cocinada o estructuras destruidas por fuego, así el uso de las técnicas magnéticas se desarrolló en la arqueología específicamente para la detección de hornos para fabricar cerámica en sitios romanos en Inglaterra (Aitken, 1961).

Las aplicaciones con métodos magnéticos son limitadas en áreas urbanas por la presencia abundante de las construcciones modernas hechas con materiales que tienen una susceptibilidad magnética más alta. Esa limitación es particularmente problemática en la arqueología de sitios precolombinos por el contraste bajo de los rasgos en comparación con los rasgos más modernos que usualmente contienen objetos o fragmentos de metal. Sin embargo, las mediciones son posibles gracias a los avances en la tecnología del software de interpretación (Arias y Mojica, 2003).

Hasta hace pocos años, el equipo utilizado era un Magnetómetro de Protones para la prospección arqueológica, sin embargo; el equipo más moderno y con mayor poder de resolución actualmente es el Gradiómetro de Cesio G-8586AP. El Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas de la Universidad de Costa Rica, cuenta con uno de la compañía Geometric, que permite medir tanto el campo magnético total como el gradiente magnético en posición vertical y/o horizontal, según sea el objetivo de la investigación (figura 4).



Figura 4: Gradiómetro de Cesio, con antena de posicionamiento global, montado sobre carreta para desplazarse en el campo

Con fines arqueológicos se prefiere realizar la prospección magnética utilizando la metodología del gradiente magnético, es decir; tomando la diferencia entre dos campos magnéticos distintos por estar a diferentes elevaciones, para generar los mapas de la sub-superficie. Cada campo se encuentra en una altura diferente arriba de la superficie del suelo. Esa metodología tiene la ventaja sobre la prospección que utiliza el campo magnético total por ser más sencilla para la fase de procesamiento y de interpretación.

La prospección se realiza caminando sobre los transectos (líneas de perfil) y tomando mediciones cada intervalo de tiempo o de distancia.

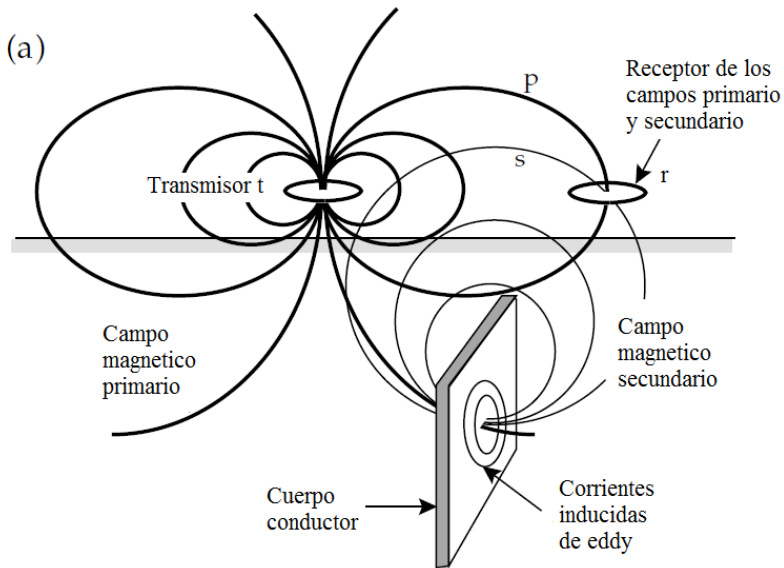
En ambientes geológicos complejos como es el caso de Costa Rica, se prefiere el método del gradiente vertical por su habilidad de detectar anomalías superficiales con más precisión sin la interferencia de estructuras geológicas más grandes que se encuentren a mayor profundidad en la tierra. También por ser más rápido, ya que no se tiene que mantener una estación de referencia magnética, conocida como una estación base para controlar las variaciones diarias del campo magnético, ni realizar las correcciones respectivas a esta estación base.

Electromagnéticos

Este método consiste en estudiar la respuesta de la propagación de ondas electromagnéticas a través de los materiales, las cuales se componen de vectores ortogonales definidos como intensidad eléctrica y fuerza magnética (Geonics, 1980). En términos generales, el funcionamiento de los métodos electromagnéticos se describen por medio de una bobina transmisora que genera un campo electromagnético primario y que se propaga tanto encima como por debajo de la superficie, la respuesta del medio genera por su parte, un campo electromagnético secundario el cual es detectado por una segunda bobina receptora.

En casos donde la subsuperficie presenta un medio conductor, el componente magnético de la onda incidente genera corrientes parásitas (Eddy currents) en dicho medio conductor. Estas corrientes a su vez, generan su propio campo electromagnético el cual es detectado por el receptor (Reynolds, 1997).

La bobina receptora responde ante el resultado del campo primario y secundario, por lo que dicha respuesta va a diferir tanto en fase como amplitud con respecto al campo primario. Es el grado en el que estos componentes difieren el que revela información del subsuelo. Una idealización gráfica de este proceso se puede observar en la figura 5.



22

Figura 5. Representación idealizada del método de la prospección electromagnética (Tomado y modificado de Lowrie, 2007).

Entre todos los métodos geofísicos, los Electromagnéticos son los que tienen la mayor variedad de instrumentos que cualquiera y muestran una gran diversidad geográfica, ya que la mayoría son solo utilizados en la zona donde fueron desarrollados. Los

primeros fueron usados en 1935 por Karl Sundberg en Suecia para la exploración de minerales, y también para el mapeo estructural en la exploración de hidrocarburos. La mayoría estuvo disponible comercialmente después de la Segunda Guerra Mundial, y particularmente después de 1960. Últimamente aumentó su uso para fines ambientales.

El perfilaje electromagnético es utilizado para detectar cambios en la conductividad eléctrica lateral, en contraposición con la técnica de los sondeos que pretenden determinar las variaciones de la conductividad del subsuelo en función de la profundidad.

En el caso del perfil, se han desarrollado gran variedad de métodos, entre ellos: VLF; AMT, Slingram, sistemas de gran bobina (Turam y Sundberg), entre otros.

En el caso de sondeos, predominan los métodos telúricos, AMT, y en el dominio temporal.

En general, este tipo de técnicas electromagnéticas se pueden distinguir dos familias principales; la primera de ellas está relacionada con las frecuencias de operación y da nacimiento a los Métodos Electromagnéticos en el Dominio de las Frecuencias (FDEM, por su denominación en inglés). La segunda familia, es la que utiliza el tiempo como parámetro fundamental para variar la profundidad de investigación prospectada y da cabida a los Métodos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (TDEM, por su denominación en inglés).

Se llama métodos electromagnéticos pasivos a aquellos que utilizan señales naturales generadas por el terreno (por ejemplo en prospección magneto-telúrica), y activos a aquellos donde se usa un transmisor artificial como es en el caso del Georadar (Reynolds, 1997; Kearey *et al*, 2002).

Los métodos electromagnéticos en el dominio de las frecuencias (también conocidos como conductímetros), en general pueden considerarse sistemas Slingram de bobina emisora y receptora móviles si bien con una gran diferencia. Fijada una distancia entre bobinas, la frecuencia de emisión es muy pequeña de forma que la profundidad efectiva o efecto de piel es siempre significativamente mayor que dicha distancia. Esta condición se conoce como operación a bajo número de inducción.

Algunos de los principales tipos de equipos electromagnéticos utilizados en arqueología son:

Conductímetros: brindan mediciones en superficie de la conductividad del suelo y de la susceptibilidad magnética, permiten determinar y caracterizar estructuras anómalas producto tanto de la actividad antrópica como natural.

Detectores de metales: permiten revelar una amplia gama de artefactos metálicos, incluyendo monedas y objetos de oro que podrían estar enterrados juntos. La profundidad de investigación puede llegar hasta 5,5 m (equipo EM-61MK2) e incluso se puede utilizar bajo el agua (equipo EM-61S).

Los dispositivos llamados Slimgram: su nombre hace referencia a dispositivos con dos bobinas pequeñas y fijas, fue desarrollado en Suecia en la década de 1930. La separación de las bobinas va a condicionar la profundidad de investigación a la que tienen acceso, pues algunos de ellos prospectan entre 0,75 y 1,5 m (equipo EM-38), 4 m (equipo EM-31SH) y 6 m (equipo EM-31) y entre los 7,5 m y 60 m (equipo EM-34).

Las figuras 6, 7 y 8, muestran varios de los equipos tipo Slimgram de la compañía Geonics, que están disponibles en la Universidad de Costa Rica.



Figura 6. Equipo electromagnético EM-34, utilizado en el sitio Agua Caliente, 2003.

25



Figura 7. Equipo electromagnético EM-38. Foto tomada en Sámara con fines hidrogeológicos.



Figura 8. Equipo electromagnético EM-31. Foto tomada en Sámara con fines hidrogeológicos.

Georadar del subsuelo (GPR)

El método Georadar (GPR, por su denominación en inglés) ha sido ampliamente descrito en la literatura arqueológica (Conyers y Goodman 1997), por lo que solamente se incluye un breve resumen de sus principios y aplicaciones.

Su poder de resolución en arqueología se debe a que se puede obtener una imagen muy detallada de las discontinuidades del subsuelo sean estas naturales o antrópicas, en tiempo real. Sin embargo; presenta una desventaja importante para nuestro medio geológico tropical y es la atenuación de la señal electromagnética debida a la existencia de estratos conductores (suelos arcillosos) que reducen en algunos casos la profundidad de investigación a tan solo pocos metros en el mejor de los casos.

El Georadar, es un método geofísico no invasivo que usa ondas electromagnéticas para obtener información del subsuelo (Reynolds, 1997). El dispositivo consta de un generador de señales, una antena transmisora y otra receptora y un computador capaz de almacenar los datos (figura 9).



Figura 9: Georadar del subsuelo utilizado en el sitio La Trinidad.

El Georadar se basa en la transmisión de impulsos electromagnéticos de alta frecuencia por medio de una antena colocada cerca el suelo. Al encontrar discontinuidades enterradas, estos impulsos se reflejan nuevamente en dirección a la superficie. Se mide el tiempo que transcurre entre la emisión del impulso y su recepción por una segunda antena de radar. Las discontinuidades donde se reflejan los impulsos son creadas

por cambios en las propiedades dieléctricas del suelo, variaciones en el contenido de agua, o cambios de densidad en interfaces estratigráficas. Las reflexiones también ocurren en la interfase entre los rasgos arqueológicos y el suelo circundante. Espacios vacíos, tales como cámaras, túneles o escondites, también generan reflexiones significativas (Conyers & Goodman, 1997).

Una ventaja significativa del método de GPR en comparación con otros métodos geofísicos es la posibilidad de medir directamente la profundidad de los rasgos detectados. Puesto que se mide el tiempo que transcurre entre la emisión y la detección de los impulsos electromagnéticos, es posible determinar la distancia que han recorrido, si se conoce la velocidad a la que viajan estos impulsos en el suelo. Para determinar esta velocidad, se efectúan pruebas enterrando artefactos de metal en los perfiles de pozos de excavación, y emitiendo impulsos de GPR en dirección a ellos desde la superficie.

Otra ventaja del método es la posibilidad de obtener cortes de tiempo que representan en dos dimensiones los rasgos encontrados a diferentes profundidades en el suelo. Esto se logra por medio de programas de computadora desarrollados en años recientes. Cuando se llenan las condiciones ideales para la utilización del método de GPR, los resultados son excepcionales.

Por otra parte, es necesario hacer ver algunas desventajas. El costo del alquiler del equipo es alto. Aunque su manejo es un proceso simple, la interpretación de los resultados para obtener las gráficas de cortes de tiempo es un trabajo especializado, por lo que es recomendable contar con los servicios de un experto en las características del suelo que van a influir en el modelo de velocidad del GPR, lo cual puede elevar significativamente los costos. Sin embargo, estos costos deben sopesarse en comparación con el costo que representaría una prospección

semejante por métodos tradicionales de excavación, que no solamente son mayores sino que en la mayoría de los casos resulta imposible cubrir áreas tan extensas.

Existen dos tipos de georadar diferenciados según las frecuencias de la antena principal: los de menos o igual de 500 MHz para aplicaciones donde la profundidad es más importante que la resolución y aquellos con frecuencias mayores a 500 MHz (hasta 1 GHz) para resoluciones más finas (Reynolds, 1997). La profundidad de penetración ronda los 20 m, sin embargo; pueden alcanzarse hasta 50 m bajo condiciones óptimas de baja atenuación de la onda electromagnética, a cambio de una pobre resolución (Kearey et al., 2002).

El funcionamiento del georadar se basa en la reflexión de las ondas electromagnéticas generadas por el dispositivo, las cuales al encontrarse con un material (cuyas propiedades electromagnéticas dependen de la composición y otros factores), cambian de velocidad y llegan a la antena receptora con un retraso (Kearey et al., 2002).

El método emplea una antena emisora para dirigir pulsos electromagnéticos de 1- 20 ns de duración hacia el interior del terreno. Este frente de ondas es parcialmente reflejado al encontrar una discontinuidad o un cambio de material en el subsuelo, pudiendo ser detectado en superficie por medio de otra antena.

La adquisición de los datos suele realizarse orientando la antena hacia el subsuelo y registrando las reflexiones detectadas tras la emisión del impulso electromagnético, obteniendo así una traza. De esta forma, el eje de las abscisas del radar grama representa el movimiento de la antena en una dirección, mientras que el eje de ordenadas muestra el tiempo de retardo entre la medición y la detección (tiempo de ida y regreso), y en el caso del modelo Gepard, se obtiene directamente la profundidad de prospección.

Después de los procesos de filtrado, la sumatoria de las trazas, se pueden convertir en un reflector continuo que ofrece una sensación de continuidad que facilita la interpretación.

Cuando se llevan a cabo ensayos en laboratorio y sobre todo en campo, son varias las problemáticas que durante la adquisición de datos con radar de subsuelo pueden superponer el ruido sobre la señal, dificultando la posterior interpretación (Travera, 2008).

Algunos de los problemas más habituales que se presentan al realizar un trabajo de campo y que hay que contemplar son:

- Las reflexiones externas

Pueden ocasionarse cuando parte de la energía se propaga en otras direcciones fuera de la principal y su trayectoria se encuentra a un cambio brusco de los parámetros electromagnéticos (una pared, un vehículo, un techo). Son ocasionadas en reflectores situados fuera del medio analizado, localizados cerca de la antena. Dichas reflexiones se producen cuando se trabaja con antenas con bajo nivel de apantallamiento, si en algún punto próximo al perfil hay un elemento fuertemente reflector, y si el rango de los registros es suficientemente grande para que quede registrada la reflexión que se produce en éste.

En este caso, el medio por el que se propagan estas reflexiones externas suele ser el aire y la velocidad de propagación se puede aproximar por la velocidad de una onda electromagnética en el vacío. Como en este medio no se produce atenuación por absorción, la intensidad de las reflexiones externas suele ser importante, por lo que el ruido que introducen en el registro es elevado.

Para identificar estas anomalías y separarlas de la señal es necesaria una cuidadosa adquisición de datos en la que quede constancia de los elementos próximos a la antena. El efecto de estos elementos se puede representar gráficamente para compararlo con los registros de campo obtenidos y averiguar si la anomalía se ha producido en dichos elementos.

- Cambios laterales en la velocidad de propagación de la onda.

Las variaciones laterales de la permitividad eléctrica efectiva del medio ocasionan cambios en la velocidad de propagación de las ondas. Ocurren cuando en el medio se produce un cambio lateral en el comportamiento electromagnético, por cambios de material o de sus condiciones físicas (saturación y porosidad). Estos cambios han de tenerse en cuenta para obtener en cada caso una conversión adecuada de tiempos dobles de propagación en distancias. El medio se puede dividir en sectores, definido cada uno de ellos por una característica.

- Efectos de borde.

Es un problema similar a los cambios laterales en la velocidad de propagación internos al medio. Se trata de un cambio brusco de especial importancia en los ensayos de laboratorio, donde se suele trabajar con muestras de pequeñas dimensiones. Al situar la antena cerca del límite del medio se producen reflexiones en la discontinuidad medio-aire que se superponen a las que proceden del interior del medio. Analizando la superficie irradiada por la antena, se puede estimar la distancia mínima entre la antena y el borde del medio a la que no se producen estos efectos.

- Reflexiones múltiples

El problema de las reflexiones múltiples se produce sobre todo cuando en un medio poco atenuante hay una superficie fuertemente reflectora (por ejemplo una lámina metálica). Se producen en este caso reverberaciones. El ruido generado en este caso es elevado y puede ocultar totalmente la señal a partir del punto en el que se registra. En ocasiones, un tratamiento de señales llamado “deconvolución predictiva” puede disminuir el ruido que este efecto produce en la señal.

- Efectos de reflectores de pequeño tamaño próximos entre sí

En algunos casos, no se pueden separar las anomalías debidas a cada uno de los elementos registrados, si están cercanos y son pequeños, por ejemplo, cuando la superficie irradiada por la antena abarca dos elementos, éstos pueden quedar registrados como un único elemento; pero pueden separarse cuando la distancia entre ambos es igual o mayor a la huella de la antena, es decir, cuando dicha distancia es mayor a la resolución horizontal del estudio.

- Desplazamiento del espectro hacia las bajas frecuencias

Durante la propagación de las señales por el medio, aparece un efecto de filtrado que afecta, sobre todo, a las altas frecuencias. Este problema está fuertemente relacionado a la resolución, tanto vertical como horizontal, de tal manera que es conveniente analizar los espectros de amplitud para estimar la resolución. Cuando se analiza la resolución (vertical o longitud de la señal y horizontal o huella de la antena) hay que considerar la frecuencia de la señal ya que estos parámetros dependen de la frecuencia. Es importante, por lo tanto, analizar su comportamiento durante la propagación por el medio y estudiar el filtrado de las altas frecuencias que se produce.

SITIO HUNTER ROBINSON

El objetivo de esta prospección, realizada en el año 2007, fue la realizar un cartografiado geoelectrico con el fin de observar variaciones de la resistividad del suelo que pudieran ser de interés desde el punto de vista arqueológico.

La secuencia utilizada en esta investigación constó de cinco etapas: Planteamiento, Planificación, Medición, Procesamiento e Interpretación.

Etapa de Planteamiento: en ella, se definió la situación a investigar, la cual fue buscar anomalías en la resistividad del suelo que pudieran indicar: variaciones de espesor; remoción de suelos y/o estructuras de formas geométricas, tanto conductoras como resistentes que fueran de origen antrópico.

Etapa de Planificación: Se tradujo en términos geofísicos la situación planteada, lo cual implicó elaborar el modelo geoelectrico del subsuelo cuya realidad quería comprobarse. En esta etapa, se realizó la selección de los métodos en función de la disponibilidad de los equipos y del poder de resolución de los mismos, además fue necesario definir el tipo, cantidad y distribución de las mediciones. En este caso particular, se consideró pertinente el perfilaje y cartografiado geoelectrico, pues permiten observar las variaciones de la resistividad en dos dimensiones, y el equipo requerido estaba disponible en ese momento. La figura 10, muestra la localización esquemática de los sitios prospectados.

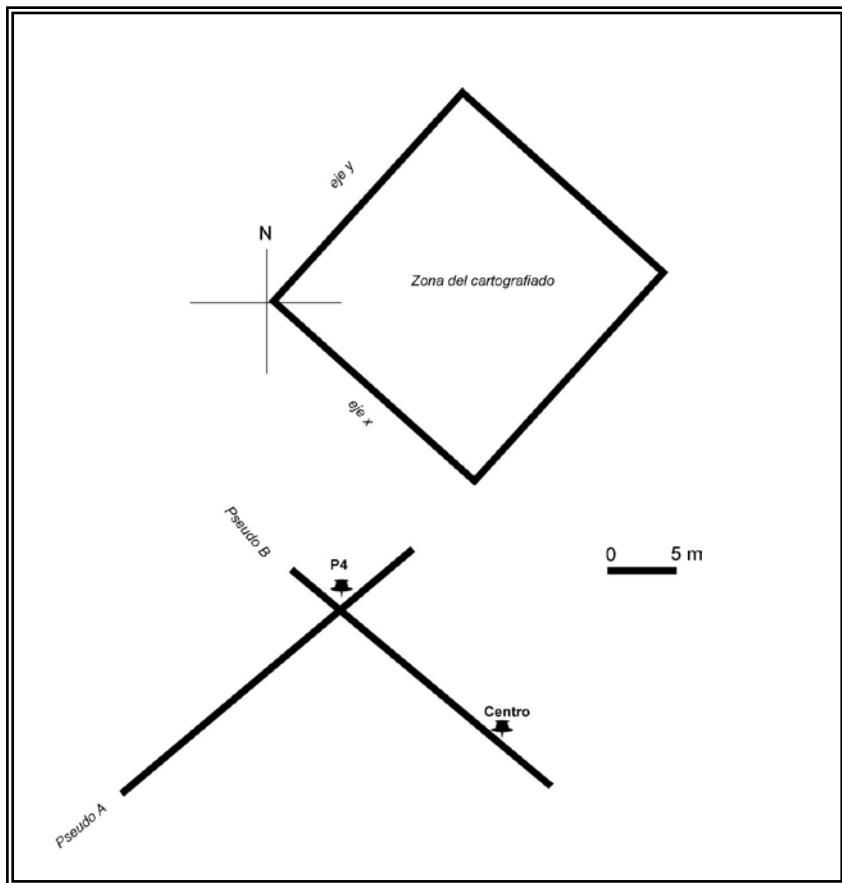


Figura 10: Diagrama de localización de las áreas prospectadas en el sitio Hunter Robinson.

Etapa de Medición: correspondió con la toma de datos en el campo. Etapa que se realizó considerando las características del terreno, así como del equipo de resistividad eléctrica utilizado marca ABEM tipo Terrameter SAS 1000 (Figura 11).



35

Figura 11: Equipo de resistividad eléctrica, marca ABEM, tipo Terrameter 1000. Consta de un emisor-receptor, cuatro bobinas de cable eléctrico, una batería y varios electrodos de emisión de corriente.

Para poder realizar las mediciones, es necesario conectar los electrodos por medio de cable eléctrico al equipo de resistividad eléctrica. Se procedió a inyectar corriente (con una intensidad de tan solo 10 mA) y medir la respuesta del suelo, es decir el valor de resistencia. Con el fin de obtener una mayor precisión en las mediciones, se trabajó con un promedio de cuatro inyecciones de corriente por cada punto de medición con el fin de obtener un valor promedio de la resistencia cuya desviación estándar siempre fuera inferior al 2 %.

Para el cartografiado geoelectrico lo primero fue hacer una revisión ocular observando características del sitio. Por recomendación del arqueólogo, se procedió a seleccionar el área para establecer una cuadrícula de medición (20 x 22 m) y en ella, se extendieron cintas métricas de topografía con el fin de definir el sector donde se realizarían las mediciones eléctricas. Se utilizó además una brújula para determinar el rumbo de las líneas de perfil. Se consideró oportuno elaborar varios perfiles paralelos y separados a un metro de distancia con el fin de correlacionarlos en un cartografiado geoelectrico detallado (Figura 12).



36

Figura 12: Detalle de la zona prospectada que fue delimitada con cintas métricas, obsérvese la localización de dos de los electrodos de medición en la configuración Polo-Polo.

Para la realización del cartografiado geoelectrico se definió el tipo de dispositivo eléctrico (en este caso el denominado Polo-Polo), la separación de los dos electrodos de medición es dependiente de la profundidad de investigación, por ello se realizaron mediciones con los electrodos separados cada metro ($a = 1 \text{ m}$), con un paso de muestreo de un metro ($s = 1 \text{ m}$), con el fin de poder graficar las variaciones de resistividad a una profundidad de 0,5 m. Los electrodos se van desplazando a lo largo de la línea de perfil con el objetivo de tener datos longitudinalmente, una vez concluidas las mediciones de un perfil, se realiza el siguiente perfil y así sucesivamente.

Con el fin de comprobar la posible ubicación de una tumba vertical, se realizaron dos pseudosecciones eléctricas para ello, se utilizó el dispositivo eléctrico Polo-Polo con una separación de los dos electrodos de medición en $a = 1 \text{ m}$ y $a = 4 \text{ m}$, con el fin de ver la variación de la resistividad eléctrica del suelo a las profundidades de 0,5 m y 2 m respectivamente, por su parte; el paso de muestreo utilizado en ambas pseudosecciones fue de un metro ($s = 1 \text{ m}$).

Los electrodos se conectan por medio de cable eléctrico al equipo de resistividad. Se procedió a inyectar corriente eléctrica (con una intensidad de 10 mA) y medir la respuesta del suelo. Los electrodos se van desplazando a lo largo de la línea de perfil con el objetivo de tener datos longitudinalmente y posteriormente se vuelve a repetir el perfil en la misma línea, pero con una separación de electrodos mayor con el fin de poder tener información a una mayor profundidad y correlacionarlos como una pseudosección eléctrica (Figura 13).

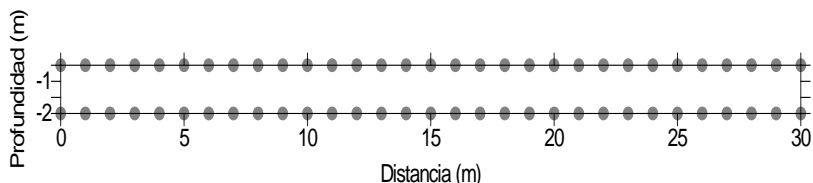


Figura 13: Distribución de los puntos de medición ($a = 1\text{ m}$ y $a = 4\text{ m}$) para la realización de las pseudosecciones eléctricas

Etapa de Procesamiento: una vez realizadas las mediciones, fue necesario convertir los datos en un documento útil para la interpretación de los resultados. Para ello, se procedió a digitar la información en el programa “Excel”, a calcular la profundidad máxima de investigación en cada perfil ($a/2$), a obtener el valor de la constante geométrica para cada caso ($k = 2\pi a$) y determinar el valor de resistividad aparente, la cual se representa en función de la ubicación (longitudinal y a profundidad) ya sea como mapas o correlación de perfiles tipo pseudosecciones con los programa Surfer 7 y Grapher 5 respectivamente.

38

Etapa de Interpretación: en esta etapa, los resultados geofísicos se expresan en un documento explicativo, destacándose los siguientes resultados:

Los dispositivos geoelectricos utilizados en esta investigación han puesto en evidencia contrastes de resistividad bien marcados y de utilidad para esclarecer el objetivo arqueogeofísico planteado.

En la figura 14, se aprecia homogeneidad en los valores de resistividad aparente del suelo, con un gradiente ascendente desde valores mayores a $35\ \Omega\text{m}$ hasta $70\ \Omega\text{m}$. Este gradiente es concordante con la topografía existente, encontrándose los valores más resistivos en los sectores más altos del sector prospectado.

Es evidente en el mapa de la figura 14, la existencia de al menos 17 anomalías conductoras que presentan una morfología muy regular, con dimensiones aproximadas de 1 m de ancho y alargadas con rumbo NE. Este tipo de estructuras no corresponden con variaciones naturales de resistividad del suelo, sino que deben ser forzosamente producto de actividad antrópica, ya sea excavaciones realizadas en exploraciones arqueológica previas o producto del huaquerismo, otra posibilidad sería la existencia de restos arqueológicos que contienen algún material conductor (arcillas). El hecho de que estas anomalías sean conductoras, indica que han sido rellenadas por material diferente al adyacente y/o que permitió la acumulación de agua en dichos sitios.

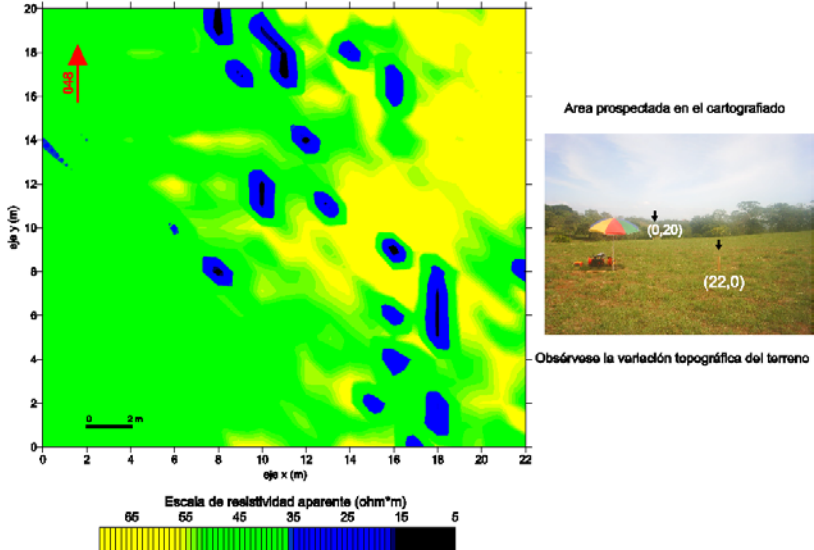
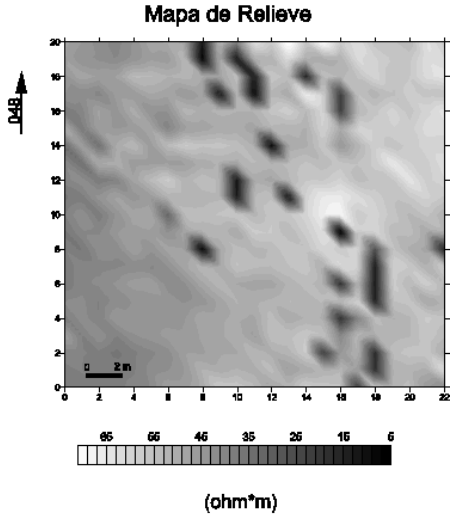
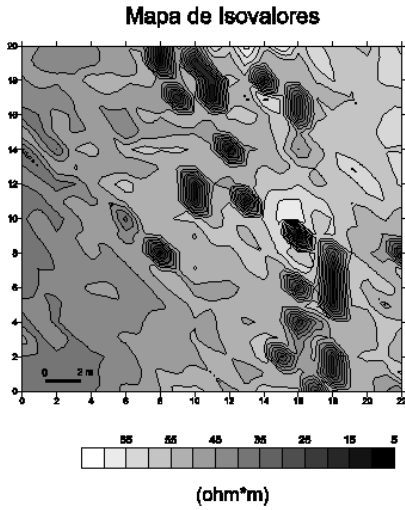


Figura 14: Cartografiado geoelectrico en el sitio



Modelo 3D de las anomalías geoelectricas

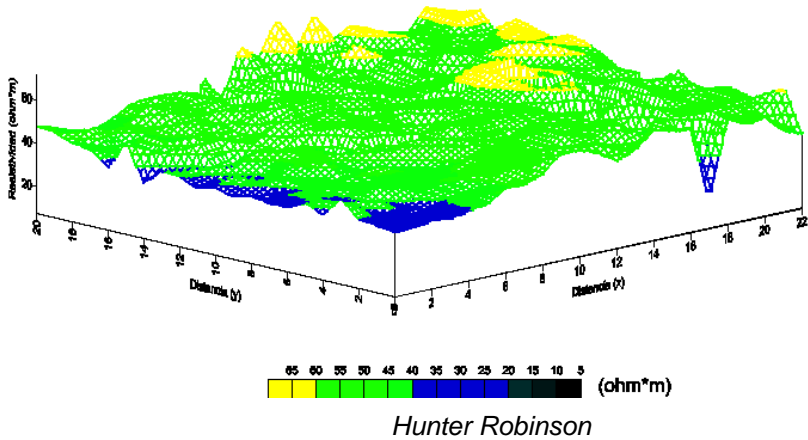


Figura 15: Mapas de isovalores, de relieve y tridimensional de las anomalías geoelectricas detectadas en el sitio Hunter Róbinson

Las imágenes de la figura 15, especialmente los mapas de isovalores y de relieve muestran con mayor claridad la distribución y características de las anomalías conductoras de origen antrópico. Por su parte; el modelo en tres dimensiones, muestra de una mejor manera el efecto ascendente de los valores de resistividad del suelo, el cual es concordante con la topografía existente. Se aprecia a su vez, el efecto de una anomalía conductora en la posición (17,0).

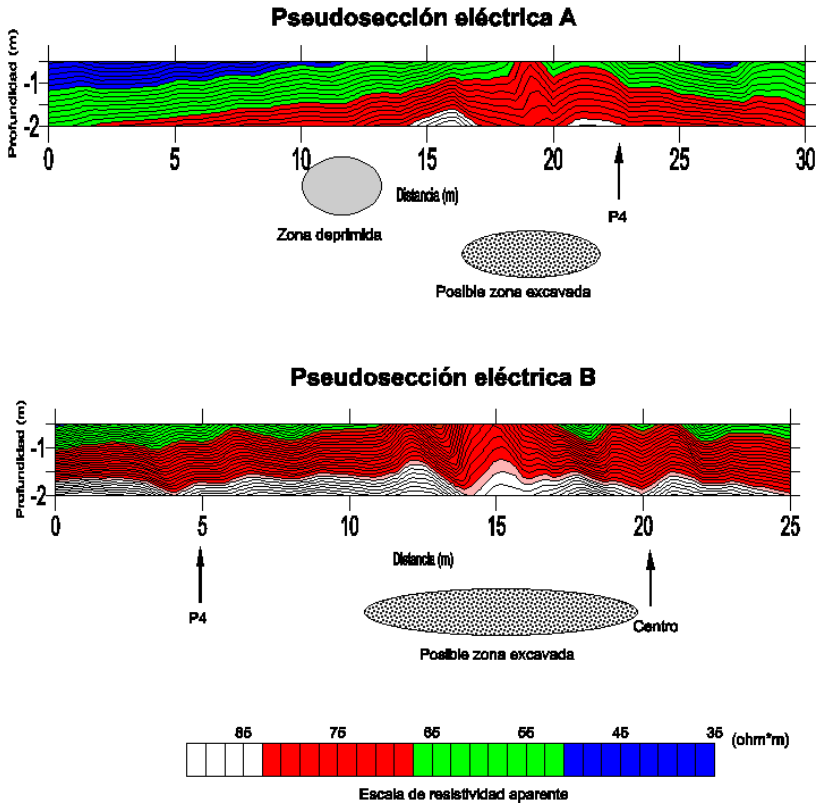
La figura 16, muestra las dos pseudosecciones eléctricas realizada (considerando la topografía plana) con el fin de caracterizar la ubicación de la fosa funeraria excavada en 1998.

La pseudosección eléctrica A, fue realizada con rumbo 050, tiene una longitud de 30 metros. Topográficamente hay un sector deprimido que se localiza entre los 10 y 13 m desde su origen y según el arqueólogo encargado podría ser la zona de excavación de la fosa funeraria. La imagen evidencia una correspondencia muy marcada de la forma de las isolíneas con la topografía, en el sector entre los 16 y 22 m se observan irregularidades en la forma general de las isolíneas, que pueden estar indicando remoción de suelo y que podría corresponder con la zona excavada en 1998.

Por su parte; la pseudosección B se realizó con un rumbo 140, tiene una longitud de 25 m. La imagen presenta las mismas características de la pseudosección anterior, pero en esta oportunidad la zona de posible excavación tiene un ancho de 10 m, los cuales corresponden también con una zona deprimida en topografía.

Así, las zonas donde las isolíneas de resistividad eléctrica muestran irregularidades correspondan con los sectores donde ha ocurrido remoción de suelo, alterando las características geoelectricas naturales del mismo, pudiendo corresponder estos sectores con la excavación realizada en 1998.

Considerando las dimensiones se propone como sitio de la fosa vertical, el sector localizado entre los 13 y 18 metros evidenciado en la pseudosección eléctrica B.



42

Figura 16: Pseudosecciones eléctricas realizadas en el sitio Hunter Robinson

Las recomendaciones ofrecidas a partir de la interpretación conjunta con la persona arqueóloga encargada del sitio, son:

A pesar de que existe un plano topográfico general de todo el sitio Hunter Robinson, es imperativo; que se georeferencien cada uno de los puntos de inicio de las zonas prospectadas con geoelectrónica (zona cartografiada y pseudosecciones), el levantamiento cartográfico debe incluir la ubicación en coordenadas y el detalle de las elevaciones topográficas del sitio. Esto con el fin de que no se pierda la ubicación de las estructuras determinadas en este estudio, como aparentemente ya pasó, con la fosa funeraria excavada en 1998.

La existencia de al menos 17 anomalías de características conductoras en el área explorada con el cartografiado geoelectrónico, ofrece muchas posibilidades de investigación arqueológica, por lo que se recomienda la utilización de métodos tradicionales –como pozos de prueba, excavaciones– en los sitios que presentan esta respuesta conductora, con el fin de esclarecer su origen.

La localización exacta de la fosa funeraria vertical excavada en 1998, debe ser definida contemplando diversos criterios entre ellos: arqueológicos, topográficos y geofísicos. En este caso particular y considerando las evidencias geoelectrónicas se recomienda considerar el sector localizado entre los 13 y 18 metros evidenciado en la pseudosección eléctrica B

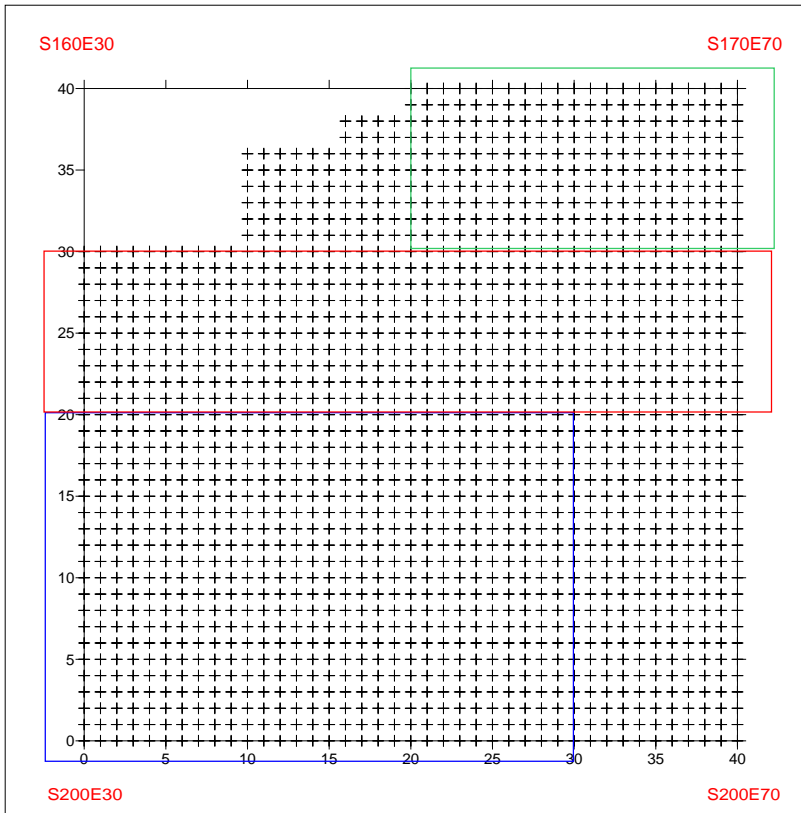
SITIO MANZANILLO

El objetivo de esta prospección realizada en el año 2009, fue realizar de un cartografiado geomagnético con el fin de observar variaciones de la magnetización natural del suelo que pudieran ser de interés desde el punto de vista arqueológico. La secuencia utilizada en esta investigación constó de cinco etapas: Planteamiento, Planificación, Medición, Procesamiento e Interpretación.

Etapa de Planteamiento: en ella, se definió la situación a investigar, la cual fue buscar anomalías en el gradiente magnético del suelo que pudieran indicar: variaciones de espesor; remoción de suelos y/o estructuras de formas geométricas que fueran de origen antrópico.

Etapa de Planificación: En esta etapa, se realizó la selección de los métodos en función de la disponibilidad de los equipos y del poder de resolución de los mismos, además fue necesario definir el tipo, cantidad y distribución de las mediciones. En este caso particular, se consideró pertinente el cartografiado magnético, pues permiten observar las variaciones del gradiente magnético en dos dimensiones, y el equipo requerido estaba disponible en ese momento.

Etapa de Medición: correspondió con la toma de datos en el campo. Etapa que se realizó considerando las características del terreno, y la distribución de tiempo: Por ello, en la figura 17, se aprecia la demarcación de tres zonas, las cuales corresponden con los segmentos de trabajo realizados, que son importante tener presentes, pues su configuración puede tener repercusión en la tendencia de las isolíneas obtenidas en la etapa de procesamiento de datos.



- Zona prospectada en Manzanillo
- Localización de punto de muestreo
- Zona 1
- Zona 2
- Zona 3

La numeración en rojo, corresponde al sistema de referencia establecido con anterioridad por el departamento de Topografía de la compañía y asumido en este trabajo.

Figura 17: Diagrama de localización de las áreas prospectadas en el sitio Manzanillo

Para el cartografiado geomagnético lo primero fue hacer una revisión ocular observando características del sitio. Por recomendación del arqueólogo, se procedió a seleccionar el área para establecer una cuadrícula de medición aproximada (40 x 40 m) y en ella, se extendieron cintas métricas de topografía con el fin de definir el sector donde se realizarían las mediciones magnéticas. Se utilizó además una brújula para determinar el rumbo de las líneas de perfil. Se consideró oportuno elaborar varios perfiles paralelos y separados a un metro de distancia con el fin de correlacionarlos en un cartografiado magnético detallado (Figura 18).



46

Figura 18: Detalle de la zona prospectada que fue delimitada con cintas métricas

Para la realización del cartografiado geomagnético, se definió el tipo de dispositivo magnético a utilizar, en este caso; se consideró que el dispositivo de gradiente magnético era el más conveniente. Este dispositivo consiste en realizar mediciones del campo magnético a una altura determinada del sensor y simultáneamente o a una diferencia temporal muy pequeña realizar otra medición en el mismo sitio, pero con el sensor a una altura mayor, tal y como lo muestra la figura 19 A y 19 B.



Figura 19: A) pedestal del sensor a nivel de suelo, B) pedestal del sensor a una elevación mayor.

La prospección se realizó caminando sobre las líneas de perfil y tomando dos mediciones en cada punto. Se hizo de esta manera para obtener el gradiente vertical, que representa la diferencia entre los dos campos magnéticos del mismo punto geográfico tomados al mismo tiempo, dividida entre la distancia de los dos sensores.

El número de participantes en la recolección de datos fue de dos personas, una para llevar el sensor sobre las líneas de perfil y operar el aparato para hacer las mediciones y otra para escribir cada medición en un diario de campo. Sin embargo, en el caso de la prospección magnética, no se pueden rotar las personas porque el equipo es demasiado sensible y se puede mostrar una diferencia perceptible en los datos recogidos.

Por la sensibilidad del magnetómetro a los efectos de los artículos de metal, la persona que lleva el equipo no debe portar ningún artículo electrónico ni de metal (con la excepción de oro y aluminio) durante la prospección. Además, para evitar efecto de las mediciones de campo, se decidió no realizar las mediciones con el sistema de zigzag, sino más bien; una vez que se termina una línea de perfil, se regresó al punto de origen para comenzar la siguiente línea de perfil.

Etapas de Procesamiento: una vez realizadas las mediciones, fue necesario convertir los datos en un documento útil para la interpretación de los resultados. Para ello, se procedió a digitar la información en el programa "Excel", a obtener la diferencia en los valores de campo magnético y a obtener el valor de gradiente magnético.

Las 1550 mediciones de gradiente magnético, fueron procesados con el programa Surfer 8, para realizar una interpolación de tipo lineal/triangulación, para poder representar los datos como un mapa de isolíneas denominado: mapa de gradiente magnético.

Etapa de Interpretación: en esta etapa, los resultados geofísicos se expresan en un documento explicativo, destacándose los siguientes resultados:

En la figura 20, se han representado diversos mapas, con el fin de tener mayor claridad a la hora de interpretar las zonas de mayor interés arqueológico.

El mapa A) corresponde con la imagen de isolíneas cada 100 nT/m, que da una idea de la distribución y concentración de valores positivos (más claros) y negativos (más oscuros), la figura B) presenta las mismas características, pero sin la representación de las isolíneas, solamente muestra las tendencias. Por su parte; los mapas C), D) y E) son representaciones de las tendencias con diferente intervalo de interpolación, lo cual está en función del grado de detalle posible en cada uno de estos mapas siendo: 250, 50 y 10 nT/m, respectivamente. El mapa F) una imagen del relieve de anomalías.

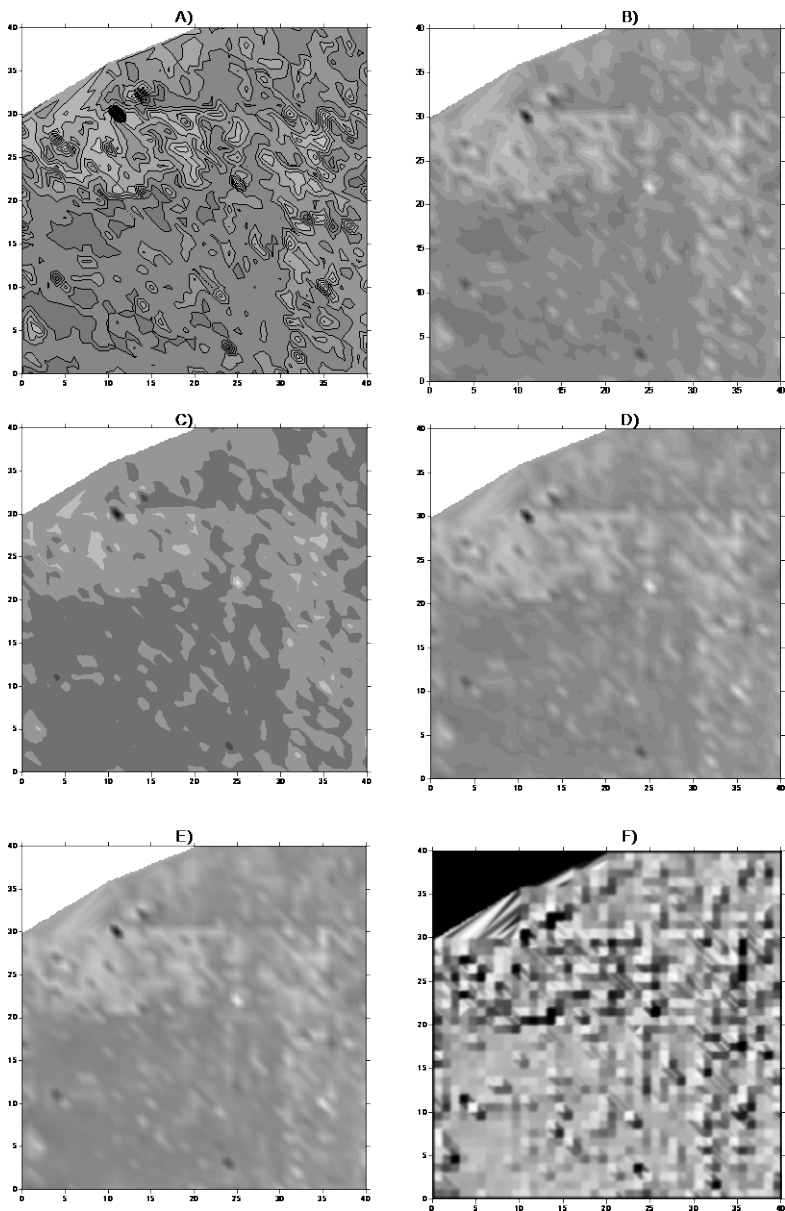
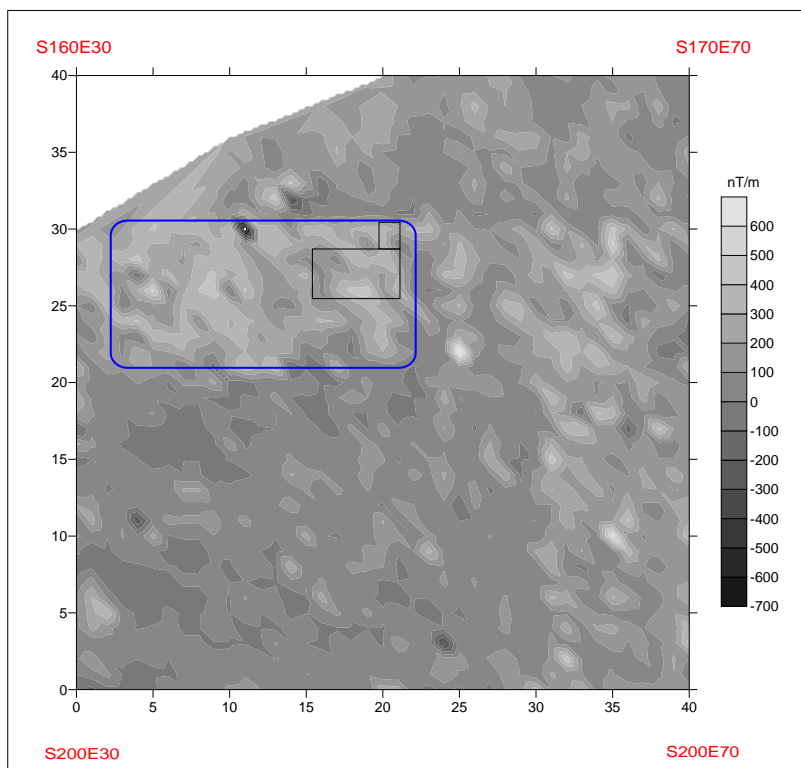


Figura 20: Representación geomagnética de la zona prospectada

A partir de la figura 20, se desprende que la imagen que presenta una mejor resolución para la interpretación es la graficada cada 100 nT/m, por lo anterior, esta será la utilizada en la figura 21, para establecer las correlaciones e interpretaciones correspondientes.



Sector excavado (módulo 23)



Área de mayor interés

Figura 21: Mapa geomagnético prospectado.

Este mapa de la figura 21, muestra de manera muy bien marcada una serie de lineamientos tanto horizontales como verticales que corresponden con los límites de las zonas de trabajo, lo cual pone en evidencia el grado de sensibilidad de la metodología utilizada y de la necesidad de tomar esto en cuenta para no caer en falsas interpretaciones.

Otro elemento, que hay que considerar a la hora de interpretar esta imagen, es el efecto topográfico del sitio, si bien es cierto; presenta una topografía muy homogénea, también es evidente que en los últimos meses, el suelo ha sido alterado por la acción de un tractor que rellenó parcialmente algunos sectores, e incluso aún se pueden ver surcos generados por el paso del tractor, los cuales han quedado reflejados en la prospección, pues hay una tendencia general de alineamiento de anomalías en sentido NW-SE.

Se puede observar, que en la esquina inferior izquierda del mapa, el gradiente magnético es muy homogéneo (predominancia de tonos grises oscuros), lo cual indica que el suelo es también relativamente homogéneo en sus composición litológica, por lo menos hasta un metro de profundidad. El hecho de que según la escala de colores, correspondan con valores negativos de gradiente magnético, se explica porque el campo magnético en superficie es mayor que el que se encuentra en profundidad.

El sector donde previamente se había excavado con resultados satisfactorios desde el punto de vista arqueológico (módulo 23), se caracteriza por la presencia de anomalías tanto circulares y alongadas con tonos gris claro, correspondiente a valores positivos del gradiente magnético, esto se explica porque las rocas que se encuentran a un metro de profundidad presentan una mayor imantación producto de la presencia de minerales ferromagnesianos, lo cual concuerda con los bloques de lava e ignimbrita encontrados como base y techo de las estructuras arqueológicas (tumba).

A partir de este tipo de asociaciones, es evidente; que el sector alledaño al módulo 23, y que presenta las mismas características geomagnéticas, debe presentar las mismas características litológicas a la profundidad de un metro. Si bien; se considera que litológicamente este sector del sitio Manzanillo corresponde con un depósito coluvial, en el cual podría existir material heterogéneo (bloques de lava e ignimbrita) el patrón mostrado por el mapa de gradiente magnético, en el cual hay anomalías puntuales, estas no podrían ser generadas por un solo fragmento de roca, sino por la asociación de varios de ellos; los cuales se deben encontrar agrupados no por actividad natural sino antrópica. Es por ello, que se considera ese sector como el de mayor interés desde el punto de vista arqueológico.

En la parte norte y central del límite de esta zona de interés, se aprecia la anomalía con valores más negativos de gradiente magnético (zona más oscura del mapa), misma que sería interesante excavar para ver el porqué de ese contraste tan fuerte.

La figura 22, es una representación en tres dimensiones de las anomalías geomagnéticas encontradas en la prospección realizada en este sector del sitio Manzanillo. A partir del punto de observación (coordenadas 0,0) se puede apreciar una tendencia de alineamiento circular de anomalías correspondientes a valores negativos de gradiente magnético, mismas que podrían estar asociadas con algún límite de una estructura de piedra a una escala mayor.

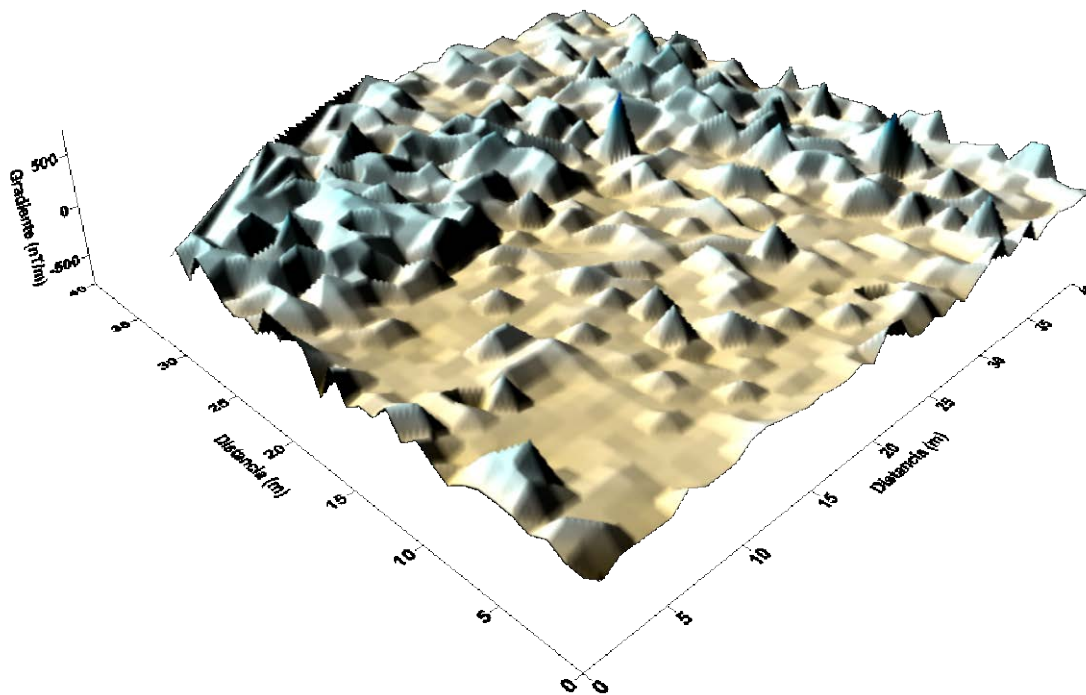


Figura 22: Representación en tres dimensiones del cartografiado geomagnético

SITIO DE LA BATALLA LA TRINIDAD

El objetivo de esta prospección fue prospectar con diversos métodos geofísicos, una terraza con una superficie aproximada de 1 hectárea que se localiza en la confluencia del río Sarapiquí con el río San Juan, lugar en el cual se desarrolló la Batalla de La Trinidad, con la propósito de identificar sitios posibles de interés arqueológico.

La secuencia utilizada en esta prospección, consta de cinco etapas:

Planeamiento: en ella, se definió el problema que se quiere investigar.

Planificación: traducir en términos geofísicos el problema planteado, lo cual implica elaborar el modelo del subsuelo cuya realidad quiere comprobarse. Escogiéndose en esta investigación los sondeos y cartografiado geoelectrico, pues permiten observar las variaciones de la resistividad en dos dimensiones, ya sea longitudinal y/o a profundidad. Así como el cartografiado geomagnético y el registro a lo largo de perfiles electromagnéticos utilizando del Georadar del subsuelo.

Medición: corresponde con la toma de datos en el campo. Etapa que se realizó considerando las características y limitaciones del terreno, así como del equipo a utilizar.

Procesamiento: una vez realizadas las mediciones, se convirtieron los datos en un documento para la interpretación de los resultados. Para ello, se procedió a digitar la información en diversos programas computacionales, a calcular la profundidad máxima de investigación en cada caso. Fue necesario, en el caso de los métodos geoelectricos, determinar el valor de la constante geométrica y el valor de resistividad

aparente. Para el método magnético, se obtuvo el gradiente magnético local y se filtraron anomalías regionales, para enfocarse en las respuestas locales que puedan ser de interés para el tipo de prospección propuesto. Por su parte; para el georadar se determinó a partir del tipo de suelo, el valor de constante dieléctrica para estimar de mejor manera la profundidad de las reflexiones que son dependientes de la velocidad de medio.

Interpretación: en esta etapa, el documento geofísico debe ser convertido en un documento explicativo, por lo que es imprescindible información básica sobre el tema contemplado para que el geofísico pueda realizar una mejor interpretación de los resultados. Es por ello, que desde el primer contacto se ha conversado con detalle sobre los posibles artefactos y estructuras existentes en el sitio, así mismo; se atendió una exposición desde el punto de vista histórico de la batalla La Trinidad y se promovió una interpretación conjunta para validar las señales geofísicas con las posibles estructuras históricas y arqueológicas del sitio. A lo largo del año 2020 y 2021, se han mantenido estrecho contacto para seguir interpretando los datos geofísicos en función de los resultados obtenidos por las excavaciones arqueológicas.

El mapa de la figura 23, muestra la ubicación de áreas y la localización de los diferentes puntos de referencia establecidos previamente por las personas profesionales en arqueología encargadas del proyecto que ha sido promovido desde la Academia Morista Costarricense.

Este sistema de referencia consiste en una serie de líneas separadas cada 10 m y orientadas al norte, designadas con el nombre de letras y que cada 10 m de distancia presenta una estaca de referencia con numeración ascendente hacia el norte.

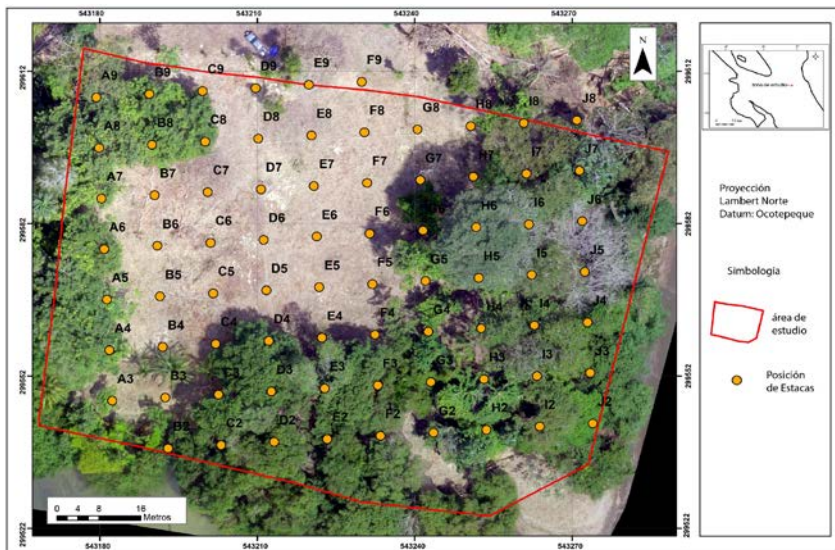


Figura 23: Fotografía de la localización del área de estudio.

Las actividades realizadas en esta prospección fueron:

Realización de 5 SEV con el dispositivo Schlumberger, con aberturas máximas de AB/2 de 50 metros en diversos sitios del área de interés, para determinar el la profundidad de posescción más adecuada.

Cartografiado geomagnético del área de interés utilizando el siguiente equipo: Gradiómetro de Cesio G-8586AP (marca Geometrics).

Realización de varios perfiles geofísicos utilizando los siguientes equipos: Ohmmapper (marca Geometrics) y GPR Gepard (marca OKM).

Procesamiento de los datos, para expresar los valores medidos de gradiente magnético y de resistencia como valores de resistividad aparente.

Elaboración y representación de los SEV, mapas y perfiles geofísicas

Interpretación de posibles estructuras y de los informes respectivos.

Considerando la capacidad institucional y como un aporte al conocimiento del sitio de la Batalla La Trinidad, por iniciativa propia el Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas de la Universidad de Costa Rica, generó los siguientes insumos:

Una evaluación geológica del área, incluyendo la realización de secciones delgadas de roca e identificación de fósiles presentes y cartografiados de las terrazas colindantes con el margen del río San Juan.

Un levantamiento a detalle de las estructuras antrópicas o naturales del sitio de prospección, que pueden actuar como ruido para la interpretación geofísica contratada o que incluso ponen en evidencia aspectos culturales del sitio, esto incluyó el cartografiado de las trincheras expuestas.

Un levantamiento fotográfico del sitio, con el dron del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológica, para georeferenciar todas las mediciones de la prospección geofísica y que sirva de referencia para futuras investigaciones del sitio de la Batalla La Trinidad.

Ortiz & Arenas (2021), indica que en reconocimientos preliminares del sitio a finales del año 2016, se encuentran diversos objetos de vidrio y loza del Siglo XIX y un perdigón de plomo con huellas visibles de pátina indicando su antigüedad, lo cual motivó aún más al equipo. Se procedió a contactar al Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (CICG) de la Universidad de Costa Rica para que se sumaran a la iniciativa, aportando una propuesta de prospección con equipos de teledetección, denominada “Estudio de Prospección Geofísica en el sitio de la batalla de La Trinidad”.

A inicios de 2017 se inició la prospección geofísica, empleando el radar de penetración de suelo (GPR por sus siglas en inglés), además de sondeos eléctricos verticales, un cartografiado geofísico, perfiles geofísicos, con el fin de estudiar el subsuelo para localizar objetos metálicos y posibles restos óseos de los caídos de ambos bandos, que fueron enterrados en el sitio durante la batalla según fuentes históricas de la época. Unos meses después se obtuvieron los informes preliminares los cuales sugieren en la interpretación técnica, una alta probabilidad de encontrar objetos metálicos y vestigios de ocupación humana; estos datos fueron evaluados por las arqueólogas Maureen Sánchez y Virginia Nova, con participación del coautor Ortiz.

Se programó una temporada de dos semanas de trabajo intenso de campo, integrando al equipo a estudiantes avanzados y graduados de arqueología; se realizaron las gestiones para contar con la colaboración de vecinos de la zona en las tareas de excavación. Este proceso fue documentado en forma visual por el coautor Rubén Darío Arena, quien con su experticia concretaría un vídeo divulgativo de todo el proceso seguido. Se ejecutaron actividades de prospección arqueológica, con apoyo de un detector de metales manual, marca Garrett, localizando diversos objetos modernos, pero también a 20 cm una bala Minié completa, ubicada en el extremo oeste del área de estudio; se incrementó el entusiasmo que se tenía, al haber localizado días antes una bala colapsada o impactada, en una excavación.

Nuevas municiones se encontraron en las diversas excavaciones al final de esta primera temporada; se confirmó sin lugar a duda, que el sitio elegido correspondía al espacio en donde se había librado la Batalla de La Trinidad; por otra parte, estas balas fueron las primeras recuperadas científicamente y que poseen un contexto social y cultural en el país. Como un acto de reconocimiento se izó una bandera con el rostro de don

Juan Rafael Mora, para simbolizar la confluencia de ambos ríos como el escenario donde se había llevado a cabo la más cruenta de las batallas durante toda la campaña del tránsito.

Al concluir esta fructífera etapa intensa de excavación, el conjunto de los objetos registrados y analizados por las arqueólogas Sánchez y Novoa, permitió proponer una amplia secuencia de ocupación humana de 1000 años de historia, iniciando con la presencia de fragmentos de vasijas precolombinas, que se dejaron en el sitio, y abundantes fragmentos de lozas, botellas y envases de vidrio que revelaban la ocupación y el tránsito frecuente de visitantes extranjeros durante el siglo XIX, todo ello junto a municiones de conflictos armados recientes del siglo XX, ocurridos en la década de los 70 y principios de los 80, utilizados en el marco de la revolución nicaragüense.

Sánchez & Novoa (2021), exponen el resultado de la investigación arqueológica en un campo de batalla de mediados del siglo XIX (1856-1857), consignado en las fuentes históricas bajo el nombre de La Trinidad. Los primeros acercamientos al sitio se dieron a finales del 2016, la actividad de campo inició en los años siguientes, la primera fase del estudio concluyó en el 2019. En este artículo se aborda desde la construcción del problema de investigación, los lineamientos teórico- metodológicos empleados, además, el análisis y presentación de los datos junto a la revisión y comparación de los documentos escritos de la época, los cuales permitieron complementar, contrastar y evidenciar el aporte que la arqueología puede brindar al estudio histórico de estos eventos socio políticos, llegando a configurar un paisaje de guerra.

La investigación arqueológica en el Campo de Batalla de La Trinidad, apoyada con la prospección geofísica registró 1359 artefactos que nos permiten ubicarlos a lo largo de una prolongada secuencia de ocupación.

La aplicación del método de investigación arqueológica partió de la premisa de localizar vestigios de antiguas trincheras, municiones de guerra, balas de cañón, fragmentos de metal de cureñas, armas como rifles, mosquetes, sables, crucetas, cuchillos y otro tipo de implementos de hierro, plomo, bronce o cobre, incluso ubicar las fosas en donde posiblemente se enterraron a los combatientes caídos, es en esa línea en que la investigación tuvo una participación interdisciplinaria con contribuciones de la geología en un campo específico cual es la geofísica. Por lo tanto, se integró en el reconocimiento arqueológico el diseño de una prospección geofísica guiada por equipos especializados en teledetección, como el georadar (GPR, siglas en inglés), entre otros equipos.

GEOELÉCTRICA DEL SITIO DE LA BATALLA LA TRINIDAD

Prospección en 1 Dimensión

En la realización de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) en el sitio La Trinidad fue aplicado el arreglo electródico tipo Schlumberger, empleando diferentes aperturas, adaptadas a las condiciones encontradas en la zona de estudio, la abertura máxima de AB/2 fue de 40 m. El equipo usado fue el modelo SYSCAL_R1/PLUS de la compañía IRIS Instruments con cuatro electrodos.

Se realizaron un total de 5 SEV, estos se dispusieron a lo largo de la línea F, ubicada en la parte central del área a prospectar (figura 24), cada sondeo posee una separación entre sí de 20 metros exceptuando los SEV-4 y SEV-5 los cuales por motivos de espacio presentan una separación de 10 m.

Con respecto a las aperturas AB/2 máximas obtenidas, por cuestión de espacio los primeros cuatro sondeos poseen una separación máxima de 30 m, mientras que el sondeo SEV-5 alcanzó una separación de 40 m en la horizontal lo que lo ayudó a profundizar hasta aproximadamente 13,1 m.

Los resultados obtenidos fueron procesados mediante la utilización de los softwares libres IPI2WIN y QWSELN y correlacionados mediante la observación y descripción de geología de campo, así como la información aportada de un pozo excavado encontrado dentro del área del sitio La Trinidad.

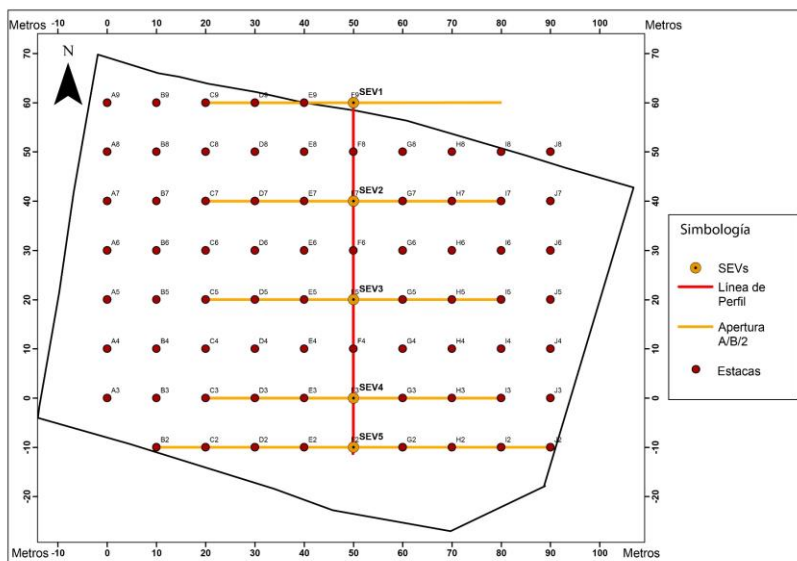


Figura 24: Mapa de ubicación de los sondeos eléctricos verticales realizados sobre el área de estudio

Con base en los valores obtenidos de cada SEV se graficaron los datos, posteriormente se procedió a realizar la inversión de los mismos tratando de ajustar los valores al modelo numérico y geológico más aceptable. Además se muestran los gráficos realizados y los modelos de mejor ajuste para cada SEV (figura 25). Con base en los resultados obtenidos luego de las inversiones de datos realizadas, se procedió a realizar una correlación de capas de acuerdo con su resistividad, para ello se realizó un perfil geoelectrico.

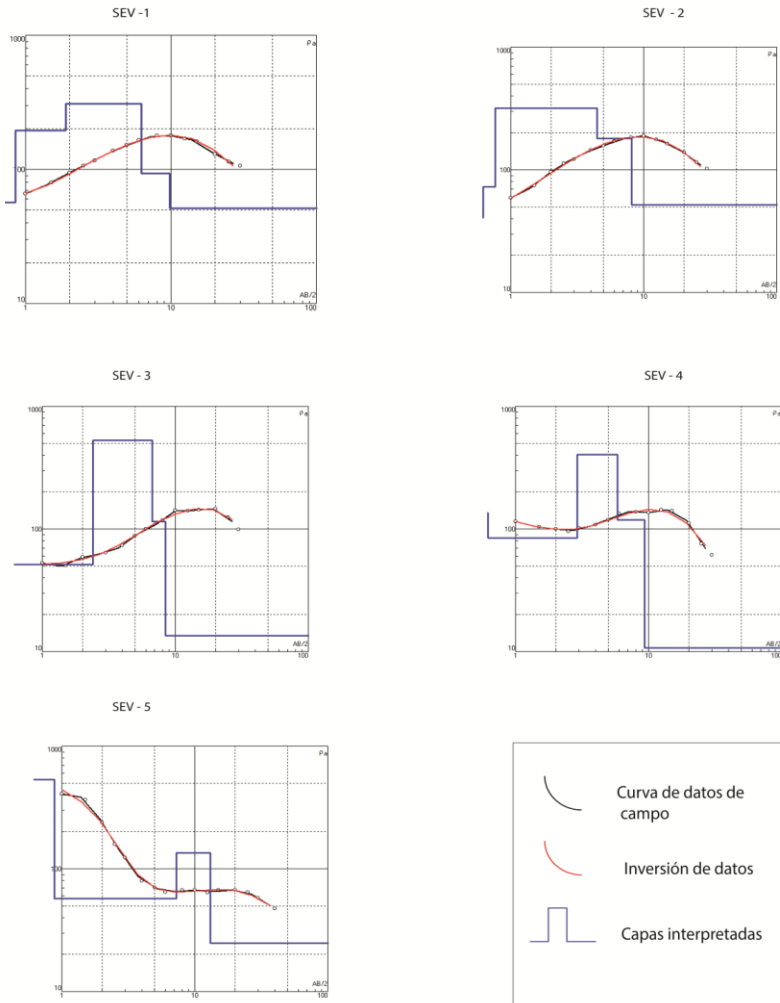


Figura 25: Inversión de datos planteada para los diferentes SEV realizados.

Prospección en 2 Dimensiones

Se utilizó la técnica de tomografía eléctrica con arreglo electródico dipolo-dipolo, el cual se caracteriza por ser un arreglo simétrico, es decir el distanciamiento de los electrodos que inyectan corriente y los electrodos que miden la respuesta eléctrica del suelo siempre es el mismo, con lo cual se obtienen valores continuos de resistividad a lo largo de la componente horizontal, al cambiar la distancia entre los electrodos se logra profundizar en la vertical y nuevamente al desplazar el dispositivo se logran obtener valores de resistividad en la componente horizontal, así sucesivamente hasta alcanzar la profundidad deseada en el perfil.

En el sitio La Trinidad, se realizó un perfil de 70 m de longitud a lo largo de la línea F, con el objetivo que poder comparar los resultados obtenidos con los datos obtenidos en el apartado de Sondeos Eléctricos Verticales.

Para la adquisición se usó un resistímetro de acoplamiento capacitivo denominado Ohmmapper marca Geometrics con 5 receptores y un trasmisor. Este equipo cuenta en el transmisor con una frecuencia, con un receptor ambos protegidos por un tubo de PVC y conectados por un cable de 2,5 m, unidos a una consola que posee una pantalla que despliega los datos adquiridos en tiempo real, la consola es sujeta por un arnés que puede soportar una persona.

El equipo se caracteriza por la rápida adquisición al ser un método diseñado para investigaciones someras y más detalladas que los convencionales, además de tener un alcance mayor en sitios de difícil obtención como por ejemplo caminos pavimentados, donde influye tiempo que se consume al clavar los electrodos en pavimento, asfalto, roca dura, suelo húmedo o terreno congelado, bajo condiciones ambientales extremas.

Para la toma de datos en el campo (figura 26) se utilizaron cables dipolo de largo 2,5 m, por lo que el largo del dipolo receptor será de 5 m, al igual que el largo del dipolo transmisor, la distancia entre el cable dipolo y el operario es de 3 m, además con el fin de mejorar la profundidad de investigación se utilizaron diferentes separaciones de cuerda entre dipolos, iniciando con una separación de 1 m, luego 2,5 m, 5 m y 10 m con lo cual se logró una profundidad máxima de prospección de alrededor de 2,75 m.



66

Figura 26: Toma de datos de campo por medio del dispositivos Ohmmapper en el área de estudio

Los resultados de datos que se obtuvieron fueron procesados mediante la utilización del software RES2DINV, como resultado se obtuvieron tres imágenes para el perfil realizado (figura 27). En la primera imagen se muestra la ubicación de los puntos medidos, la siguiente es la pseudosección de resistividades aparentes, datos calculados mediante un algoritmo y la última imagen es la distribución de resistividades real con respecto a la profundidad verdadera, generada a través de una inversión.

El perfil eléctrico obtenido muestra una profundidad máxima de prospección de 2,75 m, en la base se puede observar una capa de alta resistividad que ronda valores entre los 275 Ωm hasta 667 Ωm , sin embargo acercándose al sector de F3 se observa una disminución de la resistividad llegando a valores de 72,5 Ωm , por lo que se tienen una variación lateral muy marcada entre los valores resistivos. Ésta capa se ha relacionado con un depósito interdigitado de arenas o material aluvial los cuales conforme se desplazan hacia el sur se encuentran por una cuña de material arcilloso más húmedo y permeable.

Entre 1 y 2,20 m de profundidad se observa una capa de resistividad muy homogénea con valores bajos entre 29,9 Ωm hasta 72,5 Ωm . Hay que señalar que nuevamente al encontrarse cerca de la estaca F3, se observa una nueva variación lateral en este caso corresponde a un aumento en la resistividad llegando a valores de hasta 176 Ωm .

La homogeneidad que muestra ésta capa se ha relacionado a una secuencia de arcillas húmedas, con poca variación en profundidad, pero que al desplazarse hacia la estaca F3 se tienden a transformar en una cuña de arenas poco conductoras.

Por último, a menos de un metro de profundidad se localiza una capa de resistividad moderada con valores que se encuentran entre 113 Ωm a 176 Ωm . Sin embargo es posible apreciar en sectores muy superficiales cercanos a las estacas

F7 y F9 por lo menos 3 anomalías de forma rectangular que muestran valores muy altos de resistividad, lo que provoca un fuerte contraste con su entorno. La última capa más superficial se ha relacionado con un suelo arcilloso de menor humedad, el cual al desplazarse hacia la estaca F3 tiende a cambiar a una capa arenosa. Con respecto a las anomalías localizadas hacia el norte éstas podrían correlacionarse con capas de material de relleno o a artefactos arqueológicos.

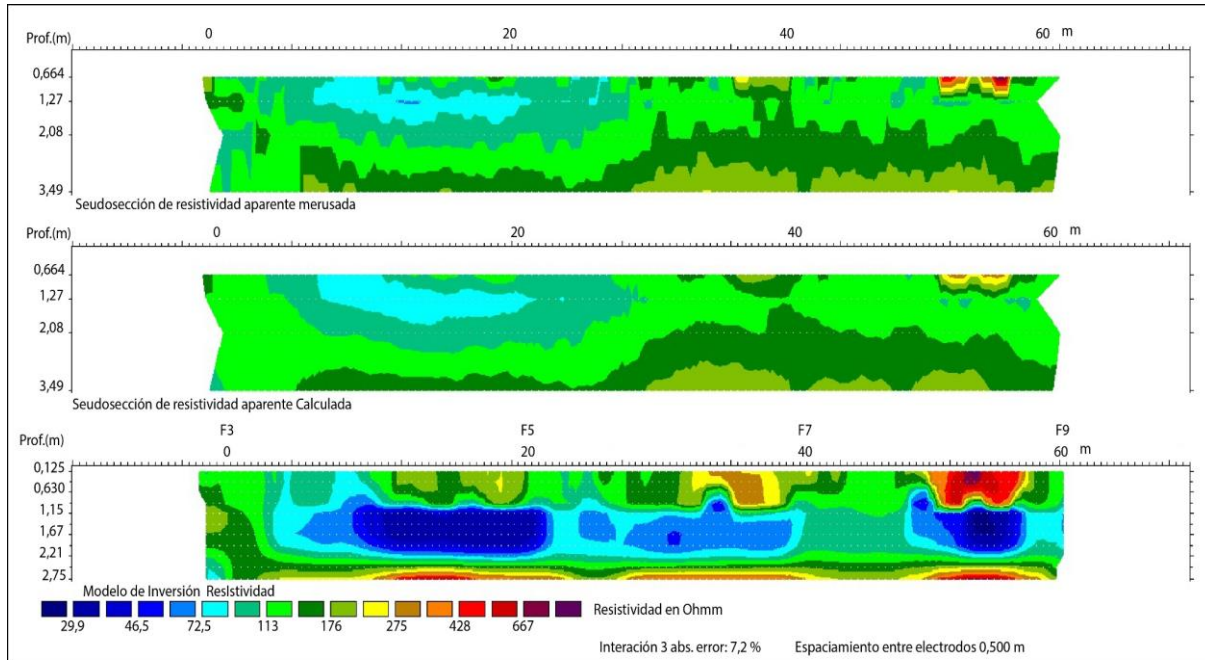


Figura 27: Modelo de resistividad de mejor ajuste obtenido para el perfil elaborado desde F3 a F9 (de sur a norte) en el área de estudio

GEOMAGNETISMO DEL SITIO DE LA BATALLA LA TRINIDAD

En la zona de La Trinidad, se utilizó un gradiómetro de vapor de Cesio tipo G-8586AP marca Geometrics. De acuerdo con Arias & Mojica (2003), este tipo de gradiómetros permite obtener mayor información del sitio, debido a la frecuencia de medición y a la mecánica de adquisición de datos.

La utilización de dos sensores para la medición del gradiente magnético vertical a partir de la diferencia de los valores del campo magnético registrados por dichos sensores, resulta eficaz para la eliminación de las variaciones externas del campo magnético natural. Dicha diferencia de valores puede ser considerada como una buena aproximación del gradiente magnético vertical. Para el caso del restudio realizado se utilizó una separación entre sensores de 0,75 m.

Las medidas de gradiente vertical se realizaron de forma manual cada metro sobre una superficie de 5 400 m², para ello se definieron 9 perfiles de sesenta metros cada uno, iniciando en la estaca A3 como punto (0,0) hasta la estaca I2 como punto (90,10). La medición se realizó en forma unidireccional a lo largo del eje Y en dirección Sur- Norte (figura 28).

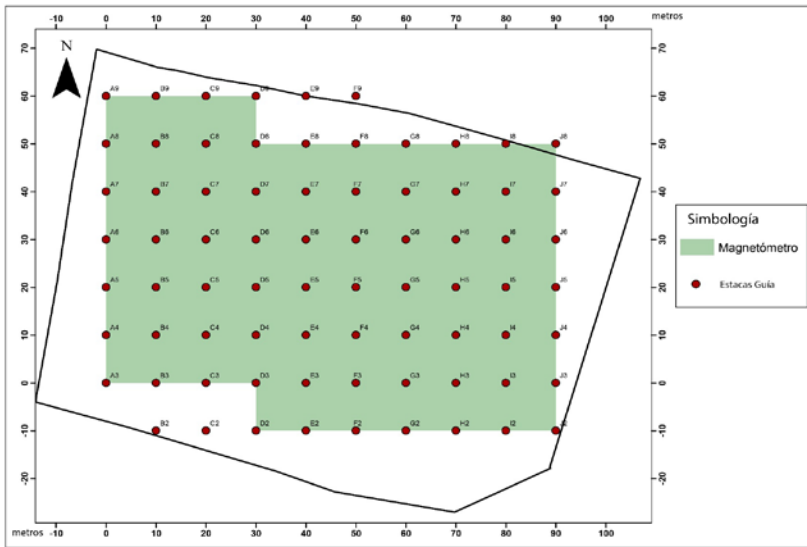


Figura 28: Área prospectada mediante la utilización del Gradiómetro de Cesio en la zona de La Trinidad, Sarapiquí.

Los datos obtenidos fueron filtrados y desplegados por medio del software Magmap, para luego ser interpolados y desplegados como mapas raster en el software Arcgis 10.1.

Para realizar una mejor interpretación y análisis de los datos obtenidos tratando de evitar efectos de ruido externo, se realizó un mapa de ruido superficial que pudo afectar la toma de datos al momento de realizar las mediciones (figura 29). Se mapearon tanto árboles caídos como en pie, sectores con bases de una antigua escuela que se encontraba en el lugar, así como una serie de depresiones lineales que pudieran estar relacionadas a desagües o antiguas trincheras de guerra, además se zonas con objetos de metal como pines recientes o piezas de metal más antiguas, entre otros objetos.

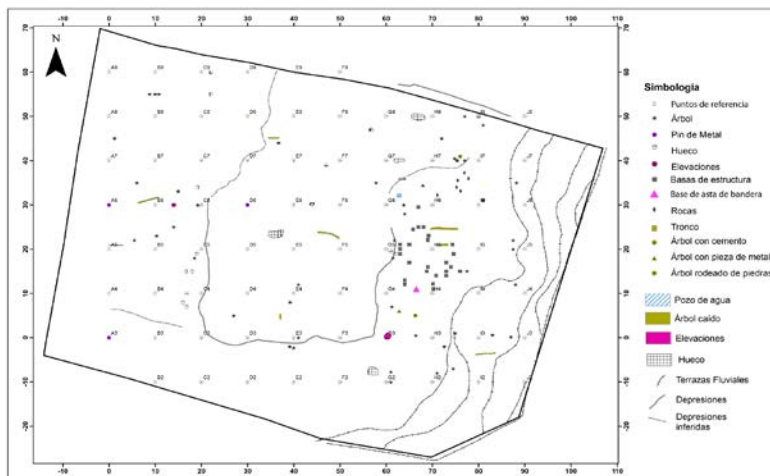


Figura 29: Mapa de ruido mapeado durante el proceso de prospección magnética

El proceso de interpolación y filtrado de ruido, incluyó la utilización de 3 diferentes metodologías para observar cual presentaba una mejor distribución de la información. Se probaron los modelos de interpolación: Inverso a la distancia, Vecino más cercano y Kriging, de los cuales el vecino más cercano fue desechado debido a que generaba distorsiones de la información en los bordes.

Con respecto a las otras metodologías su comportamiento fue muy similar, decantándose al final por el Kriging, debido a que la distribución de datos fue tomada en forma regular y equidistante.

Una vez elegido el modelo de interpolación y desplegados los mapas se evaluó la forma de representar la distribución de los rangos de datos, ya que dependiendo de los rangos de datos asignados fue posible realizar un filtrado del ruido así como la desaparición de máscaras de datos que pudieran encubrir

anomalías. Una vez analizadas las diferentes opciones se decidió utilizar dos tipos de reclasificaciones, la primera, generada por medio de la derivación estándar de los datos, la cual agrupa los datos en rangos de valores equivalentes a una proporción de la derivación estándar, lo que favorece la aparición de anomalías en el mapa magnético. La otra fue asignando un rango manual, la cual favorece la unificación de los datos si se desean analizar diversos mapas con rangos de valores diferentes.

Una vez definidos éstos parámetros se realizaron 3 mapas a profundidad, el primero a un metro, utilizando todos los datos recolectados, el siguiente a dos metros de profundidad utilizando únicamente los valores obtenidas cada dos metros tanto en el eje X como en el Y, finalmente se realizó un mapa a cuatro metros de profundidad utilizando únicamente los valores obtenidas cada cuatro metros tanto en el eje X como en el Y.

En las figuras 30, 31, 32, se muestran los mapas de gradiente magnético a profundidad de 1m, 2m y 4m, respectivamente.

El proceso de interpretación de estos mapas, se ha obviado en este documento, por razones de confidencialidad.

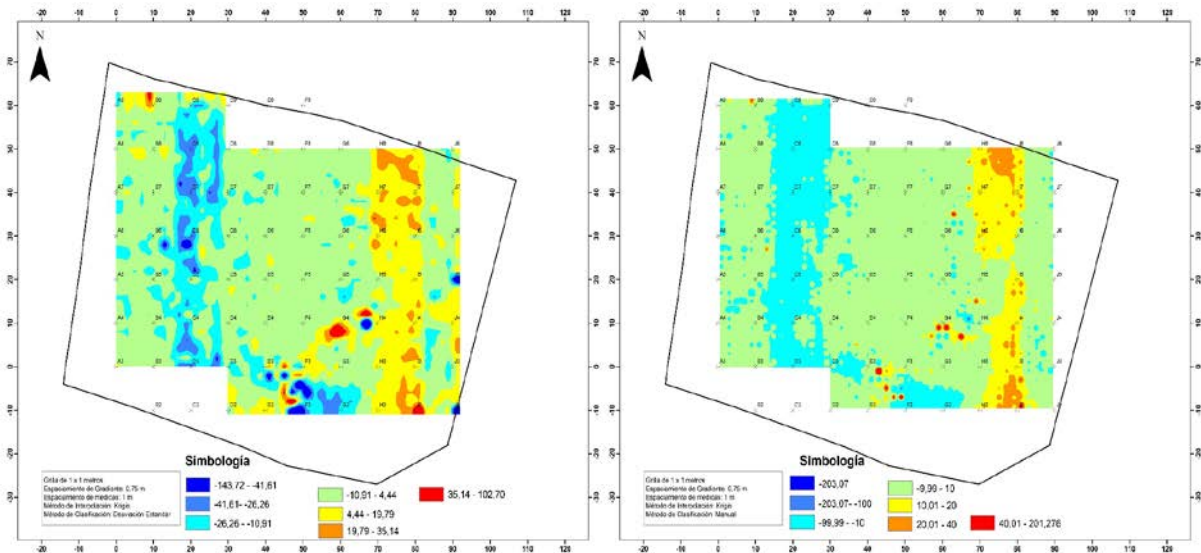


Figura 30: Mapa magnético a la profundidad de 1 m, a la izquierda clasificado con metodología Derivación Estándar, a la derecha clasificado manualmente

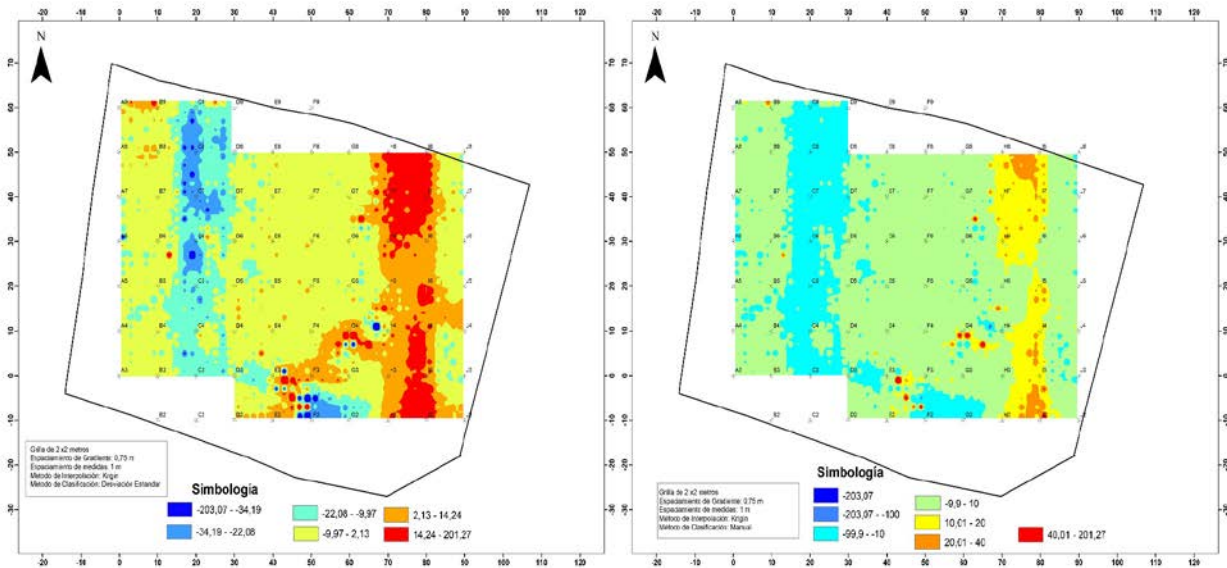


Figura 31: Mapa magnético a la profundidad de 2 m, a la izquierda clasificado con metodología Derivación Estándar, a la derecha clasificado manualmente

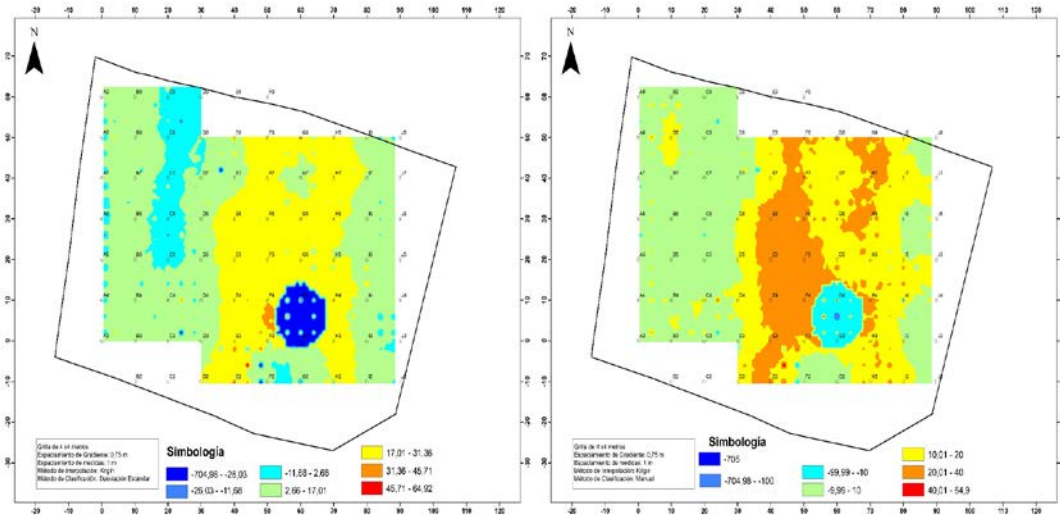


Figura 32: Mapa magnético a la profundidad de 4 m, a la izquierda clasificado con metodología Derivación Estándar, a la derecha clasificado manualmente

GEORADAR DEL SITIO DE LA BATALLA LA TRINIDAD

Se realizaron dos giras de campo con el fin de realizar diversos perfiles de georadar a lo largo del área de estudio. Las mediciones se realizaron mediante la toma automática de datos, y se utilizaron las antenas de 100 MHz con el fin de adquirir datos a mejor detalle superficial y eliminar un poco el ruido ambiental.

En una primer visita, efectuada en febrero 2017, se realizaron 10 perfiles con el Georadar, con una longitud de 50 m y rumbo N-S. La separación entre perfiles fue de 10 m iniciando desde la Línea A, hasta la línea J, además se realizaron otros dos perfiles de 90m cada uno, con rumbo E-W, el primero desde A3 hasta J3 y el segundo desde A8 hasta J8.

Para la segunda gira, realizada en junio del 2017, se realizaron prospecciones a mayor detalle y menos espaciadas, con el fin de localizar y delimitar mejor posibles anomalías; se optó por la realización de perfiles de georadar en sentido N-S y S-N con una separación de 1,5 m entre cada uno, iniciando en una estaca principal (A,B,C...), con la denominación 0 m, siguiendo hacia la derecha 1,5 m, 3 m, 4,5 m , 6 m, 7,5 m, 9 m y nuevamente iniciando en 0 m en la estaca principal del siguiente cuadrante (eje X). Para determinar el eje Y se describe la estaca de sur a norte más cercana junto con la cantidad de metros de distancia que se encuentra la anomalía de dicha estaca.

En la figura 33 se presenta un ejemplo para clarificar la nomenclatura: en el caso de una anomalía en **L3m, A3,4**, implica que está en el bloque A, localizada a 3 m hacia la derecha (sobre el eje x) y 4 m hacia el norte (sobre el eje y).

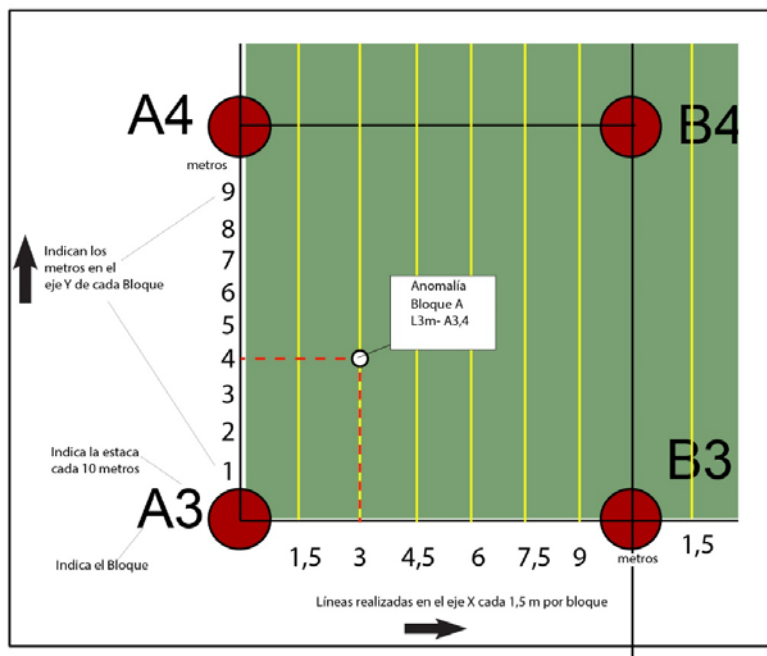


Figura 1: Ubicación anomalías en la cuadrícula A3

En total se realizaron 91 prospecciones geofísicas repartidas de la siguiente manera:

Se hicieron 30 líneas de 60 metros desde el bloque A hasta el bloque C, iniciando en la estaca 3 hasta la estaca 9.

Se hicieron 30 líneas de 70 metros desde el bloque D hasta el bloque F, iniciando en la estaca 2 hasta la estaca 9.

Se hicieron 21 líneas de 60 metros desde el bloque G hasta el bloque I, iniciando en la estaca 2 hasta la estaca 8.

Así, se recorrieron 5 420 m lineales de auscultación geofísica con georadar abarcando un área aproximada de 5 600 m².

La longitud, inicio y final de las prospecciones se varió en dependencia de factores ambientales tales como: cercas o infraestructuras que delimitan la propiedad y que generaran un alto ruido al equipo, cercanía con el río Sarapiquí o presencia de árboles que impedían el paso. Además es importante mencionar que el cuadrante delimitado desde la estaca I2 hasta la estaca J2 no se pudo prospectar debido a que durante la realización de la gira, el Río San Juan aumentó su caudal inundando parcialmente dicha sección por lo que se decidió por seguridad no pasar el equipo con dicha zona.

Para mantener la orientación y separación entre cada perfil, se utilizaron cintas métricas que señalaban el camino por donde el operador debía pasar el equipo, se trató de cortar cualquier hierba que pudiera golpear las antenas y ocasionar ruido.

Además, se realizó un mapeo de ruido tanto a lo largo de cada metro prospectado como en sus alrededores con el fin de tener control de cualquier estructura, árbol, excavaciones previas, golpes u otros que pudieran generar ruido en el radargrama y que fueran posteriormente malinterpretados como anomalías.

Junto con el mapeo de ruido se tomaron fotografías y videos de cada perfil realizado con el objetivo de revisar cualquier factor ambiental que pudiera afectar los resultados, o en su defecto confirmar anomalías de interés. Como resultado se mapearon 251 posibles fuentes de ruido dentro del área de estudio.

En las etapa de procesamiento e interpretación, los radargramas obtenidos durante la prospección se trabajaron con antenas de 100 Mhz, además se ha utilizado la opción dentro del software Gepar 2D de tipo de suelo arcilloso húmedo debido a las condiciones encontradas en el campo al momento de realizar el estudio, con base en el tipo de suelo y las antenas utilizadas se logró prospectar hasta un máximo de 1,3 m de profundidad.

Una vez obtenidos los perfiles en el campo, éstos se han trabajado por medio del software Adobe Illustrator 6 con el fin de mejorar su resolución, para esto cada perfil se ha sometido a un análisis respecto a su largo y profundidad, con lo cual se determinó una resolución de 1200 x 130 pixeles para las proyecciones con longitudes de 60 m y de 1400 x 130 pixeles para las proyecciones de 70 m.

Una vez obtenidas las imágenes re-escaladas de cada perfil, se continuó con una primera interpretación, en la cual se ha analizado cada metro de todos los perfiles y se han detectado todas las posibles anomalías observables, cada anomalía se ha comparado con el mapa de ruido y con los videos y fotografías del perfil estudiado en busca de una posible causa de ruido ambiental, si la causa de la anomalía se relaciona con algún agente de ruido externo, éste se ha señalado en el radargrama, de la misma forma si no se ha encontrado una posible fuente de ruido, se ha señalado en el perfil como una posible anomalía de interés por investigar y escavar.

Posteriormente, los perfiles interpretados se han importado al software Arcgis 10.3 propiamente a la herramienta llamada ArcScene, la cual permitió una visualización en tercera dimensión de los perfiles, los cuales previamente habían sido re-escalados en longitud y profundidad con lo cual se puede representar de forma fidedigna los datos teniendo la oportunidad de poder no solo observar anomalías puntuales sino estructuras que puedan abarcar varios perfiles adyacentes, logrando así establecer sus posibles dimensiones.

Los resultados obtenidos se han correlacionado con las otras metodologías geofísicas utilizadas con el fin de encontrar coincidencias y disminuir el porcentaje de error propio de las condiciones ambientales y del equipo.

Una vez que se interpretaron los datos se han realizado una serie de mapa de ubicación con las zonas de mayor potencial a ser escavadas o prospectadas con mayor detalle.

Una vez descartadas todas las anomalías a las que se pudo relacionar con agentes de ruido ambiental, se han procesado un total de 101 anomalías electromagnéticas que pudieran estar relacionadas a elementos antropogénicos sepultados, aunque no se pudo descartar la presencia de fragmentos de roca, raíces o cambios composicionales del suelo.

Las principales fuentes de ruido se han relacionado con los doseles de los árboles principalmente los ubicados en el sector este del área de estudio, debido a su densidad, robustez y altura, esto ha provocado que en dicho sector y en general sectores cercanos a árboles se presenten grandes hipérbolas en los perfiles, lo cual genera mucho ruido en el radargrama, lo que provoca dificultades para interpretar, además de generar anomalías que podrían confundirse con algún tipo de estructura (figuras 34 y 35).

81



Figura 34: Radargrama realizado cerca de depresión y árbol, la imagen de la izquierda muestra hipérbolas generadas por el ruido de las ramas, en rojo se muestra la anomalía generada por la depresión.

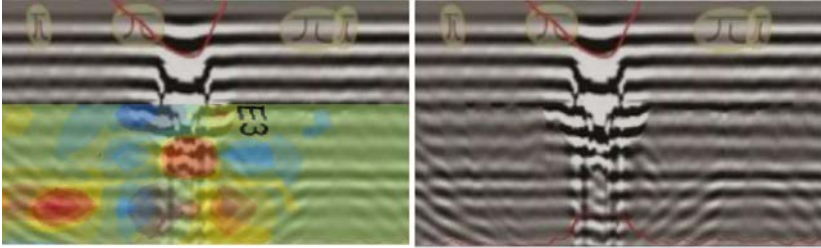


Figura 35: A la izquierda se muestra el radargrama realizado cerca de un sector de altas anomalías magnéticas (colores azules y cálidos), la zona presenta muchos árboles, los cuales generan hipérbolas y ruidos que dificultan la interpretación de los datos (Imagen a la derecha).

Cabe destacar que las depresiones en particular la llamada "Zona de Trinchera", ubicada principalmente en el sector sur del área, ha quedado bien registrada en los perfiles realizados (figura 34), por lo que ha sido posible delimitar mejor su trayectoria y anchura en dependencia del sector analizado.

Para disminuir el nivel de incertidumbre generado por el ruido ambiental se ha integrado al estudio de las posibles anomalías, los mapas de gradiente magnético realizados con anterioridad, estos han sido reclasificados por medio de las metodologías de desviación estándar y clasificación manual y con un máximo de prospección de 1 metro de profundidad. En dichos mapas se muestran zonas con diferencias en el gradiente magnético, las cuales son representadas por coloraciones azuladas y cálidas (amarillos y rojos), mientras que la coloración verde indica un gradiente magnético cercano a la norma.

La comparación y ubicación de las anomalías obtenidas con el georadar y las obtenidas con el mapa magnético por correlación ayudó a delimitar áreas con mayor potencial a ser

estudiadas con detalle, en la figura 36, se muestran los resultados de dicha correlación.

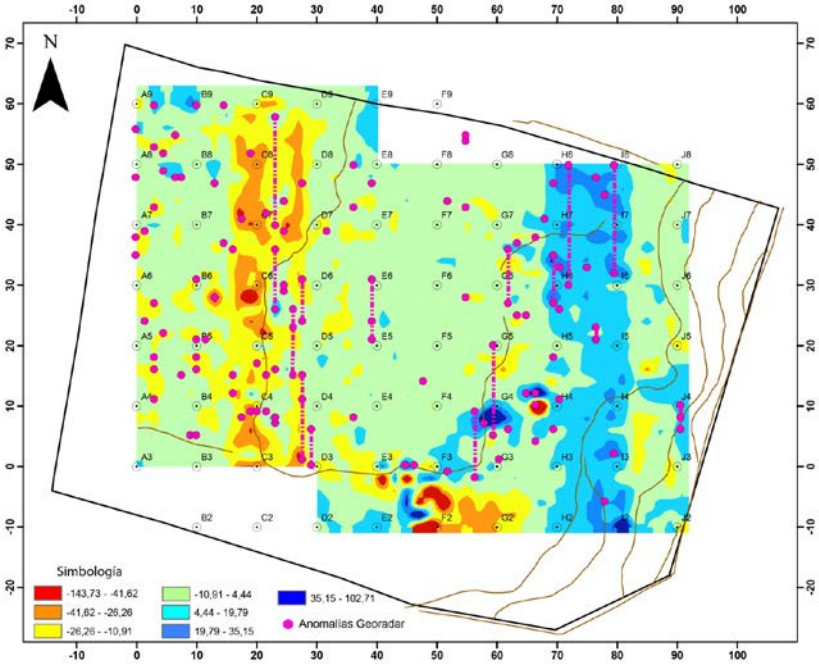


Figura 7: Mapa de anomalías obtenidas con el equipo de Georadar y con el gradímetro de Cesio espaciado a 1 metro.

Como lo muestra la figura 37, las anomalías localizadas pueden ser muy puntuales, relacionadas con objetos o estructuras aisladas, o también se pueden encontrar lo que en este informe se han denominado anomalías semicontinuas (figura 38), en donde se presentan sectores donde existen cambios en la energía muy seguidos a lo largo de un perfil lo cual dificulta una ubicación más exacta, y que pueden estar relacionados con objetos densamente ubicados o cambios composicionales en el suelo, o estructuras alargadas relacionadas con rocas o raíces.

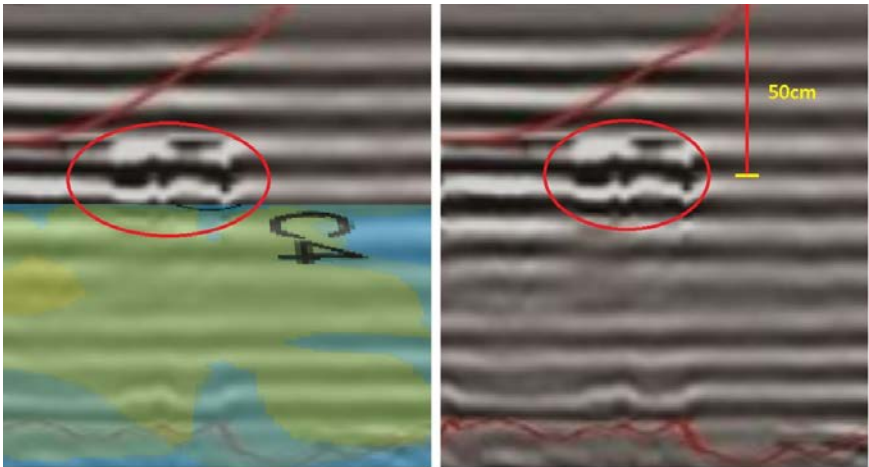


Figura 37: Anomalia Puntual localizada en el cuadrante C. A la derecha se muestra la imagen del Georadar, a la izquierda la misma imagen comparada con el mapa magnético.

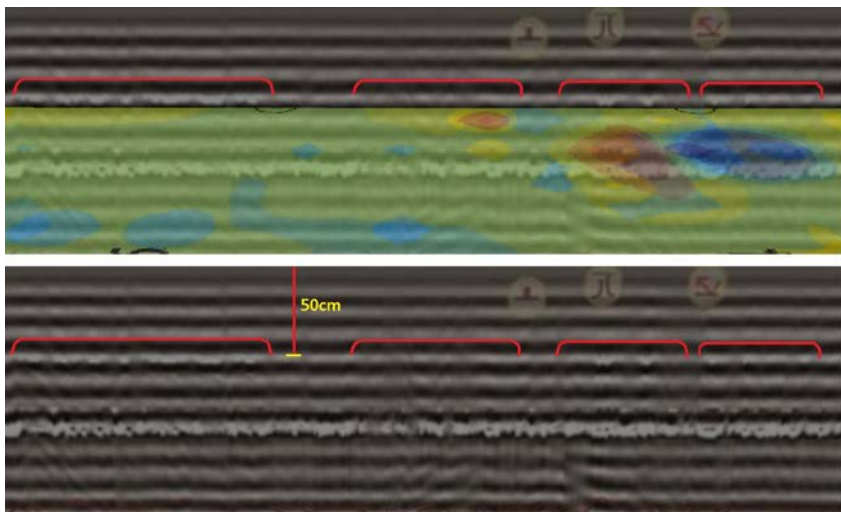


Figura 2: Anomalia semicontinua localizada en el cuadrante H. En la parte inferior se muestra la imagen del Georadar, en la superior la misma imagen comparada con el mapa magnético. Se ha identificado un nivel compuesto por muchas anomalías pequeñas, caracterizadas por aumentos en energía, este podría relacionarse con un nivel de suelo o un piso de origen antropogénico.

85

En general las anomalías se tienden a ubicar hasta una profundidad de 50 centímetros, lo cual concuerda con la profundidad en donde se han ubicado la mayoría de objetos encontrados por los arqueólogos hasta el momento, además cabe destacar que en sectores con mucha densidad de anomalías o con presencia de anomalías alineadas se han definido zonas o sectores que puedan ser de mayor importancia de investigar.

La comparación realizada entre las metodologías, ha determinado que muchas de las anomalías encontradas se localizan cerca o en sectores en donde existen depresiones y

pequeños cúmulos, como es el caso de la zona llamada "La Trinchera". Siendo por el contrario el centro del área de estudio la zona con menor presencia de anomalías localizadas con ambos métodos.

En sectores de altos contrastes magnéticos, se ha visto como las imágenes del georadar presentan altos y bajos en la energía electromagnética que han sido localizados y descritos como anomalías, las cuales pueden tener una génesis relacionada tanto a cambios composicionales en el suelo o rocas, como a objetos de interés arqueológico.

En el caso de que las anomalías tengan un origen relacionado con cambios composiciones del suelo, esto se puede deber a que la zona de estudio presenta intercalaciones de suelos arcillosos muy plásticos con capas de arenas negras muy magnéticas, dichos suelos se encuentran relacionados a diferentes procesos de sedimentación de los ríos Sarapiquí y San Juan.

En diferentes ciclos a lo largo del tiempo dichos ríos han provocado inundaciones, las cuales han depositado material en las diferentes depresiones del área de estudio (incluyendo zonas de trinchera), generando capas de suelo de diferente composición, y por ende de diferente respuesta magnética, esto genera sectores más magnéticos, que tiendan a ser más conductores, y por ende presentan una mayor dispersión de la energía emitida por el georadar, por lo cual la señal que se recibe tiende a atenuarse, mientras que el efecto contrario se da para suelos menos magnéticos, dichas diferencias en energía son interpretadas como anomalías (figura 39).

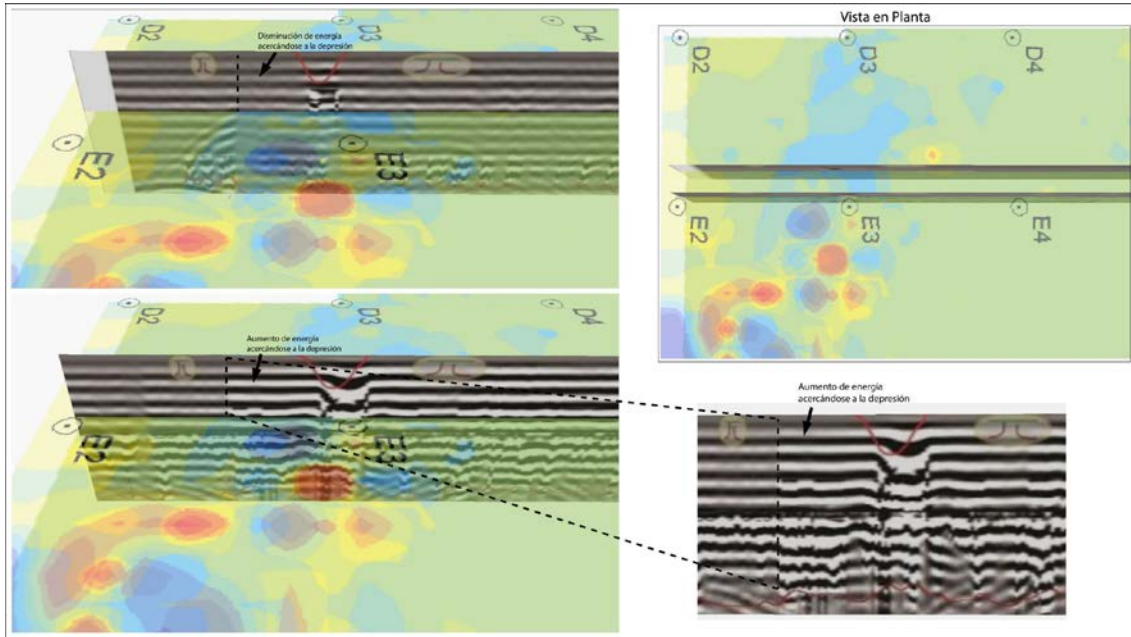


Figura 39: Dos perfiles realizados con 1,5 m de separación, en un sector de fuertes anomalías magnéticas (en verde la zona magnética ubicada en la norma), en uno existe un aumento en la energía al acercarse a la trinchera, en el otro se presenta una disminución de la energía al acercarse a la trinchera.

REFERENCIAS

- Abingdon Archaeological Geophysisc. (2005). Archaeological Geophysics: A short guide. www.bajr.org/Documents/GeoPhysics.pdf [Consultado: setiembre- 2006].
- Aitken, M. (1961). Physics and Archaeology. Interscience Publishers Inc. New Yor.
- Arias, M.E. (1998). Interpretación Geomagnética de los Volcanes: Tenorio, Miravalles y Rincón de la Vieja, Cordillera Volcánica de Guanacaste, Costa Rica. 296 págs, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, [Tesis de Lic.].
- Arias, M.E. (2000). Los Métodos Geofísicos.- en Denyer, P. & Kussmaul, S. (compiladores) Geología de Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Arias, M. E. (2002) Aplicación de métodos geofísicos en Hidrogeología.- en Reynolds, J. (edit.) Manejo Integrado de Aguas Subterráneas. EUNED.
- Arias, M. E. (2002).La prospección eléctrica y electromagnética en dos dimensiones y su aplicación en la hidrogeología”. Revista Geológica de América Central. N.27. 21-26.
- Arias, M. E. (2002) Aplicaciones Geofísicas a la Hidrogeología de Costa Rica. Revista Geológica de América Central. N: 27. 11-20.

- Arias, M. E. (2003). Práctica de campo de Geofísica en el sitio Agua Caliente (C-3A AC), Cartago. Informe Interno de la Gira del curso de Geofísica Introductiva, Escuela Centroamericana de Geología. Universidad de Costa Rica.
- Arias, M.E; & Mojica A. (2004). Prospección arqueológica en América Central mediante el uso de métodos geofísicos. Revista Geológica de América Central. N: 29-30.
- Arias, M.E. (2006). La Geofísica de Prospección, una técnica de aplicación en Arqueología. Charla en curso de Maestría en Arqueología. Universidad de Costa Rica.
- Arias, M.E. (2007). Comparación de los principales dispositivos utilizados en los sondeos eléctricos verticales. Revista de Ciencia y Tecnología, Universidad de Costa Rica, 25 (1-2): 7-23.
- Arias, M.E. (2007). La geofísica de exploración como herramienta de las ciencias forenses: Primer caso de aplicación en Costa Rica. Revista de Ciencias Forenses. 2, 11-20.
- Arias, M.E. (2007). La primer experiencia de aplicación de los Métodos Electromagnéticos en Costa Rica: El caso del acuífero de Tamarindo, Guanacaste. Boletín Geológico Minero de España. 118 (1), 51-62.
- Arias, M.E. (2007). Prospección Geoeléctrica en el sitio Hunter Robinson. Informe Interno. Escuela Centroamericana de Geología. Universidad de Costa Rica.

- Arias, M.E. (2008). Influencia del tectonismo en el modelo hidrogeológico conceptual y aplicación de la geofísica en la determinación de la intrusión salina en Sámara, Costa Rica. *Revista Latinoamericana de Hidrogeología*. 6, 15-23.
- Arias, M.E. (2008). Aplicación del cartografiado geoelectrico en la exploración de los sitios arqueológicos Hunter Robinson (Playas del Coco) y Nuevo Corintio (Guápiles), Costa Rica. *Memorias del IX Congreso Geológico de América Central*.
- Arias, M.E. (2009). Prospección Geomagnética en el sitio arqueológico Manzanillo (G-430 MZ), Guanacaste. Informe Interno. Escuela Centroamericana de Geología. Universidad de Costa Rica.
- Arias, M.E. (2009). Prospección Geofísica en el sitio arqueológico Nuevo Corino (L-72 NC). Informe Interno. Escuela Centroamericana de Geología. Universidad de Costa Rica.
- Arias, M.E. (2011). La Geofísica de Prospección, una técnica de aplicación en Arqueología. Charla en curso de Licenciatura en Antropología. Universidad de Costa Rica.
- Arias, M.E. (2012). La Geofísica de Prospección, una técnica de aplicación en Arqueología. Charla en curso de Licenciatura en Antropología. Universidad de Costa Rica.
- Arias, M.E., & López, J.D. (2017). Estudio de prospección geofísica en el sitio de la Batalla La Trinidad. Informe de Geoelectrica. Informe Interno, Centro de Investigación en Ciencias Geológicas. Universidad de Costa Rica.

Arias, M.E., & López, J.D. (2017). Estudio de prospección geofísica en el sitio de la Batalla La Trinidad. Informe de Geomagnetismo. Informe Interno, Centro de Investigación en Ciencias Geológicas. Universidad de Costa Rica.

Arias, M.E., López, J.D. & Vargas, J.E. (2017). Estudio de prospección geofísica en el sitio de la Batalla La Trinidad. Informe de Georadar. Informe Interno, Centro de Investigación en Ciencias Geológicas. Universidad de Costa Rica.

Atkinson, R. (1952). Méthodes électriques de prospection en archéologie. En La découverte du passé, Annette Laming (ed.), Picard, Paris: pp. 59-70.

Atkinson, R. (1953). Field Archaeology. (Segunda edición), Methuen, London.

Barker, P. (1995). Techniques of Archaeological Excavation. (Tercera edición), Batsford, London.

Bevan, B.W. (1999). Geophysical exploration for archaeology: an introduction to geophysical exploration. En: United States Department of the interior. National Park Service. Midwest Archaeological Center. Special Report 1. Lincoln, Nebraska.

Bonatti, J. & Saénz, L. (1992). Reporte de anomalías magnéticas en Finca 6, Palmar Sur, Costa Rica. Informe Interno: Departamento de Antropología e Historia del Museo Nacional de Costa Rica.

Conyers, L. & Dean G. (1997). Ground-Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists. Altamira Press, California.

Conyers, L. & Goodman, D. (1997). Ground Penetrating Radar: An introduction for archaeologists. Alta Mira Press, California.

Conyers, L. (2007). Ground Penetrating Radar for Archaeological Mapping. En Remote Sensing in Archaeology. Springer, New York: 329-344.

Conyers, L. (2016). Ground-Penetrating Radar Mapping Using Multiple Processing and Interpretation Methods.- Remote Sens, 8: <http://www.mdpi.com/journal/remotesensing>

Cosenza, B., & Arias, M.E. (2006). Los principios de equivalencia y supresión en la resolución del problema inverso en los sondeos eléctricos verticales: ejemplo de aplicación en Santa Lucía Cotzumalguapa, Guatemala. Rev. Geól. América Central 34-35: 99-108.

Gaffney, C. & Gater, J. (2003). Revealing the Buried Past. Geophysics for Archaeologists.-192 págs. Tempus Publishing Ltd. Inglaterra.

Geonics (1980). Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Technical Note, Ontario. 15 p.

Griffiths, D. H. & Barker, E. D. (1994). Electrical imaging in Archaeology. Journal of Archaeological Science 21: 153-158.

Hernández, A. (2013). Una aproximación de la organización social de las unidades domésticas en el sitio arqueológico Jesús María (A-321-JM). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, [Tesis de Lic.].

Kearey, P., Brooks, M. & Hills, J. (2002). An Introduction to Geophysical Exploration.- 262 págs. Blackwell Science, Inglaterra.

Larson, D. O., Lipo, C. P. & Ambos, E. L. (2003). Application of advanced geophysical methods and engineering principles in an emerging scientific archaeology. Fastbreak: European Association of Geophysicist. 21: 20-29.

Lanata, J. L. & Osella, A. (2006). Arqueogeofísica: Una metodología interdisciplinaria para explorar el pasado. Buenos Aires: FHN.

Landa, C. & Hernández, O. (2020). Arqueología en Campos de Batalla: América Latina en perspectiva. ASPHA. Buenos Aires.

Lockhart, J. & Green, T. (2006). The current and potencial role of Archaeogeogphysics in Cultural Resources Management in the United State. En Remote Sensing in Archaeology: an explicitly Nort American Perspecriva. University of Alabama, pp. 17-32.

Lowrie W. (2007). Fundamentals of Geophysics. Cambridge University Press. 2 Edition.

- Maloof, G. (2008). Utilidad de los métodos geofísicos en la arqueología costarricense: un estudio de caso en los sitios arqueológicos Cubujuquí (H-7 CO) y Jesús María (A-321 JM).- 296 págs, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, [Tesis de M. Sc.].
- Maloof, G. & Arias, M.E. (2008). Arqueogeofísica del sitio Jesús María (A-321 JM), San Mateo de Alajuela, Costa Rica. Memorias del IX Congreso Geológico de América Central.
- Maloof, G. & Arias, M.E. (2009). Pruebas de los métodos geofísicos en el sitio arqueológico Cubujuquí (H-7-CQ), Horquetas de Sarapiquí, provincia de Heredia, Costa Rica. Cuadernos de Antropología, N. 19-75-91.
- Maloof, G. & Arias, M.E. (2013). Arqueogeofísica del sitio Jesús María (A-321 JM), San Mateo de Alajuela, Costa Rica. Cuadernos de Antropología, N. 17-18 -177-187.
- Milson, J. (1989). Field Geophysic. Geological Society of London, London.
- Museo Nacional de Costa Rica. (2020). Uso del radar de penetración terrestre en la arqueología de Costa Rica por parte del Museo Nacional, Charla impartida por Arq. Fabiola de la O Alvarado. Recuperado de: <https://www.facebook.com/museonacional.mcj.cr/videos/3478402728869802>
- Ortiz, M., & Arenas, R.D., (2021). La cooperación empresarial y académica: una propuesta innovadora en el fomento de la Arqueología Histórica. Yulök Revista de Innovación Académica. V.5, N. 1. 11-14.

- Osella, A. & Lanata, J. L. (2006). *Arqueogeofísica. Una metodología interdisciplinaria para explorar el pasado.*- 163 págs. Bueno Aires, FHN.
- Oviedo, J. (2015). *El uso del GPR en Arqueología.* Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, [Tesis de Lic.].
- Oviedo, J., Acevedo, B., Barba, L. & Arias, M.E. (2015). *Sitio Alto del Cardal: Un ejemplo de trabajo interdisciplinario y cooperación interuniversitaria,* Universidad de Costa Rica (UCR) - Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). *Memorias del XII Congreso Geológico de América Central.*
- Peytrequín, J. & Aguilar, M. (2007). *Agua Caliente C-35 AC: Arquitectura, procesos de trabajo e indicadores arqueológicos de un modo de vida cacical en una aldea nucleada en el Intermontano Central, Costa Rica.* Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, [Tesis de Lic.].
- Quilter, J. & Frost, J. (2002). *Investigaciones en el complejo arqueológico Rivas-Panteón de la Reina en el suroeste de Costa Rica.* *Vínculos* (30): 1-2, pp: 23-56
- Reynolds, J. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics.* Wiley, 796 p.
- Salgado, S., Hoopes, J., Arias, M.E., Maloof, G. y Aguilar, M. (2009). *Informe final Proyecto "Contribuciones a la Arqueología de Suerre". Informe Interno.* Vicerrectoría de Investigación. Universidad de Costa Rica.

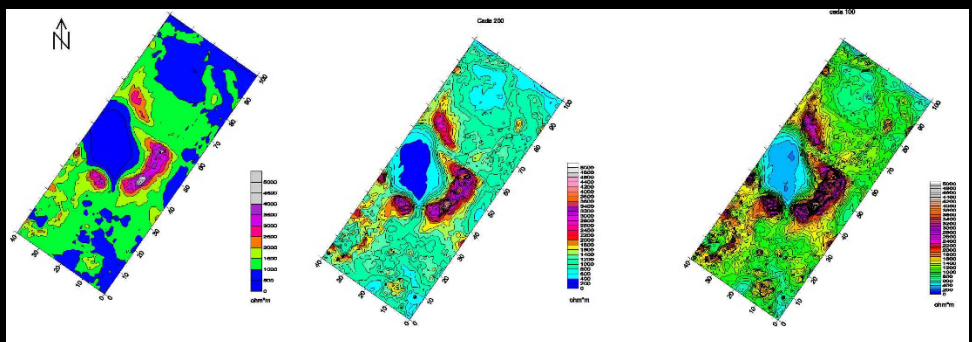
- Sánchez, M. (2002). Entre dos Ríos: un acercamiento arqueológico al cantón de Belén y los distritos de San Rafael y La Guácina del cantón central de Alajuela. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, [Tesis de Lic.].
- Sánchez, M., & Novoa, V. (2021). Arqueología en el sitio La Trinidad: un campo de batalla del siglo XIX. Yulök Revista de Innovación Académica. V.5, N. 1. 15-35.
- Travera, M. (2008). Aplicación del Georadar para la mejora del redimiento de una red Hídrica. Tesis de Maestría en Imagenaría Hidráulica y medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia, España. -105 Págs.



Tumba de cajón en el sitio Nuevo Corinto (L-72 NC), 2009

ANEXO

Fotografías del proceso de prospección geofísica en varios sitios arqueológicos



Prospección geoeléctrica con el dispositivo polo-polo, con un paso de muestreo de 1 metro, una separación de los electrodos de 1 metro, el área prospectada tiene una extensión de 40 m X 100m. Las imágenes muestran diferentes tipos de filtros de las isolíneas, en el sitio Nuevo Corinto (L-72 NC), 2009



*Coordinación constante con la arqueóloga encargada del sitio
Manzanillo (G 430 MZ), 2009*



*Coordinación constante con los arqueólogos encargados del sitio
Hunter Robinson (G 468 HR), 2007*



*Coordinación constante con la arqueóloga encargada del sitio
de la Batalla La Trinidad, 2017*



Estudiantes del curso Geofísica Introductiva realizando prácticas de campo con equipo geoelectrico, electromagnético (EM-34) y magnetómetro de protones en el sitio Agua Caliente (C-35 AC), año 2003.





Transporte del equipo de geoelectrica hasta sitio Cubujuquí (H-7 CO), año 2008.



Cartografiado geoelectrico en el sitio Cubujuquí (H-7 CO), año 2008.



Prospección con el gradiómetro de cesio en el sitio Alto del Cardal (C-304-AC), año 2015.



Prospección con GPR en el sitio Alto del Cardal (C-304-AC), año 2015.



Prospección eléctrica en el sitio Alto del Cardal (C-304-AC), año 2015.



Trabajo de campo, revisión de información magnética y procesamiento inicial, sitio de la Batalla La Trinidad, 2017.



Trabajo de campo, armado de equipo geoelectrico en el sitio de la Batalla La Trinidad, 2017



Prospección geoelectrica, cartografiado con el Ohmmaper, en el sitio de la Batalla La Trinidad, 2017



Prospección geoelectrica, realización de SEV, en el sitio de la Batalla La Trinidad, 2017



Prospección magnética con el gradiómetro de cesio en el sitio de la Batalla La Trinidad, 2017



Prospección con el GPR en el sitio de la Batalla La Trinidad, 2017



Prospección con el drone, en el sitio de la Batalla La Trinidad, año 2017



830-B4-806