



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES
UNIDAD MORELIA

APLICACIÓN DE LA EXPLORACIÓN GEOFÍSICA
SOMERA EN ESTUDIOS ARQUEOLÓGICOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN GEOCIENCIAS

PRESENTA:

CARLOS RAMÍREZ BARRÓN

TUTOR:

DR. GERARDO CIFUENTES NAVA

Morelia, Michoacán. Junio 2024

ESCUELA
NACIONAL
DE ESTUDIOS
SUPERIORES

UNIDAD MORELIA



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



ESCUELA
NACIONAL
DE ESTUDIOS
SUPERIORES
mm
UNIDAD MORELIA

10
años
(2011-2021)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO ESCUELA
NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE

DIRECTORA

DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

PRESENTE

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 09** del **Comité Académico de la Licenciatura en Geociencias** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES), Unidad Morelia, celebrada el día **19 de octubre de 2023**, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno **Carlos Ramírez Barrón** de la Licenciatura en **Geociencias**, con número de cuenta **41812862-4**, con el trabajo titulado: **"Aplicación de la exploración geofísica somera en estudios arqueológicos"**, bajo la dirección como tutor del **Dr. Gerardo Cifuentes Nava**.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente:	Dr. Miguel Ángel Cervantes Solano
Vocal:	Dra. Ana Luz Caccavari Garza
Secretario:	Dr. Gerardo Cifuentes Nava
Suplente:	Dra. Berenice Solís Castillo
Suplente:	Dr. Juan Rodrigo Esparza López

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Morelia, Michoacán a 05 de junio de 2024.

DRA. ANA YESICA MARTÍNEZ VILLALBA
SECRETARIA GENERAL

CAMPUS MORELIA

Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)5623.7300, Extensión Red UNAM: 80614
www.enesmorelia.unam.mx

Agradecimientos institucionales

Me complace agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia, así como a todos los profesores y técnicos de la licenciatura en Geociencias, por contribuir en mi formación profesional. De igual forma, agradezco los apoyos que me fueron otorgados a lo largo de mis estudios y principalmente por la beca de titulación-egresados alto rendimiento.

Agradecimientos al Instituto de Geofísica Unidad Michoacán y su personal, por recibirme y permitirme hacer uso de las instalaciones y equipo ya que fue fundamental para el desarrollo de este trabajo.

También quiero agradecer al Colegio de Michoacán por permitirme la colaboración en uno de sus proyectos y al personal involucrado en la planeación del trabajo de campo así como en la adquisición de datos en las dos visitas a campo realizadas.

Finalmente quiero agradecer a mis sinodales y miembros del jurado, el Dr. Miguel Ángel Cervantes Solano, Dra. Ana Luz Caccavari Garza, Dra. Berenice Solis Castillo, Dr. Juan Rodrigo Esparza López y al Dr Gerardo Cifuentes Nava por sus observaciones y comentarios.

Agradecimientos personales

A mi familia. Principalmente a mis padres, muchas gracias por todo el apoyo y paciencia que me han tenido a lo largo de los años pues sin ustedes nada de esto hubiera sido posible. A mi hermana Alejandra, por todos sus consejos y el apoyo que me ha dado de forma incondicional durante toda mi vida. Igualmente, a ella y su esposo Armando por haberme apoyado con mi estancia durante la universidad.

A mi director de tesis el Dr. Gerardo Cifuentes Nava, muchas gracias por su apoyo, su paciencia y por su contribución a mi formación profesional y personal.

A mis amigos y compañeros especialmente a Cristian, Yassim y al bueno para nada de Germán, por todos los momentos que pasamos juntos pues no hubiera sido lo mismo sin ustedes.

De igual manera, quiero agradecer al arqueólogo Mario Alfredo Retiz del Colegio de Michoacán por el apoyo y comentarios realizados durante el trabajo de campo. A Germán Guillén Arandía, Jorge Pérez Quiroz, Karen Arreola Romero, Laura Jazmín Gordillo Rodríguez y Osiris Sandoval Quintana de la ENES Morelia por su participación en la adquisición de datos.

Resumen

En este trabajo se presenta la aplicación de dos métodos de exploración geofísica somera aplicados a la arqueología: tomografía de resistividad eléctrica (TRE) y radar de penetración terrestre (GPR). Estos estudios han mostrado ser de mucha ayuda dentro de las investigaciones arqueológicas al momento de estudiar y explorar una zona de interés para corroborar objetivos a profundidad para su posterior excavación. La gran ventaja de su aplicación es que son métodos no destructivos que preservan el contexto arqueológico sin afectarlo, donde el parámetro físico medido es representante de los materiales a profundidad y mejor aún al combinar dos o más métodos, ya que así se puede diferenciar la ambigüedad que se puede presentar en algunos objetivos. En el siguiente documento se presentan los resultados de un estudio geofísico llevado a cabo en la plaza principal del sitio arqueológico El Cerrito de los Agaves, ubicado en el municipio de Jesús María, Jalisco, la adquisición de datos se realizó durante dos campañas: en la primera se llevó a cabo una tomografía de resistividad eléctrica (TRE) en 3D y durante la segunda visita se realizó un TRE 2D y un levantamiento con el georadar (GPR). Se realizaron estos estudios con el objetivo de localizar una posible cámara mortuoria ubicada en los alrededores a un tiro descubierto por un grupo de investigadores dentro de la plaza principal del sitio arqueológico.

Abstract

This work presents the application of two shallow geophysical exploration methods applied to archaeology: Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Ground Penetrating Radar (GPR). These studies have proven to be very helpful in archaeological research when studying and exploring an area of interest to verify objectives at depth for subsequent excavation. The great advantage of their application is that they are non-destructive methods that preserve the archaeological context without affecting it, where the measured physical parameter is representative of the materials at depth, and even better when combining two or more methods, as this can differentiate the ambiguity that may arise in some targets. The following document presents the results of a geophysical study carried out in the main square of the El Cerrito de los Agaves archaeological site, located in the municipality of Jesús María, Jalisco. Data acquisition was conducted during two campaigns: in the first, a 3D Electrical Resistivity Tomography (ERT) was carried out, and during the second visit, a 2D ERT and a survey with Ground Penetrating Radar (GPR) were performed. These studies were conducted with the aim of locating a possible mortuary chamber located in the vicinity of a pit discovered by a group of researchers within the main square of the archaeological site.

Índice general

Agradecimientos institucionales	II
Agradecimientos personales	III
Resumen	IV
Abstract	V
1 Introducción	1
2 Fundamentos teóricos	3
§2.1 Estudios de resistividad	3
§2.1.1 Fuente puntual en un semi-espacio	6
§2.1.2 Resistividad aparente	7
§2.1.3 Resistividad eléctrica	10
§2.1.4 Mapeos Laterales	12
§2.1.5 Roll along	12
§2.1.6 Geometrías no convencionales	13
§2.2 Radar de Penetración Terrestre	14
§2.3 Métodos de exploración geofísica somera	19
§2.3.1 Consideraciones acerca de los métodos de exploración geofísica . .	21
3 Caso de estudio: El Cerrito de los Agaves	24
§3.1 Zona de estudio	25
§3.2 Metodología	29
§3.2.1 Primera visita a campo	29

§3.2.2 Resultados	35
§3.2.3 Discusión	39
§3.3 Segundo levantamiento	41
§3.4 Levantamiento topográfico	46
§3.4.1 Resultados	47
§3.5 Discusión	51
4 Conclusiones	52
5 Bibliografía	53
§5.1 Artículos	53
§5.2 Libros	56
§5.3 Manuales	57
§5.4 Tesis	57

Índice de figuras

2.1 Representación del flujo de corriente de una fuente puntual en un semi-espacio (Osella, 2006).	7
2.2 Disposición de electrodos sobre un suelo de resistividad uniforme ρ (Osella, 2006).	8
2.3 Ejemplo de un medio heterogéneo en el subsuelo, donde los puntos A y B corresponden a electrodos de corriente, M y N a electrodos de potencial y ρ_1 , ρ_2 y ρ_3 a diferentes capas del subsuelo (Modificado de De la Torre, 2010).	9
2.4 Algunos de los arreglos de electrodos mas comunes y sus factores geométricos (Loke et al., 2013). C_1 y C_2 son los electrodos de corriente mientras que P_1 y P_2 son los electrodos de potencial.	11

2.5	Ejemplo de un roll along, donde la parte azul corresponde a un primer arreglo de electrodos y la parte roja un segundo arreglo de electrodos. X representa la longitud total a cubrir con el levantamiento (Modificado de Bernard, 2003).	13
2.6	Puntos de atribución de los arreglos geométricos no convencionales. Arreglo en L, mínimo acoplamiento y gradiente (Chavez et al., 2017).	14
2.7	Donde (E) emisor, (R) receptor y (UC) unidad de control. Para las tres posiciones esquematizadas se muestra la señal recibida en función del tiempo (t), indicándose el tiempo de ida y vuelta $t_i - v$. Esta se caracteriza por su extensión atemporal, Δt amplitud A y periodo temporal τ (Osella, 2006).	15
2.8	Esquema de la reflexión y la transmisión de un pulso electromagnético en una interfaz que separa dos medios con distinta permitividad. Los ángulos de incidencia θ_i , de reflexión θ_r y de transmisión θ_t son medidos respecto de la dirección perpendicular a la superficie. I: Interfaz horizontal, II: Interfaz inclinada (Osella, 2006).	17
2.9	En el método de GPR una antena emisora envía un pulso electromagnético a través del subsuelo, parte de esa onda se refleja en los materiales del subsuelo y es captada por la antena receptora (Modificado de Butler, 2005).	18
2.10	Ejemplo de TRE 2D con y sin correcciones topográficas. (Instruction manual AGI EarthImager 2D, 2014).	23
3.1	Ubicación del sitio El Cerrito de Los Agaves (Esparza et al., 2021).	25
3.2	Croquis del sitio (Esparza et al., 2021).	26
3.3	Ubicación del tiro dentro de la cuadrícula.	29
3.4	Fotografía de la apertura del tiro.	30
3.5	Resistivímetro Syscal Pro	31
3.6	Arreglo de electrodos S-N.	32
3.7	Arreglo de electrodos W-E.	33
3.8	Arreglo de electrodos no convencional.	34

3.9 Resistividad en la superficie.	35
3.10 Resistividad a 8 m de profundidad.	36
3.11 Isovalores a 8 m de profundidad.	37
3.12 Croquis del tiro. (Obtenido de Esparza, R., Yoshida. T., Rétiz, M. Comunicación personal, 18 enero 2022)	38
3.13 Resistividad del medio alrededor de la cámara.	39
3.14 Resistivímetro Syscal Junior	41
3.15 Distribución de los electrodos S-N respecto al tiro.	42
3.16 Distribución de electrodos W-E respecto al tiro.	43
3.17 GPR GSSI, SIR 3000 con una antena de 270 Mhz	44
3.18 Recorrido realizado por el GPR en dirección S-N	45
3.19 Recorrido realizado por el GPR en dirección W-E	45
3.20 Levantamiento topográfico en El Cerrito de los Agaves.	46
3.21 Mapa de elevación de Cerrito de Los Agaves	47
3.22 Corte a 21 m en el eje X	48
3.23 Corte a 21 m en el eje X	49
3.24 Corte a 28 m en el eje Y	49
3.25 Corte del GPR en las coordenadas 0,28 - 30,28.	50
3.26 Corte del GPR en las coordenadas 21,28 - 21,38.	50

Índice de tablas

2.1 Métodos geofísicos y sus diferentes aplicaciones. Modificado de Reynolds (2011).	21
--	----

Capítulo 1

Introducción

En este trabajo se presenta un compendio de técnicas y sus respectivas consideraciones, así mismo se expone un caso práctico en el que se emplean dichas técnicas. Los métodos de prospección geofísica son una herramienta con una muy amplia gama de usos, entre ellos están sus aplicaciones en la **arqueología**. Con la finalidad de preservar la integridad de edificaciones históricos, los investigadores han desarrollado una gran variedad de técnicas de prospección geofísicas no destructivas las cuales resultan de utilidad para obtener información sobre la composición de elementos estructurales en el subsuelo (Pérez Garcia et al., 2000; Pieraccini et al., 2005; Yalciner et al., 2009; Solia et al., 2011; Arka et al., 2019; Deidana, 2019; Ortega-Ramirez et al., 2019). Estos métodos han sido ampliamente utilizados en trabajos relacionados a la arqueología y son de suma importancia para la preservación del patrimonio cultural en las mejores condiciones.

Así mismo, se busca que este texto sea de utilidad para todo aquel interesado en aplicar los métodos de exploración geofísica en estudios arqueológicos. El presente documento muestra a lo largo de sus capítulos, dos de las técnicas geofísicas más empleadas en la arqueología: las **tomografías de resistividad eléctrica (TRE)** y el **georradar**

(GPR), ambos métodos fueron empleados para nuestro caso de estudio, las dos técnicas previamente mencionadas han demostrado ser eficientes para determinar la ubicación de estructuras en el subsuelo, las TRE han sido utilizadas de manera exitosa en varios estudios arqueológicos gracias a su gran sensibilidad (Gündgdu et al., 2017; Jodry et al., 2019), de igual forma el GPR ha demostrado ser un método eficiente para determinar el espesor de estructuras enterradas, ya sea natural o antrópico, así como criptas y tumbas o límites entre diferentes materiales (Goodman, 1994; Carcione, 1996; Jol, 2009; Johnston et al., 2018; Yalciner, 2019). La zona de estudio donde se aplicaron estas técnicas se trata de un sitio arqueológico conocido como **El Cerritos de Los Agaves**, ubicado en las cercanías del poblado de Jesús María en los Altos de Jalisco, México. Este sitio es una de las tres áreas con vestigios prehispánicos que conforman el proyecto arqueológico de Presa de La Luz, bajo la coordinación del Dr. Juan Rodrigo Esparza Lopez con permiso del Consejo de Arqueología oficio: 401.1S.3-2021/1294 y la única que hasta el momento que cuenta con monumentos arquitectónicos. El objetivo principal del estudio en este sitio consistía en ubicar la posición en el subsuelo de una posible cámara mortuoria dentro del patio principal, además, utilizar los resultados para evaluar la viabilidad del proyecto. Por medio de los resultados presentados en esta tesis se explora la efectividad de los métodos de exploración geofísica para localizar zonas de potencial arqueológico en un sitio determinado.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

2.1. Estudios de resistividad

El propósito de los estudios de resistividad consisten en determinar la distribución de la resistividad en el subsuelo realizando mediciones en la superficie del terreno. A partir de estas mediciones se puede estimar la resistividad real del subsuelo. La resistividad del suelo esta relacionada con varios parámetros geológicos como el contenido de minerales, fluidos, la porosidad y la presencia de agua en el subsuelo (Loke, 1966-2004). De acuerdo con la naturaleza de este tipo de estudios, estos se puede describir con las ecuaciones de Maxwell:

Partiendo de la forma diferencial de las leyes de Faraday y Ampere para el caso de cargas eléctricas en medios materiales.

Ley de Faraday

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{\beta}}{\partial t} \quad (2.1)$$

Ley de Ampere

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

donde $\vec{E}$ es el campo eléctrico, $\vec{B}$ es la densidad de flujo magnético, t el tiempo, $\vec{H}$ la intensidad del campo magnético, $\vec{J}$ y $\vec{D}$ el desplazamiento eléctrico.

Dado que en las tomografías de resistividad eléctrica se utiliza corriente directa, el campo eléctrico se considera estático -sin variaciones en el tiempo- por lo que en términos diferenciales serán iguales a cero. Por lo tanto las ecuaciones (2.1) y (2.2) toman la siguiente forma:

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (2.4)$$

Con lo anterior se demuestra que la corriente estacionaria creara un campo eléctrico $\vec{E}$ conservativo por lo cual proviene de un potencial escalar. En campo, lo que se mide directamente es el campo escalar. Existe una relación entre la intensidad del campo eléctrico y el potencial eléctrico, el cual es descrito por la siguiente ecuación:

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (2.5)$$

donde V es un potencial eléctrico escalar medido en voltios [V] y ∇ es el operador diferencial *nabla* que representa el gradiente de un campo escalar.

Considerando un medio homogéneo e isotrópico se tiene una densidad de corriente $\vec{J}$ y un campo eléctrico $\vec{E}$, los cuales comparten la misma dirección y sentido relacionados a través de la **ley de Ohm** de la siguiente manera:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.6)$$

donde $\vec{J}$ [$\frac{A}{m^2}$], $\vec{E}$ [$\frac{V}{m}$], y σ es la conductividad eléctrica del medio [$\frac{S}{m}$].

Al combinar las ecuaciones (2.5) y (2.6) se obtiene:

$$\vec{J} = -\sigma \nabla V \quad (2.7)$$

De esta forma podemos observar que la densidad de corriente eléctrica $\vec{J}$, esta en función de la conductividad y del potencial escalar. También se debe cumplirse la ecuación de continuidad sin tomar en cuenta la parte temporal debido a que estamos considerando al campo eléctrico como estático.

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (2.8)$$

Combinando las ecuaciones (2.6) y (2.8) se obtiene:

$$\nabla \cdot \vec{J} = \nabla \cdot \sigma \vec{E} = 0 \quad (2.9)$$

Desarrollando la ecuación (2.9)

$$\nabla \cdot \sigma \vec{E} = \sigma \nabla \cdot \vec{E} + \vec{E} \nabla \sigma = -\sigma \nabla \cdot \nabla V + \vec{E} \nabla \sigma = -\sigma \nabla^2 V + \vec{E} \nabla \sigma = 0 \quad (2.10)$$

Al tratarse de un medio isotrópico y homogéneo, la conductividad sera uniforme, entonces:

$$\nabla\sigma = 0 \quad (2.11)$$

Por lo tanto, el potencial satisface la ecuación:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.12)$$

Obteniendo así la ecuación de **Laplace** para una región donde no existe fuente, siendo ∇^2 el operador de Laplace o Laplaciano.

2.1.1. Fuente puntual en un semi-espacio

Osella (2006) menciona que mediante el método de resistividad se busca obtener una imagen del subsuelo en términos de la distribución de resistividades eléctricas. Esta imagen muestra las variaciones de la resistividad del subsuelo tanto laterales como en profundidad, lo que permite detectar y caracterizar cuerpos o estructuras cuya resistividad difiera de las del medio circundante. Para poder obtener dicha imagen se emplea una fuente artificial de corriente continua mediante la cual se inyecta corriente de intensidad I , a través de un par de electrodos A y B, y se realizan mediciones de la diferencia de potencial (ΔV) en otros dos electrodos M y N (Figura2.1), cuyas posición se eligen convenientemente.

Midiendo la intensidad de corriente inyectada en el suelo, la diferencia de potencial y las distancias relativas entre los electrodos, se obtienen los datos de campo a partir de los cuales se calcula la distribución de resistividades del subsuelo.

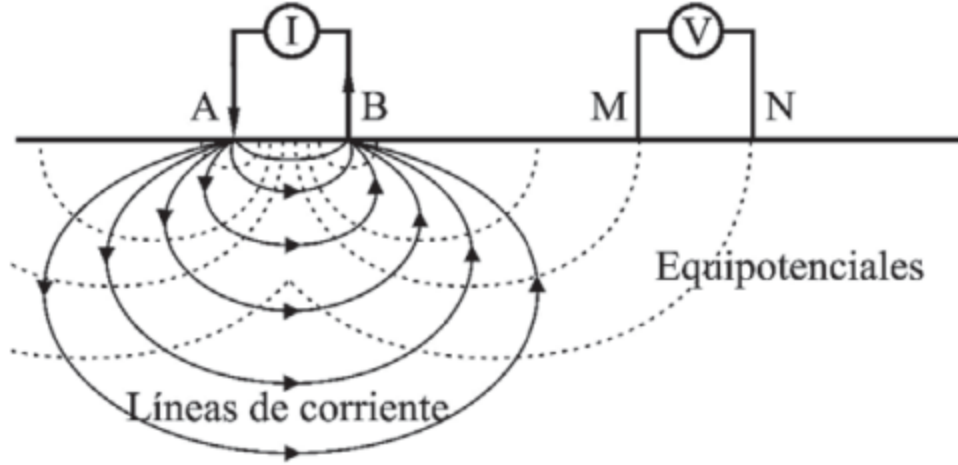


Figura 2.1: Representación del flujo de corriente de una fuente puntual en un semi-espacio (Osella, 2006).

2.1.2. Resistividad aparente

Para poder abordar el problema matemáticamente, en primera instancia se considera un subsuelo compuesto por un semi-espacio homogéneo de resistividad ρ . Se dispone de un generador de corriente, el cual se conecta a dos electrodos A y B, considerados puntuales situados en el suelo. La corriente, de intensidad I , penetra en el subsuelo por A y luego de recorrerlo sale por B. Entonces se mide la diferencia de potencial (ΔV) entre dos puntos M y N a través de un par de electrodos (Figura2.2).

Para establecer las leyes del fenómeno considerado se parte de las ecuaciones de Maxwell para campos estacionarios y utilizando la Ley de Ohm en su expresión vectorial se obtiene:

$$\Delta V = I\rho \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} \right] \quad (2.13)$$

donde AM es representa la distancia entre el electrodo A y el electrodo M, AN la distancia entre el electrodo A y el N y así respectivamente (Figura2.2). El segundo termino

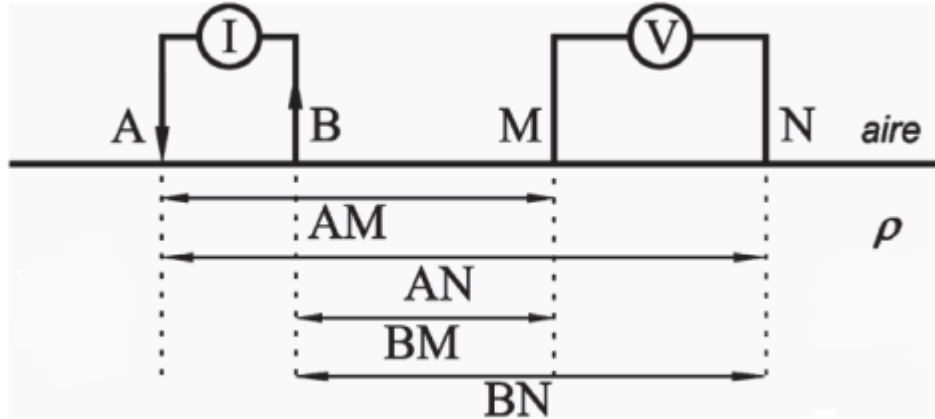


Figura 2.2: Disposición de electrodos sobre un suelo de resistividad uniforme ρ (Osella, 2006).

de esta ecuación tiene dos factores, uno que incluye la resistividad (ρ) y la intensidad de corriente (I), y otro que describe la composición geométrica de los electrodos, es decir, los parámetros geométricos del sistema. De la ecuación (2.13) puede representarse de la siguiente manera:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (2.14)$$

donde k es el **factor geométrico** que guarda la información de la disposición espacial.

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM}} \quad (2.15)$$

La ecuación (2.14) muestra que puede calcular la resistividad (ρ) de un subsuelo homogéneo si se le inyecta una corriente eléctrica de intensidad conocida, se miden la diferencia de potencial en dos puntos y las distancias respectivas entre los electrodos, y se lleva a cabo el cálculo correspondiente. Es importante mencionar que en un suelo

homogéneo se obtiene el mismo valor ρ para cualquiera sea la corriente y distribución de electrodos que se utilice.

De acuerdo con Lakubovskii y Liajov (1980) en el caso particular de un medio homogéneo, la resistividad aparente coincide con la resistividad verdadera $\rho_\alpha = \rho$.

En la practica esto ocurre muy pocas veces debido a que el subsuelo consta de varias capas vertical y lateralmente (Figura. 2.3), es por esto que en la geofísica, en el método de resistividad se utiliza el concepto de resistividad aparente.

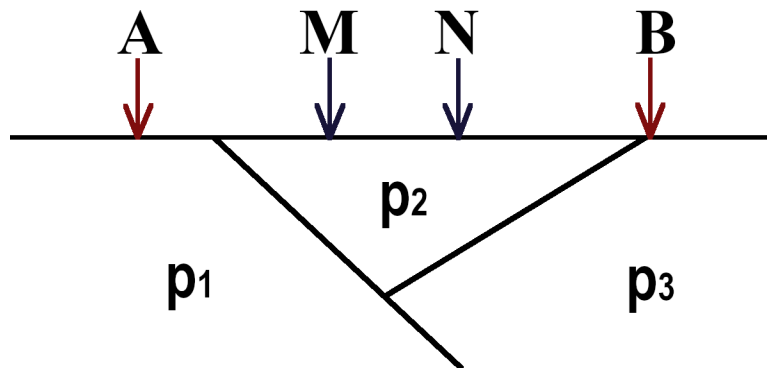


Figura 2.3: Ejemplo de un medio heterogéneo en el subsuelo, donde los puntos A y B corresponden a electrodos de corriente, M y N a electrodos de potencial y ρ_1 , ρ_2 y ρ_3 a diferentes capas del subsuelo (Modificado de De la Torre, 2010).

Lakubovskii y Liajov (1980) escriben que la resistividad aparente (ρ_α) no depende de la intensidad de corriente (I) que se envía al terreno, ya que la variación de corriente origina otra variación proporcional a la diferencia de potencial (ΔV). Esta variable no es el promedio de los valores de resistividad (ρ) obtenidos del subsuelo, sino que cada valor de resistividad aparente (ρ_α) es una medición individual que se asocia al punto debajo del centro del arreglo empleado y de la distribución real de la resistividad (ρ).

Al calcular el factor geométrico (k) se obtiene la localización del punto al cual se le atribuye el valor de resistividad aparente, a este se le conoce como **punto de atribución**.

2.1.3. Resistividad eléctrica

La resistividad es una medición de la facilidad con la que las rocas conducen la corriente eléctrica. Incluso esta descripción siempre de la resistencia eléctrica de las rocas es una función interrelacionada de la porosidad, la permeabilidad, la temperatura, la química de los fluidos, la saturación de fluidos y, en algunos casos, la mineralogía. Los estudios de resistividad eléctrica se pueden realizar utilizando una variedad de técnicas logísticas, generalmente distintas combinaciones de cables y electrodos para diferentes objetivos espaciales, incluido el sondeo de profundidad, el perfilado lateral o una combinación de ambos. Este método comprende un conjunto de diversos arreglos de electrodos (el arreglo se refiere a la disposición de los cables y electrodos) y metodologías. El método de resistividad, se aplica una corriente alterna de baja frecuencia a la tierra a través de un par de electrodos, y se mide una diferencia de potencial entre dos electrodos receptores separados, (los electrodos del receptor se mantienen separados de los electrodos del transmisor para eliminar los efectos de la resistencia de contacto electrodo-tierra), (Buttler, 2005).

La mayoría de los minerales que forman las rocas son conductores muy pobres de la electricidad y, por lo tanto, las corrientes en el suelo son transportadas principalmente por iones disueltos en el agua que se encuentra contenida en los poros de los materiales, (Milsom, 2003). Si la roca o el suelo donde se realiza el estudio están relativamente secos, por lo general, tendrán una resistividad uniformemente alta. Por el contrario, si hay presencia de agua en la zona obtendremos una disminución en la resistividad producto

del contenido iónico del agua. A mayor presencia de agua en el subsuelo disminuye la resistividad (mientras que la conductividad del medio aumenta), de igual manera, la presencia de iones disueltos en el agua pueden disminuir aún más la resistividad del suelo. El propósito del método de resistividad es calcular la resistividad eléctrica del subsuelo, las mediciones realizadas para el estudio de resistividad se consiguen al pasar una corriente al suelo a través de dos electrodos de corriente (generalmente estacas metálicas) y midiendo la diferencia en el voltaje resultante en dos electrodos de potencial. En su forma más básica, el medidor de resistividad tiene una fuente de corriente y circuitos de medición de voltaje que están conectados por cables a un mínimo de cuatro electrodos. Los datos básicos de un estudio de resistividad son las posiciones de los electrodos de corriente y potencial, la corriente (I) inyectada en el suelo y la diferencia de voltaje resultante (ΔV) entre los electrodos de potencial (Figura 2.4) (Loke et al., 2013).

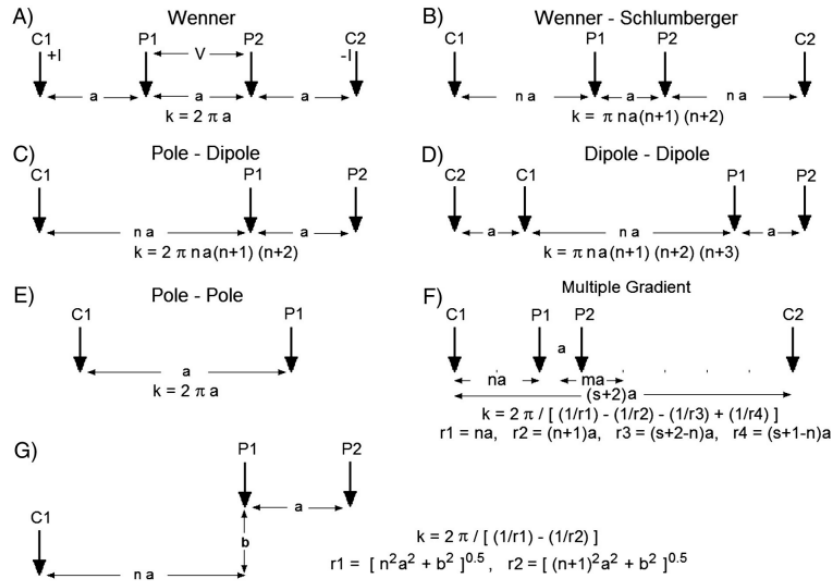


Figura 2.4: Algunos de los arreglos de electrodos mas comunes y sus factores geométricos (Loke et al., 2013). C_1 y C_2 son los electrodos de corriente mientras que P_1 y P_2 son los electrodos de potencial.

2.1.4. Mapeos Laterales

En este tipo de sondeos se buscan variaciones tanto laterales como en profundidad de la resistividad a lo largo de una línea o perfil. De esta forma se busca una mayor penetración de la corriente y el punto de sondeo va ocupando diferentes posiciones a lo largo del perfil. Un mapeo de estas características es ideal cuando se buscan objetos o rasgos aislados que presentan un contraste de resistividad con el medio que los rodea. Debido a que este procedimiento resulta óptimo a la hora de realizar estudios extensos de baja profundidad y alta resolución, los mapeos laterales resistivos son una de las técnicas de prospección mas utilizadas para estudios arqueológicos (Osella, 2006).

2.1.5. Roll along

Cuando la longitud de la zona de interés es superior a la del cable que se emplea para los arreglos de electrodos, se emplea una técnica conocida como roll along (Figura 2.5), la cual consiste en desplazar parte del arreglo de electrodos de manera que se cubra la totalidad de la zona del estudio, por ejemplo, si se busca cubrir una sección de 360 m y nuestro arreglo de electrodos esta formado por dos segmentos de 24 electrodos separados a 5 m cada uno (240 m), el desplazamiento mínimo para cubrir toda la sección es de 120 m correspondiente al 50 % del arreglo, este desplazamiento puede realizarse a 25, 50 y 75 %. A pesar de que la profundidad de investigación máxima puede verse afectada los software de inversión pueden interpolar los datos considerando la máxima profundidad (Bernard, 2003).

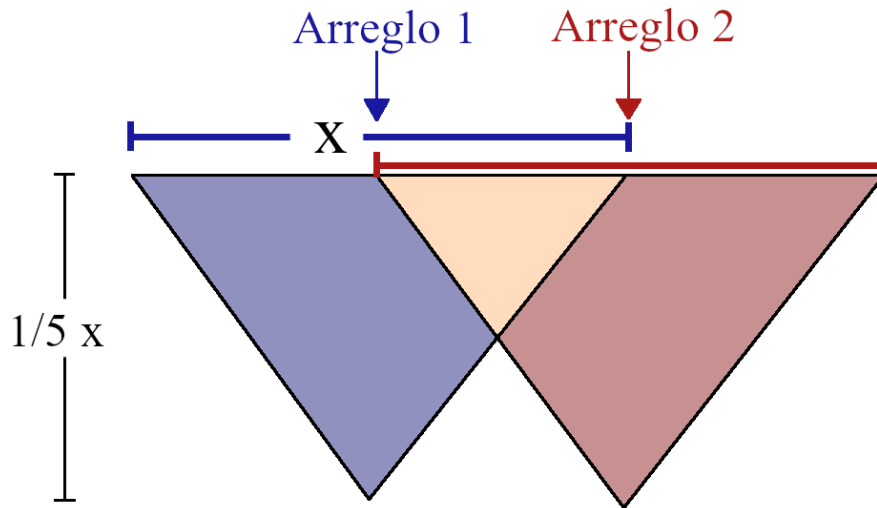


Figura 2.5: Ejemplo de un roll along, donde la parte azul corresponde a un primer arreglo de electrodos y la parte roja un segundo arreglo de electrodos. X representa la longitud total a cubrir con el levantamiento (Modificado de Bernard, 2003).

2.1.6. Geometrías no convencionales

En muchas ocasiones no es posible realizar arreglos de electrodos en forma de rejillas o líneas paralelas debido a que pueden existir algunas dificultades que impidan la instalación de los electrodos en forma de cuadrículas, derivado de esto, surge la necesidad de implementar geometrías de electrodos que se adapten a las características del sitio de estudio (Tejero-Andrade et al 2015). Para construir estos arreglos se suele emplear la configuración de electrodos Wenner-Schlumberger ya que las lecturas medidas son menos ruidosas, principalmente hacia el centro del cuadrado, que aquellas realizadas con configuraciones dipolares (Chavez et al, 2017). En la figura 2.6 se pueden observar la distribución de los puntos de adquisición del arreglo en L, mínimo acoplamiento y gradiente.

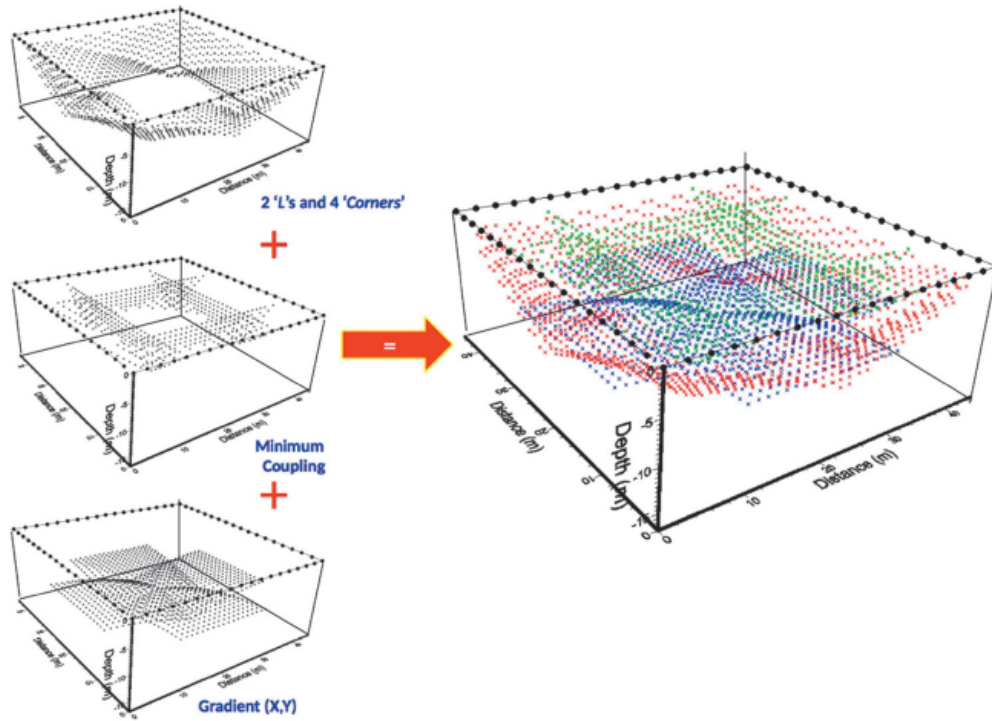


Figura 2.6: Puntos de atribución de los arreglos geométricos no convencionales. Arreglo en L, mínimo acoplamiento y gradiente (Chavez et al., 2017).

2.2. Radar de Penetración Terrestre

De acuerdo con Osella (2006) para describir el funcionamiento básico del método (Figura 2.7) se muestra una secuencia en la cual el emisor y el receptor son desplazados conjuntamente sobre el suelo, emitiendo pulsos y midiendo las señales reflejadas. Para cada posición de emisión se muestra la correspondiente señal recibida como función del tiempo.

Para cada caso mostrado en la figura 2.7, los tiempos de ida y vuelta $t_i - v$ son registrados por el receptor, los pulsos recibidos se vinculan con las profundidades p de los reflectores según la siguiente expresión matemática.

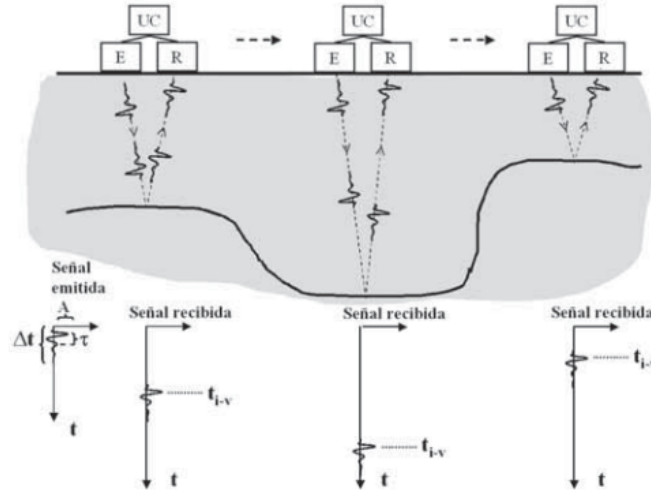


Figura 2.7: Donde (E) emisor, (R) receptor y (UC) unidad de control. Para las tres posiciones esquematizadas se muestra la señal recibida en función del tiempo (t), indicándose el tiempo de ida y vuelta $t_i - v$. Esta se caracteriza por su extensión atemporal, Δt amplitud A y periodo temporal τ (Osella, 2006).

$$p = \frac{t_i - v}{2} \quad (2.16)$$

donde v es la velocidad de propagación promedio a lo largo del recorrido. En la ecuación (2.16), el factor se debe a que el tiempo de transito entre el sistema de GPR y la superficie de interés es la mitad del tiempo de ida y vuelta. Por ende, mediante la ecuación (2.16) se obtiene la profundidad de los reflectores para cada posición sobre la superficie, una vez que se han medido en las correspondientes trazas los tiempos $t_i - v$ para los pulsos reflejados y conocida la velocidad v .

Cuando un pulso electromagnético incide sobre una discontinuidad, se generan dos pulsos que emergen de la misma (Figura 2.8 I). Se puede decir que parte del pulso que ha incidido sobre la superficie de discontinuidad se a reflejado, y que la otra parte se ha transmitido a través de la misma. La permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética

son las magnitudes físicas que determinan el fenómeno de reflexión y transmisión. Como la mayoría de los materiales que se encuentran en las capas accesibles con un GPR poseen permeabilidad magnética similar a la del vacío, la dependencia respecto de esta muchas veces no se tiene en cuenta.

Si un pulso incide sobre la superficie de discontinuidad (Figura 2.8 II) con un ángulo θ_i , medido respecto de la dirección perpendicular a dicha superficie, los pulsos reflejados y transmitidos se alejan formando ángulos θ_r y θ_t , respectivamente, ambos medios respecto a la referencia mencionadas. Las relaciones matemáticas que vinculan estos ángulos con las permitividades relativas ε_A y ε_B y las permeabilidades relativas μ_A y μ_B de ambos medios son las siguientes:

$$\sin(\theta_i) = \sin(\theta_r) \quad (2.17)$$

$$\frac{\sin(\theta_i)}{\sqrt{\mu_A \varepsilon_A}} = \frac{\sin(\theta_r)}{\sqrt{\mu_B \varepsilon_B}} \quad (2.18)$$

Las ecuaciones (2.17) y (2.18) dan las direcciones en las cuales se propagan los pulsos que resultan del proceso de reflexión-transmisión, para un ángulo de incidencia dado y para parámetros del subsuelo conocidos. Análogamente, es posible obtener ecuaciones matemáticas que calculen las amplitudes de los pulsos que resultan, como funciones de los parámetros mencionados. En el caso mas sencillo de incidencia aproximadamente normal ($\theta_i = 0^\circ$) el cociente entre la amplitud reflejada y la incidente R esta dado por:

$$R = \frac{\sqrt{\mu_A \varepsilon_A} - \sqrt{\mu_B \varepsilon_B}}{\sqrt{\mu_A \varepsilon_A} + \sqrt{\mu_B \varepsilon_B}} \quad (2.19)$$

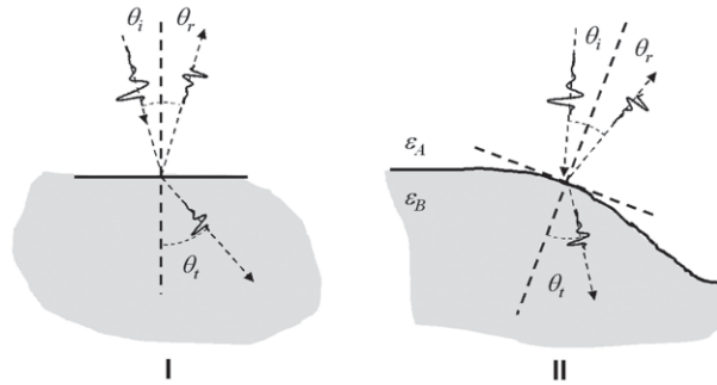


Figura 2.8: Esquema de la reflexión y la transmisión de un pulso electromagnético en una interfaz que separa dos medios con distinta permitividad. Los ángulos de incidencia θ_i , de reflexión θ_r y de transmisión θ_t son medidos respecto de la dirección perpendicular a la superficie. I: Interfaz horizontal, II: Interfaz inclinada (Osella, 2006).

$$T = 1 - R \quad (2.20)$$

A partir de estas ecuaciones puede verse que cuanto mayor contraste presentan la permitividad y la permeabilidad relativas en dicha interfaz, más intensa es la señal reflejada y menos intensa la transmitida. Recíprocamente, cuanto menor es el contraste, la señal reflejada es mas débil y la transmitida más intensa. Es por ello que si no hay contraste suficiente, la señal reflejada en una dada superficie de discontinuidad puede no ser percibida por el detector y, por lo tanto, la interfaz correspondiente no ser detectada. Por el contrario, si el contraste es grande, la interfaz va a ser detectada con facilidad. Asimismo, si el cambio en la permitividad o en la permeabilidad no se produce en forma abrupta, es decir, si se produce gradualmente a lo largo de cierto espesor, es probable que la señal reflejada resulte débil. Si el espesor fuese suficientemente grande, la señal reflejada podría ser directamente inexistente.

El radar de penetración terrestre o GPR como también se le conoce, es un método que permite detectar y ubicar estratos y objetos enterrados con alta precisión, obteniendo mapas detallados del subsuelo. Las prospecciones de GPR en estudios arqueológicos normalmente requieren de tiempos relativamente cortos, pudiendo ser realizadas con costos razonables y bajo condiciones **no destructivas** de investigación. Este método por si mismo o en combinación con otros métodos geofísicos de exploración constituye una poderosa herramienta para la investigación arqueológica (Conyers, 1997; Leckbusch, 2003). En este método se emiten pulsos electromagnéticos desde la superficie del suelo, estos se propagan a través del subsuelo y se reflejan en las discontinuidades que hallan a su paso (Figura 2.9). La energía de los pulsos reflejados se mide sobre la superficie mediante dispositivos receptores. Por un lado, se mide el tiempo que tarda el pulso desde que es emitido hasta que es detectado en la superficie, esto sirve para calcular la profundidad de un medio reflector. Por otro lado, la comparación de las amplitudes de los pulsos emitidos y recibidos, brinda información adicional acerca de la composición del subsuelo (Osella, 2006).

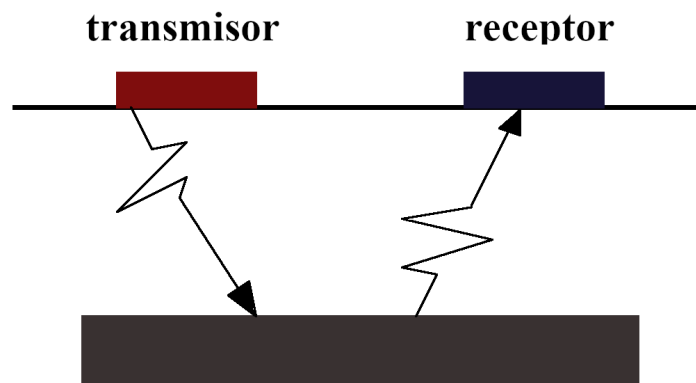


Figura 2.9: En el método de GPR una antena emisora envía un pulso electromagnético a través del subsuelo, parte de esa onda se refleja en los materiales del subsuelo y es captada por la antena receptora (Modificado de Butler, 2005).

2.3. Métodos de exploración geofísica somera

En la actualidad la geofísica se ha convertido en una de las herramientas más útiles en cuanto a exploración arqueológica nos referimos, pues no solo nos brinda información sobre las estructuras que se encuentran en el subsuelo, también es útil en estructuras que se encuentran en la superficie. Además, es útil en la delimitación de zonas que pueden contener diversos tipos de objetos de valor arqueológico. En muchas ocasiones los sitios y/o estructuras, no pueden ser excavados por diversas razones, por lo que contar con una herramienta como la geofísica que comprende técnicas de exploración no destructivas es sumamente importante en el estudio y preservación de estos sitios y estructuras. Así mismo diferentes autores entre ellos El-Gady (2019) han detallado la importancia de la geofísica en la arqueología, ya sea en sitios conocidos o sin explorar, los métodos geofísicos juegan un papel fundamental debido a la amplia variedad de métodos geofísicos que pueden ser aplicados en la arqueología. El funcionamiento de estos métodos se basa principalmente en medir el contraste existente de alguna de las propiedades físicas del material que existe entre el objeto de estudio y el subsuelo circundante. Comprender la arqueología en términos de contrastes físicos, densidad, susceptibilidad, resistencia eléctrica, etc. es fundamental al momento de elegir y posteriormente al aplicar la técnica geofísica adecuada.

Osella (2006), menciona que el registro arqueológico constituye un aspecto fundamental en el patrimonio cultural de un país, por lo tanto, es imprescindible recurrir a metodologías y técnicas que contribuyan a mejorar su preservación y conocimiento. El manejo y preservación del patrimonio cultural es una tarea muy compleja que requiere de técnicas especiales que varían de acuerdo con los objetivos que se persigan. Por ejemplo, en el caso de estructuras conocidas por su evidencia superficial, el objetivo puede

ser la obtención de un plano de alta resolución, a fin de planificar una excavación minimizando el impacto sobre la misma. De igual manera, cuando no existe evidencia clara sobre la presencia de estructuras u objetos de interés, se pueden utilizar estos métodos para localizar nuevas estructuras ó materiales de interés. En la tabla 2.1 se muestran los diferentes métodos geofísicos, la propiedad física que miden así como sus principales usos.

Como nos podremos dar cuenta el uso de las técnicas geofísicas en la arqueología es de gran importancia. Sin embargo, así como lo menciona El-Gady (2019), no todos los métodos son útiles para su aplicación en la arqueología, todo depende del tipo de objetivo que tengamos así como de las condiciones del terreno en el que nos encontremos. Algunos de los métodos más relevantes para la arqueología son la resistividad y los métodos electromagnéticos de manera más concreta el GPR. Cada uno de estos métodos es diferente de otro, principalmente por que cada método mide una propiedad física distinta. De acuerdo a esto y a las condiciones del terreno donde se realizará la adquisición de datos, se deberá seleccionar por lo menos dos métodos y, si es posible, los tres. En este mismo sentido, pueden existir múltiples orígenes para una misma anomalía (no unicidad en la geofísica), por lo que es recomendable aplicar mas de un método de exploración e integrar toda la información disponible con la intención de disminuir las incertidumbres en la interpretación de datos (Pueyo et al., 2007).

Reynolds (2011) menciona en su libro que los diferentes métodos de exploración geofísica se basan en diferentes propiedades físicas que se encuentran en el subsuelo, y es importante que se utilice la técnica adecuada para un tipo determinado de aplicación. En el caso particular de la arqueología, dos de los métodos más utilizados son: **Resistividad eléctrica** y **GPR**. Sin embargo, no son los únicos métodos existentes, a continuación

se presenta una lista detallada de los diferentes métodos geofísicos y sus aplicaciones. Todo estudio geofísico trata de determinar la naturaleza del subsuelo, pero es de suma importancia que el objetivo principal del estudio este bien delimitado desde el principio.

Tabla 2.1: Métodos geofísicos y sus diferentes aplicaciones. Modificado de Reynolds (2011).

Método Geofísico	Propiedad física medida	Aplicaciones										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Gravimetría	Densidad	P	P	s	s	s	s	x	x	s	x	x
Magnetometría	Susceptibilidad	P	P	P	P	x	m	x	P	P	x	x
Refracción sísmica	Modulo elástico; densidad	P	P	m	s	s	s	x	x	x	x	x
Reflexión sísmica	Modulo elástico; densidad	P	P	m	s	s	m	x	x	x	x	x
Resistividad	Resistividad	m	m	P	P	P	P	P	s	P	P	m
		x	x	P	m	P	m	m	m	x	P	x
Polarización inducida	Resistividad; capacitancia	m	m	P	m	s	m	m	m	m	P	m
Electro-Magnéticos (EM)	Conductividad; inductancia	s	P	P	P	P	P	P	P	P	m	m
EM - VLF	Conductividad; inductancia	m	m	P	m	s	s	s	m	m	x	x
EM - GPR	Permitividad; conductividad	x	x	m	P	P	P	s	P	P	m	P
Magnetotelúrico	Resistividad	s	P	P	m	m	x	x	x	x	x	x
Resonancia magnética	Momento magnético; porosidad	x	x	x	x	P	x	m	x	x	x	x
Radiométrica	*radioactividad	s	s	P	s	x	x	x	x	x	x	x

P = método principal; s = método secundario; m = puede ser utilizado; x = inapropiado

Aplicaciones

- 1 Exploración de hidrocarburos
- 2 Estudios de geología regional
- 3 Exploración/explotación de depósitos minerales
- 4 Investigaciones ambientales
- 5 Investigaciones hidrogeológicas
- 6 Detección de cavidades subterráneas
- 7 Mapeo de lixiviado y columnas contaminantes
- 8 Ubicación y definición de objetos metálicos enterrados
- 9 Arqueogeofísica
- 10 Biogeofísica
- 11 Geofísica forense

2.3.1. Consideraciones acerca de los métodos de exploración geofísica

Como mencionamos antes, todos los métodos de exploración geofísica miden una propiedad particular en el subsuelo y de acuerdo con las circunstancias particulares de cada sitio en específico, habrá ocasiones donde sea imposible medir, por ejemplo,

en el caso de estudio que mencionamos en paginas posteriores, al tratar de utilizar el método de magnetometría, nos fue imposible llevar a cabo el levantamiento de datos ya que en el sitio de estudio existe una placa metálica que impide realizar las mediciones correspondientes. De esta forma, se debe tener en cuenta que habrá situaciones donde las limitaciones propias de cada uno de los métodos, impida que se lleve a cabo la adquisición de datos.

Existen diferentes maneras de llevar a cabo un levantamiento de datos, pero es importante realizar de manera cuidadosa la planeación de los estudios, por eso la importancia de tener un conocimiento sólido de los métodos geofísicos y sus principios operativos, de esta manera se pueden realizar estudios útiles y eficientes (Reynolds, 2011).

No unicidad en la geofísica

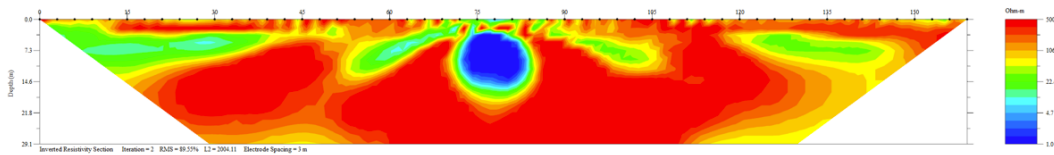
De acuerdo con la teoría de inversión, en un modelo inverso, la solución completa a un problema se consigue al encontrar un modelo o estructura que reproduzca las observaciones y, que dicho modelo sea evaluado para determinar cuales de estas son significativas en la presente observación, a esto se le conoce como el principio de no unicidad en la geofísica (Oldenburg, 1978).

Topografía y profundidad de investigación

La profundidad de investigación depende directamente el numero de electrodos empleados y de la longitud total del cableado además de factores como; la resistividad del suelo, la intensidad de la corriente suministrada, sensibilidad del instrumento empleado factor geométrico. Por ejemplo para las configuraciones de electrodos Wenner, Schlumberger y dipolo-dipolo, la profundidad de investigación máxima es del orden de 0.2 veces

la longitud total de la longitud del arreglo (Bernard, 2003). Así mismo, los cambios de pendiente superiores a 10° en el terreno afectan a la concentración de las líneas de fuera de campo eléctrico. Este efecto (Figura 2.10), genera anomalías en los datos que pueden ser corregidos mediante la obtención de datos topográficos que posteriormente son incorporados al procesado de datos (Alvares, 2015).

TRE 2D sin correcciones topográficas



TRE 2D con correcciones topográficas

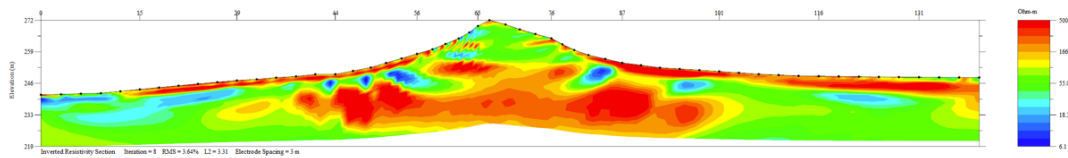


Figura 2.10: Ejemplo de TRE 2D con y sin correcciones topográficas. (Instruction manual AGI EarthImager 2D, 2014).

Capítulo 3

Caso de estudio: El Cerrito de los Agaves

En esta sección se muestra el procedimiento mediante el cual se obtuvieron los resultados derivados de dos campañas de adquisición de datos. Este trabajo se llevó a cabo en el patio principal del sitio arqueológico conocido como **Cerrito de los Agaves**, ubicado en el municipio de Jesús María en el estado de Jalisco, México (Figura 3.1). La primera de estas campañas comprende del 18 al 22 de enero de 2022 y la segunda del 13 al 14 de mayo de 2023. Durante la primera campaña de adquisición de datos se realizó una serie de levantamientos de resistividad eléctrica con la finalidad de obtener un mapa tridimensional de la resistividad del subsuelo del patio **TRE 3D**. Así mismo, se intentó realizar un levantamiento magnetométrico en el sitio, sin embargo, esto no fue posible debido a la presencia de una placa metálica que se encuentra en el medio del patio. Durante la segunda campaña nos enfocamos en realizar dos levantamientos 2D en zonas que habíamos delimitado gracias a los resultados obtenidos de la campaña anterior. De igual manera, realizamos un levantamiento de GPR con la finalidad de complementar nuestro trabajo.

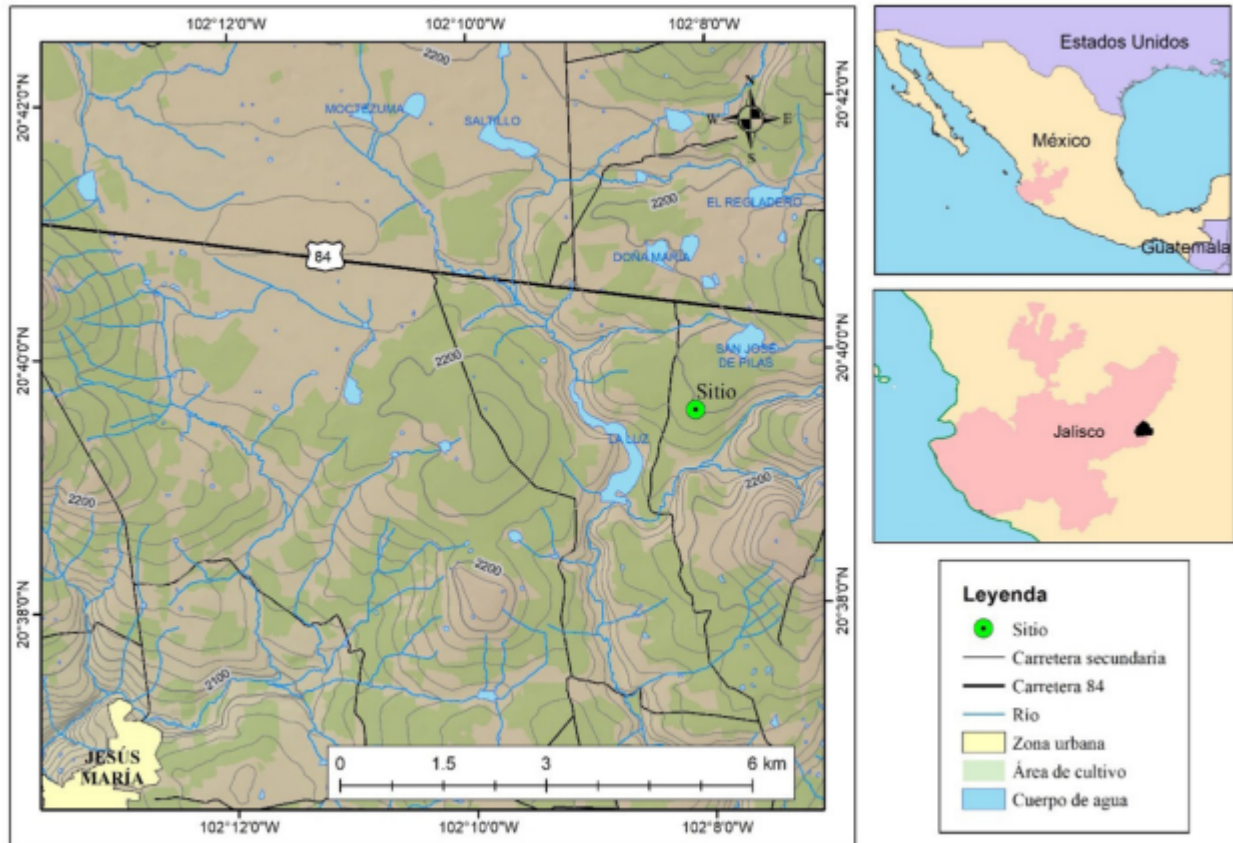


Figura 3.1: Ubicación del sitio El Cerrito de Los Agaves (Esparza et al., 2021).

3.1. Zona de estudio

En la actualidad la región de los Altos de Jalisco es todavía poco comprendida en cuanto a sus dinámicas culturales, principalmente lo relativo a los periodos de ocupación o filiación cultural. Hasta ahora se han identificado algunas relaciones con áreas culturales cercanas sobre todo con el Bajío y la Cuenca del río Lerma-Santiago. Gran parte de los asentamientos descubiertos en esta región pertenecen al periodo Epiclásico (600-900 d.C.), cuyo patrón de asentamiento se caracteriza con sitios establecidos en las mesetas, cerros o puntos elevados. en cuanto a su arquitectura, muchos de estos sitios están conformados por patios hundidos, plazas cerradas, además de palacetes con columnas, rasgos culturales que sugieren sociedades jerarquizadas con cierto control territorial. El

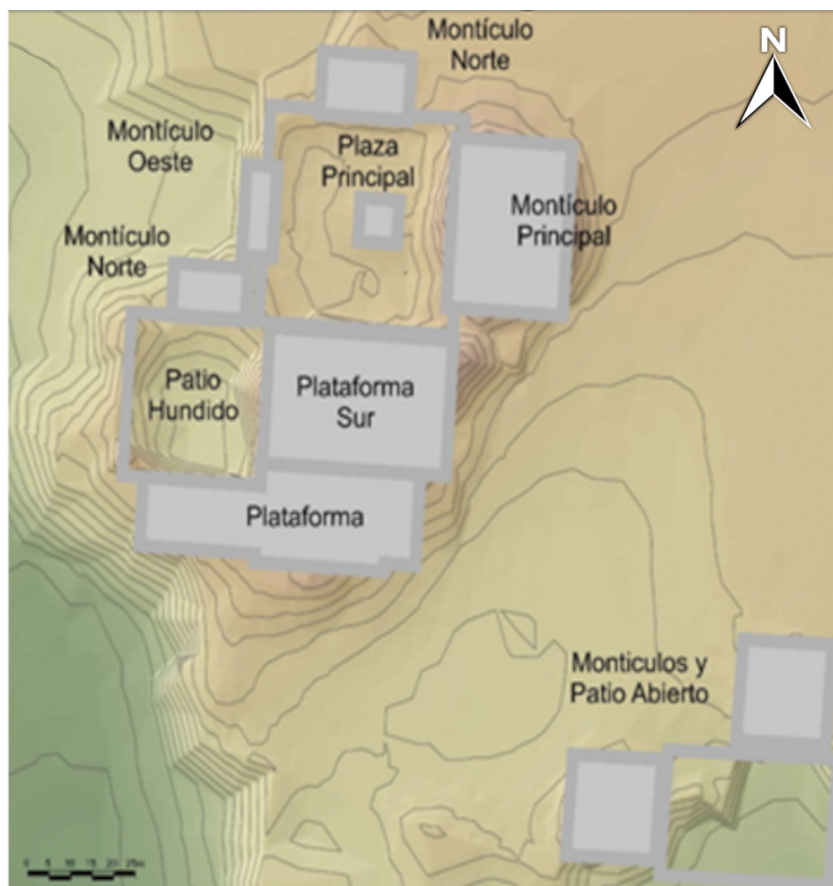


Figura 3.2: Croquis del sitio (Esparza et al., 2021).

Cerrito De Los Agaves se localiza en la localidad conocida como La Luz en el municipio de Jesús María, Jalisco, en la región conocida como Los Altos de Jalisco. Este sitio es una de las tres áreas con vestigios prehispánicos que conforman el **Proyecto Arqueológico Presa de La Luz**, y es la única que hasta el momento cuenta con monumentos arquitectónicos. Este complejo consta principalmente por un patio cerrado (Plaza principal), (Figura 3.2) con un altar central delimitado al oriente por un montículo piramidal de aproximadamente 12 metros de altura, al sur, por una plataforma rectangular de unos 4 metros de altura. En la parte suroeste del complejo se encuentra un patio hundido de menor tamaño que el principal (Esparza et al., 2021), sin embargo, esta sección de la zona de estudio no se incluye en este trabajo.

Antecedentes

De acuerdo con un resumen escrito por el Dr. Rodrigo Esparza en el que se describen los trabajos previos a nuestras visitas, desde el año 2020 se llevan realizando trabajos en el sitio como parte del proyecto El Cerrito de los Agaves, los cuales comenzaron con la delimitación de un altar ubicado en el patio principal. La parte superior del altar presentaba un acomodo de rocas clavadas (formando un cuadro) que llevó a los investigadores a reflexionar que pudiera tratarse de algún entierro o ofrenda como parte de la construcción del altar y de todo el recinto. Durante la temporada de 2021 se realizó un pozo de sondeo dentro del altar, dentro de este proceso no se encontró ninguna alteración de algún saqueo o daño por lo trabajos agrícolas llevados por años sobre el patio, al contrario, todo se encontraba bien sellado, incluso en algunas partes se podía observar aun algunos aplanados de la parte superior del altar. Al llegar a la profundidad de metro y medio, apareció en la parte central una pequeña ofrenda que estaba constituida de 3 vasijas las cuales estaban sobre un piso firme color café. Este hallazgo nos hizo confirmar que la construcción de este altar fue para el periodo Epiclasico (600 - 900 d.c), ya que las características de las vasijas encontradas así lo indican.

El hallazgo de la boca de la tumba de tiro Se retiró la ofrenda con la intención de verificar si había otros objetos a un costado de la ofrenda, sin embargo, lo que se encontró fue un cambio abrupto en la coloración de la tierra, a medida que se indagaba se notaba más la intrusión en el piso, una oquedad rellena de tierra rojiza (arcilla roja) comenzó a tomar forma circular a medida que avanzaba la profundidad. A un metro de profundidad aparecieron en el perfil del pozo unos huecos a ambos lados, los cuales se trataban de peldaños para subir y bajar de la tumba. A 5 metros de profundidad se podían apreciar mas de 10 peldaños, el tiro estaba compuesto por tierra roja muy limpia,

casi sin rocas y tampoco aparecían otros materiales como cerámica o lítica tallada. A finales de marzo de 2021 se tuvo que cerrar la excavación por motivos de la pandemia, se selló el tiro con una gran tapa de metal y se rellenó el pozo del altar con rocas.

Reencuentro con la tumba de tiro A finales de 2021 se reiniciaron los trabajos de investigación en el tiro. Durante el tiempo que se mantuvo cerrado el tiro no hubo colapsos o alguna alteración por cuestiones de vandalismo o saqueo. En la visita anterior, se había llegado hasta los 5 metros de profundidad y de ahí se continuaron los trabajos de excavación, al llegar a los 6 metros comenzaron a salir tepalcates y una cama de rocas, estos materiales no eran fácilmente fechables, además de que parte del espacio se cerraba debido a la presencia de una enorme roca, la cual no se conoce si fue puesta a propósito o si es parte natural del lugar. Cabe mencionar que hasta los 6 metros de profundidad aparecieron los peldaños en el perfil del tiro, de igual manera, es a partir de esta profundidad que se comienza a tener problemas de continuidad, pues se dejó de encontrar materiales, dejaron de aparecer peldaños y además, no hay evidencias de que exista cámaras o algún otro elemento. Es de acuerdo a esta incertidumbre sobre si existe o no la presencia de algún otro elemento próximo al tiro que los investigadores plantearon los siguientes objetivos:

- Conocer si el tiro lleva a alguna cámara. Y de ser así, ¿Cuál es la ubicación de esta?
- De acuerdo con la falta de evidencia ¿Existe la posibilidad de que no haya nada en este lugar y el tiro se encuentre vacío?
- Determinar la ubicación de otros tiros dentro del patio principal.
- Decidir si continuar o no con el proyecto.

3.2. Metodología

3.2.1. Primera visita a campo

Para la primera visita a campo se diseñó una cuadrícula tomando en cuenta el espacio disponible de 40x40 metros que abarca la totalidad del patio principal, la cual usamos como referencia para realizar nuestros arreglos de electrodos, dentro de esta cuadrícula la entrada del tiro se encuentra situada casi a la mitad de la misma (Figura 3.3).

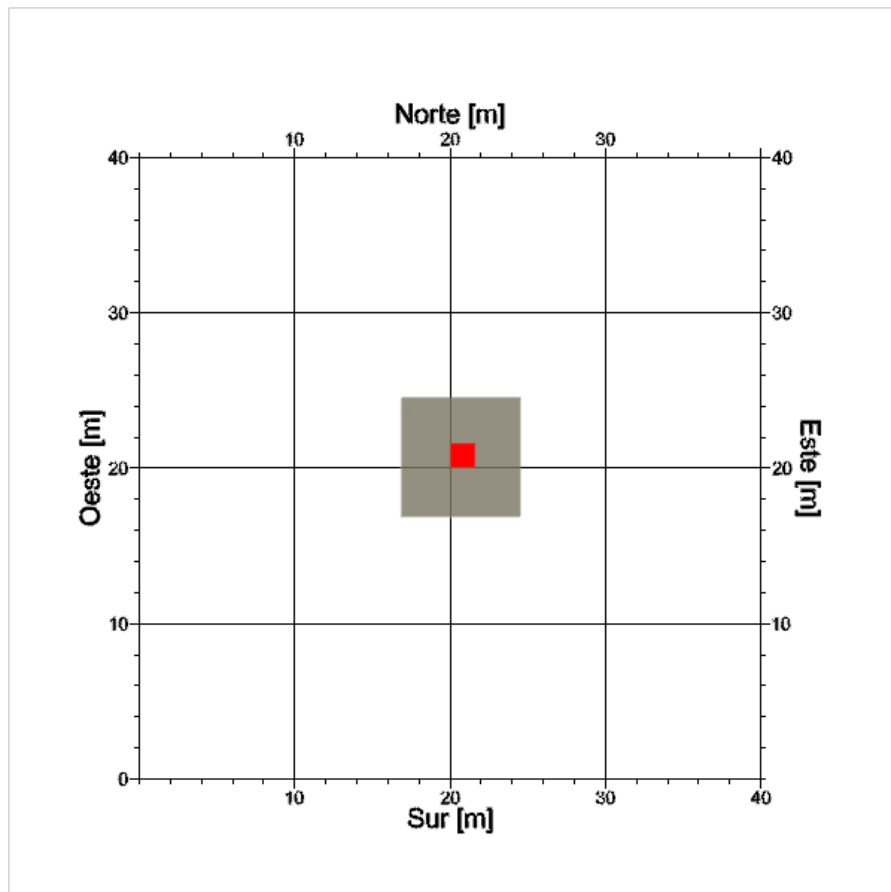


Figura 3.3: Ubicación del tiro dentro de la cuadrícula.

Esta cuadrícula se delimitó usando estacas de madera colocadas a los extremos de nuestra cuadrícula, las cuales ubicamos con la ayuda de una cinta métrica y una brújula, de igual manera usamos como referencia las delimitaciones de la plaza (montículos y

plataformas), ubicado al centro de la cuadrícula se encuentra la apertura del tiro (Figura 3.4).



Figura 3.4: Fotografía de la apertura del tiro.

Tomografía de resistividad eléctrica 3D

La adquisición de los datos de resistividad se realizó con el resistivímetro **IRIS, Syscal Pro** (Figura 3.5) y consistió en tres arreglos de electrodos principales (S-N, W-E y no convencional), donde a su vez, cada uno de estos arreglos tenía una orientación distinta, de forma que se cubrió todo el patio principal. Cada uno de estos arreglos estaba compuesto por arreglos más pequeños, el primero de estos, estaba compuesto por tres arreglos de electrodos con una orientación S-N (Figura 3.6). El segundo consistió en una serie de arreglos de electrodos con orientación W-E (Figura 3.7). Finalmente, el último arreglo comprendía una geometría cuadrangular al rededor de la entrada del tiro (Figura 3.8).



Figura 3.5: Resistivímetro Syscal Pro

Arreglo de electrodos S-N

En la Figura 3.6 observamos la composición del arreglo S-N. Este está compuesto en su totalidad por 144 electrodos, para realizarlo se colocaron tres arreglos de 48 electrodos cada uno, todos con orientación S-N. Se procede colocando 48 electrodos en dos líneas paralelas separadas a 8 m. cada línea cuenta con 24 electrodos que a su vez están separados 1.75 m. entre sí. Una vez realizada la medición, se desplaza la primera línea de electrodos 16 m. a la derecha (la primera línea de izquierda a derecha de acuerdo a la Figura 3.6), dando lugar así a nuestro segundo arreglo de electrodos. Es importante aclarar que la segunda línea de electrodos en el primer arreglo ahora pasa a ser la primera en este segundo arreglo, esto se conoce como roll-along lateral. Una vez concluida la medición del segundo arreglo se procedió a realizar un roll-along lateral una vez más, desplazando el primer electrodo del segundo arreglo 16 m. a la derecha, de esta forma

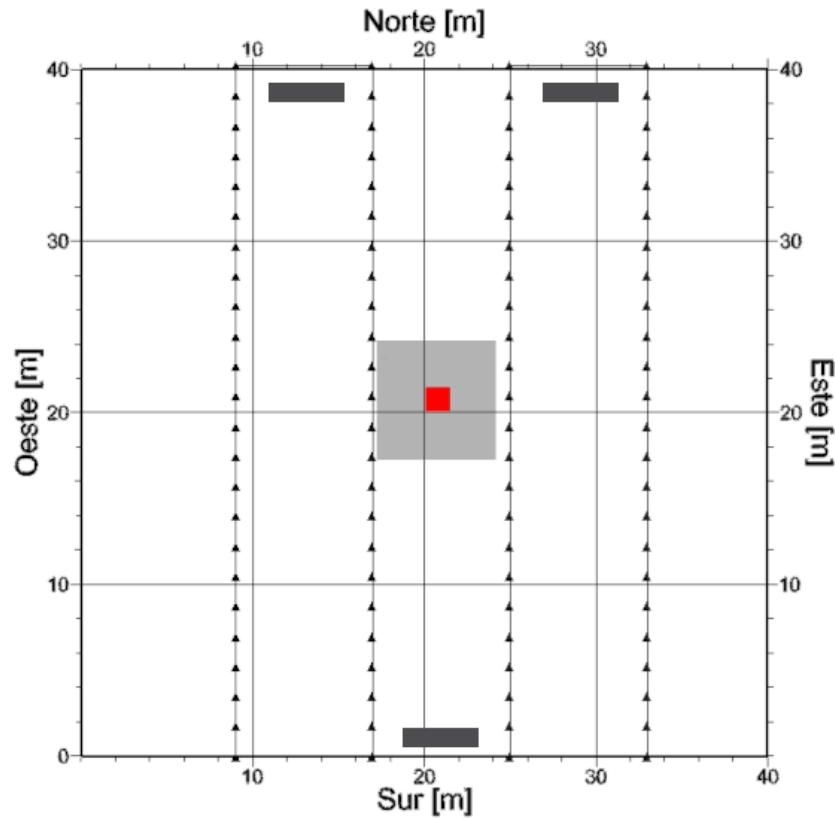


Figura 3.6: Arreglo de electrodos S-N.

al efectuar las mediciones cubrimos la totalidad de la zona de estudio.

Arreglo de electrodos W-E

El levantamiento W-E (Figura 3.7) está compuesto al igual que el arreglo anterior por 144 electrodos, para realizarlo se colocaron tres arreglos de 48 electrodos cada uno, todos con orientación W-E. Se procedió colocando 48 electrodos en dos líneas paralelas con orientación W-E separadas a 8 m. cada línea cuenta con 24 electrodos que a su vez están separados 1.75 m. entre sí. Una vez realizada la medición, se desplazó la primera línea de electrodos 16 m hacia abajo (tomando como referencia la línea superior de acuerdo a la (Figura 4.7), dando lugar así a nuestro segundo arreglo de electrodos. Es

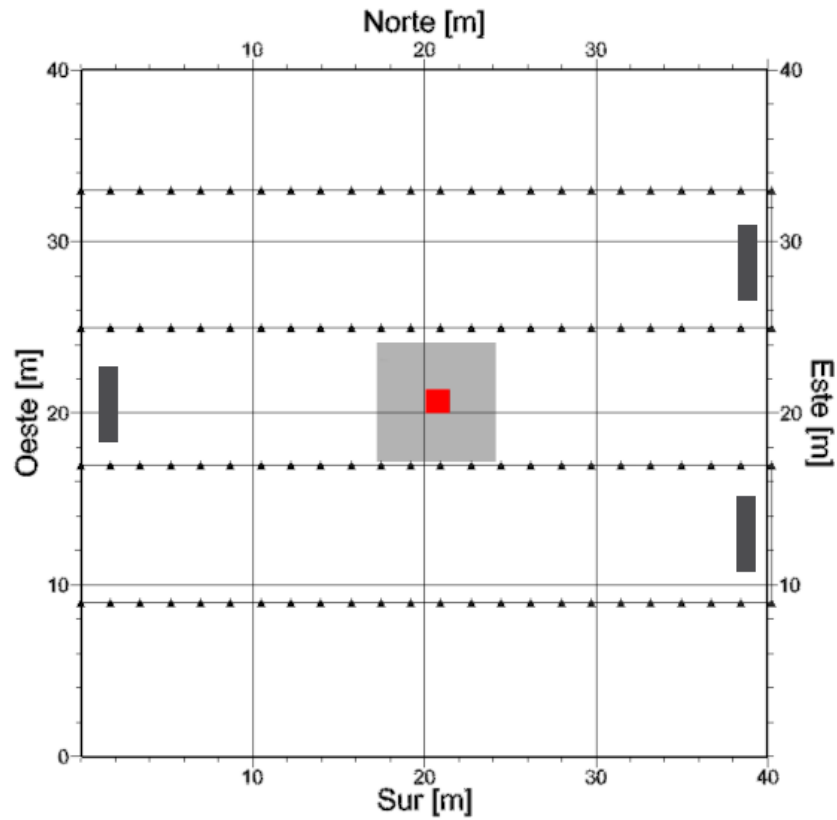


Figura 3.7: Arreglo de electrodos W-E.

importante aclarar que la segunda línea de electrodos en el primer arreglo ahora pasa a ser la primera en este segundo arreglo, esto se conoce como roll-along lateral. Una vez concluida la medición del segundo arreglo se procedió a realizar un roll-along lateral una vez más, desplazando el primer electrodo del segundo arreglo 16 m hacia abajo, de esta forma al efectuar las mediciones cubrimos la totalidad de la zona de estudio. Al igual que con el arreglo anterior, se efectuó un roll-along lateral cada vez que se concluía con la medición.

Arreglo de electrodos en L

Para el ultimo arreglo (Figura 3.8) se realizó un arreglo de electrodos de una geometría cuadrangular (este tipo de geometría también se conoce como arreglo de electrodos no convencional) al rededor del tiro de la tumba, este arreglo se hizo a modo de complemento con la finalidad de conseguir una mejor resolución de nuestros datos respecto al tiro. A diferencia de los otros levantamientos, este arreglo solo consta de 48 electrodos. Sin embargo, se procedió en dos partes, por medio de dos arreglos en forma de L con 24 electrodos cada uno y separados 2.5 m. entre si. Cabe mencionar que para este arreglo no fue necesario realizar el roll-along.

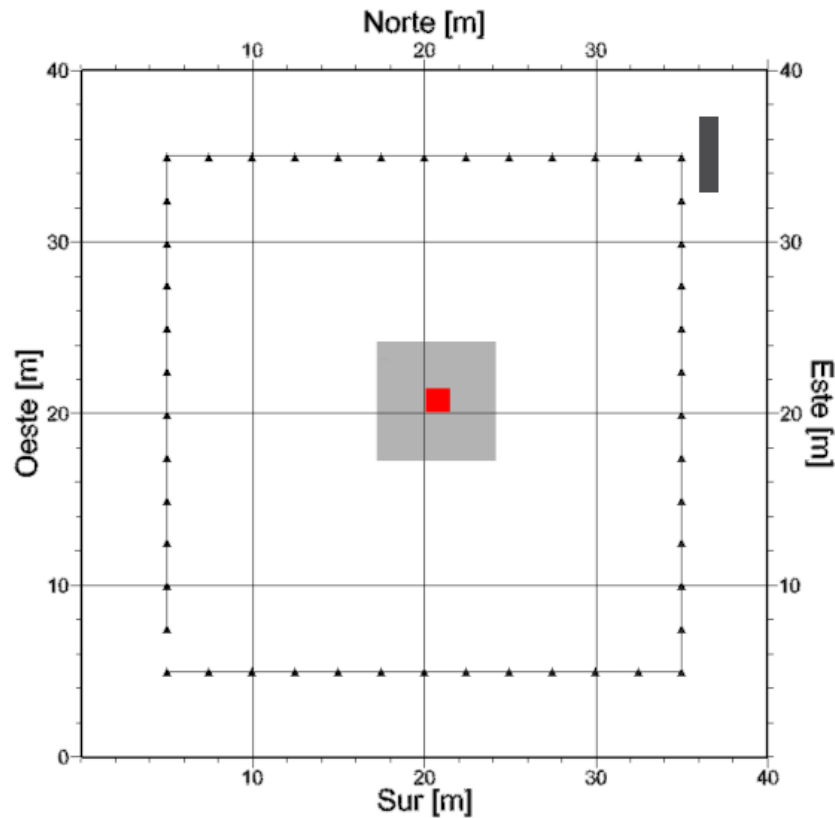


Figura 3.8: Arreglo de electrodos no convencional.

3.2.2. Resultados

Tomografía de resistividad eléctrica 3D

Como resultado de la inversión de los datos obtenidos en campo se obtuvo un mapa de resistividad del sitio (Figura 3.9 y 3.10), mediante el software **EarthImager** con la finalidad de generar imágenes que sean de utilidad y de esta forma cumplir con los objetivos planteados. El objetivo de la inversión es que a partir de los datos de campo se obtenga una imagen de la distribución de la resistividad del subsuelo que se aproxime a la resistividad real que es la que existe en el subsuelo de la zona que estamos estudiando. (Instruction manual for EarthImager 3D, 2014).

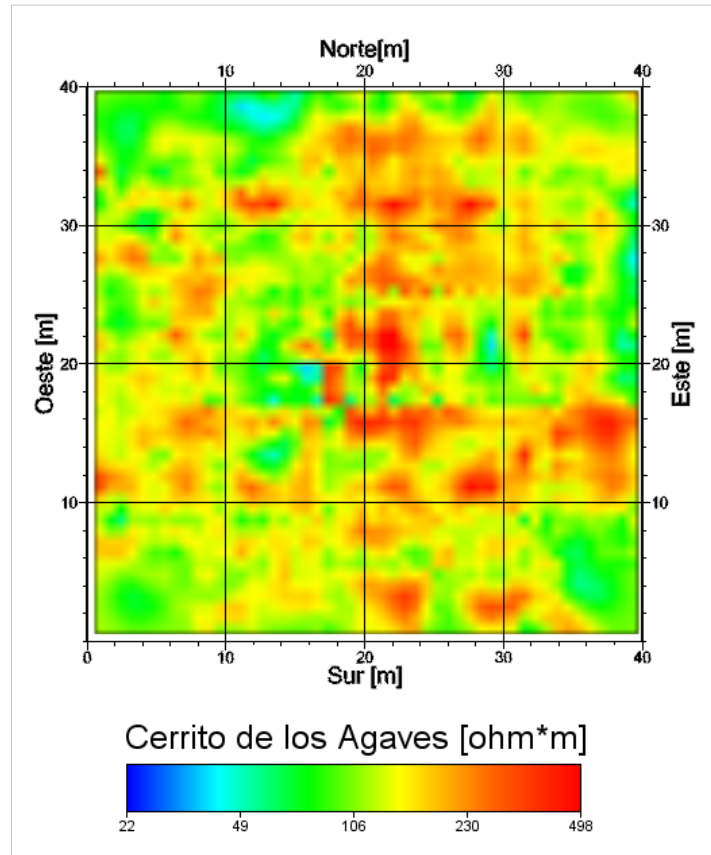


Figura 3.9: Resistividad en la superficie.

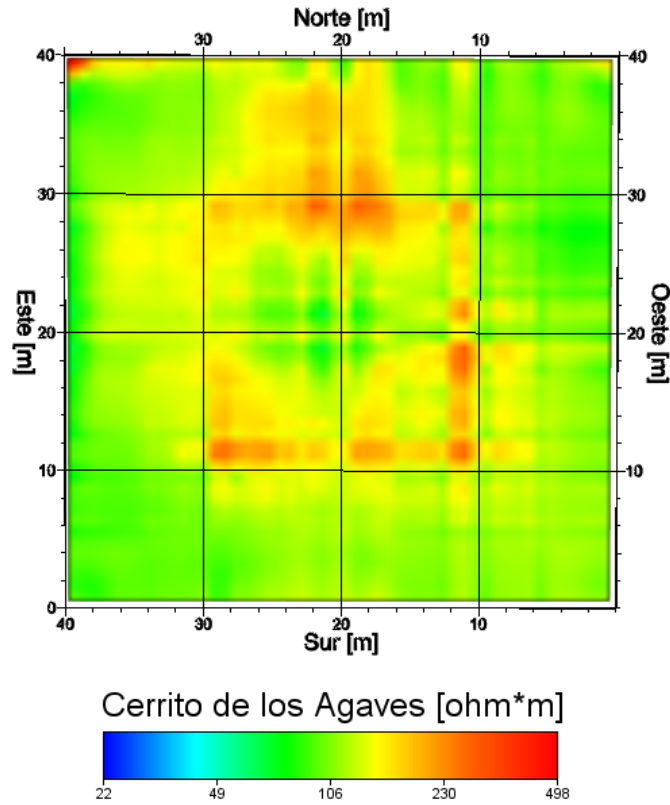


Figura 3.10: Resistividad a 8 m de profundidad.

Isovalores

En la Figura 3.11 observamos el corte de una imagen de isovalores (agrupación de valores similares de resistividad), en la misma se puede percibir la entrada del tiro y lo que esperamos sea la cámara, de acuerdo con el croquis proporcionado y descripción del mismo (Esparza, R., Yoshida, T., Rétiz, M. Comunicación personal, 18 enero 2022). Por otra parte, en la Figura 3.12 podemos observar un croquis en el que se muestran las dimensiones del tiro.

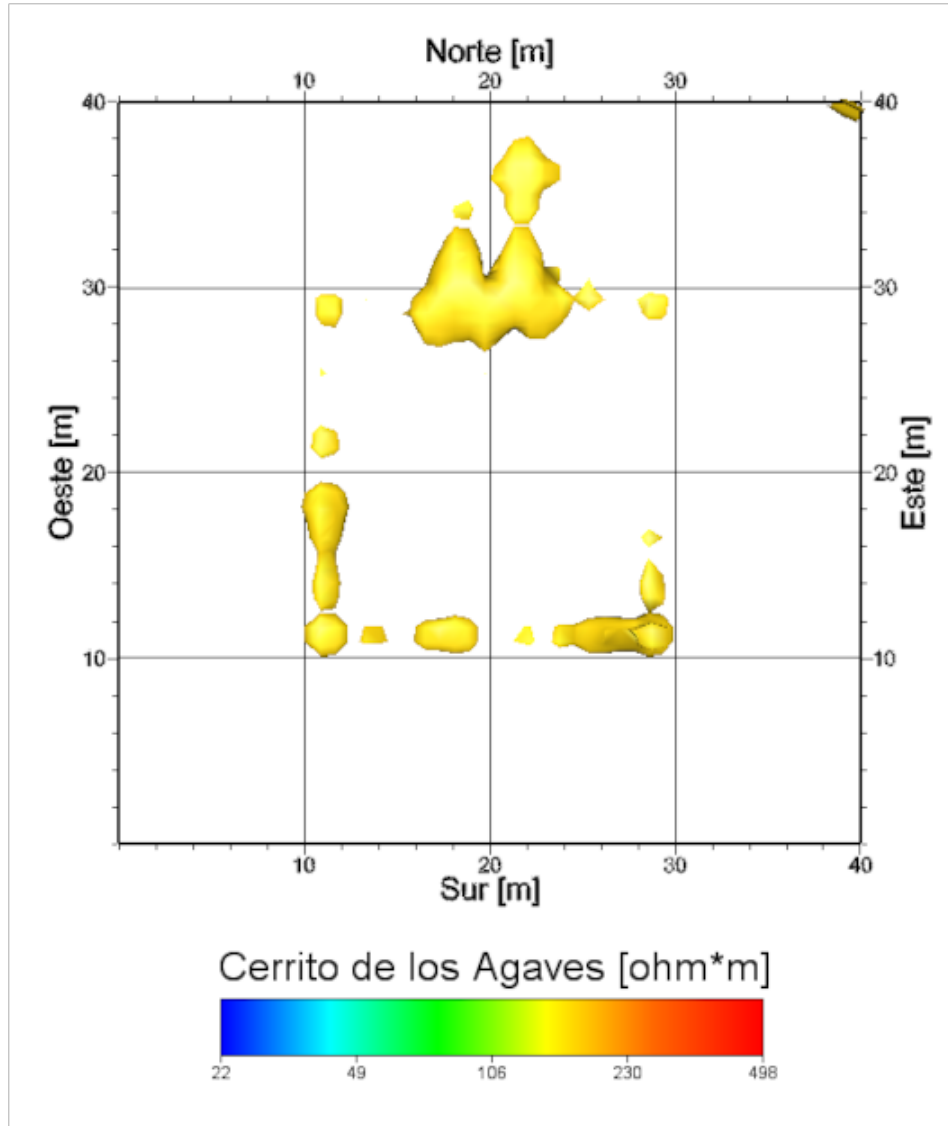


Figura 3.11: Isovalores a 8 m de profundidad.

En la Figura 3.12 que se muestra a continuación, podemos observar una imagen aislada de la estructura que esperamos sea la cámara, esta se encuentra a una profundidad de 8 metros y desplazada 5 metros aproximadamente hacia el norte respecto al tiro. En esta imagen se puede observar lo que parece una estructura cuadrada que rodea el tiro de la cámara, sin embargo, esta no es una estructura real, al contrario, es una huella de adquisición producto de la geometría de los arreglos de electrodos.

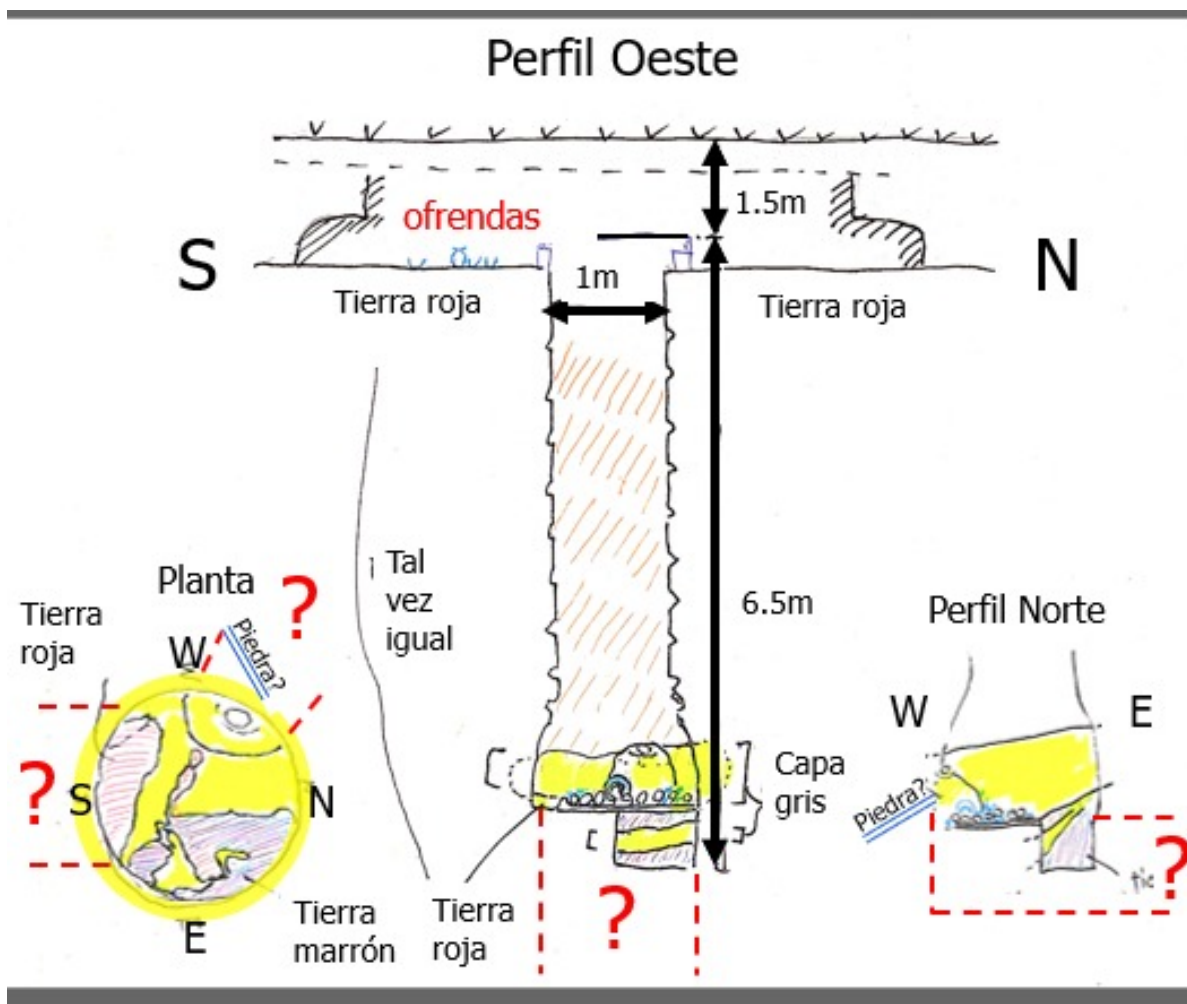


Figura 3.12: Croquis del tiro. (Obtenido de Esparza, R., Yoshida, T., Rétiz, M. Comunicación personal, 18 enero 2022)

Algo que es importante mencionar es que la diferencia de la resistividad al rededor de la cámara no es muy grande, esto provoca que la resolución de nuestros datos no sea la mejor, en la Figura 3.13 podemos observar de acuerdo con la escala de colores que esta diferencia en la resistividad del medio es relativamente pequeña, a causa de esto recomendamos realizar otro método de prospección para tener resultados mas certeros.

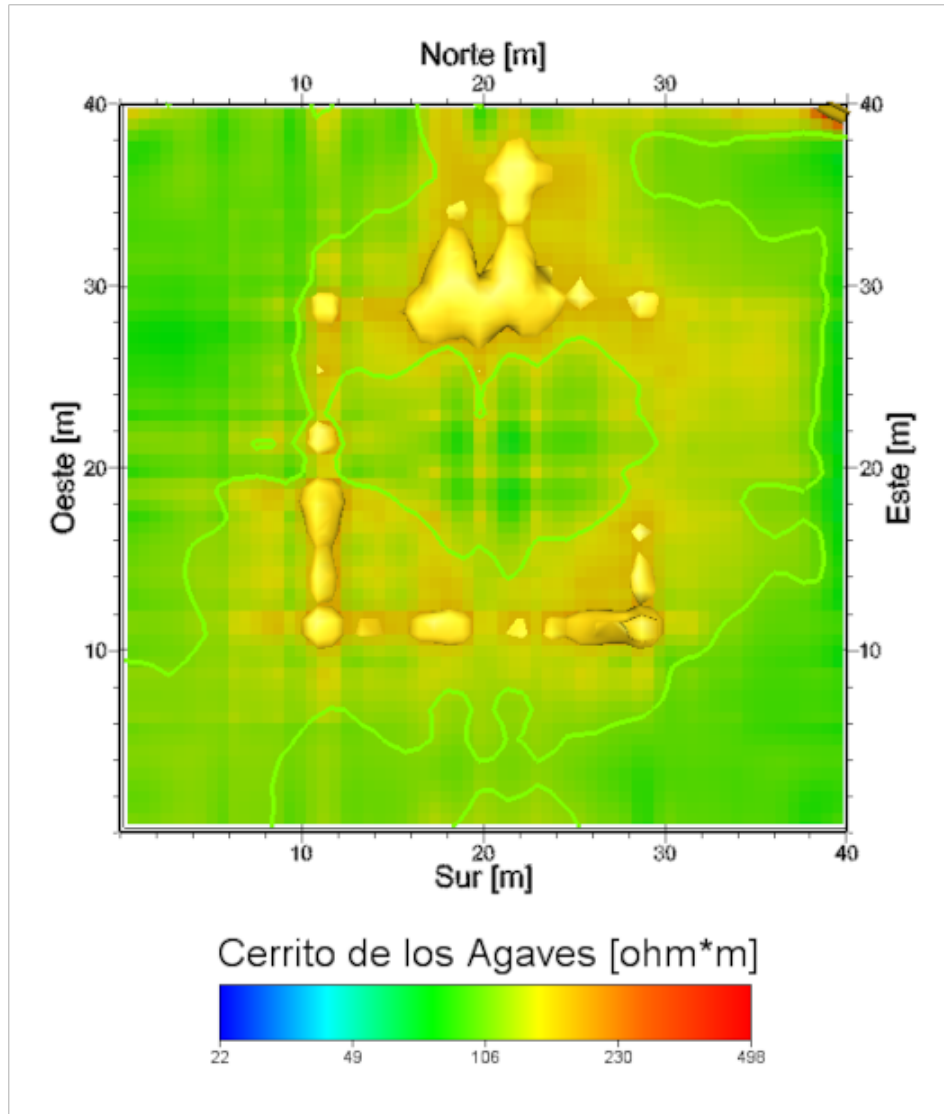


Figura 3.13: Resistividad del medio alrededor de la cámara.

3.2.3. Discusión

De acuerdo a los investigadores del sitio (Esparza. R., Yoshida, T., Rétiz, M. Comunicación personal, 18 enero 2022), se han registrado casos donde la cámara mortuoria se ha encontrado a los 8 metros de profundidad. Este antecedente nos hizo plantear la hipótesis que para nuestra zona de estudio existiera esa posibilidad y que lo que veíamos en las imágenes de isovalores se tratara de una cámara doble. Posteriormente en una

reunión con los investigadores del sitio se puso a discusión la posición de la supuesta cámara, donde de acuerdo a su experiencia sería muy poco probable que esta se encuentre tan desplazada de la boca del tiro. Se acordó que, con la finalidad de obtener mejores datos sería necesario complementar el trabajo llevando a cabo un levantamiento adicional, esta vez usando el GPR, mediante el cual podríamos obtener una imagen del subsuelo de las zonas identificadas. De igual forma, llevar a cabo un levantamiento topográfico de la zona de estudio que nos permita realizar las correcciones correspondientes. Con los resultados obtenidos no nos es posible determinar si existe o no una cámara mortuoria en dentro de la plaza del sitio, sin embargo, tampoco hay evidencia de que exista otro tiro dentro de la plaza.

3.3. Segundo levantamiento

Para la segunda visita a campo se realizaron dos levantamientos de resistividad 2D (TRE 2D) con el resistivímetro **IRIS, Syscal Junior** (Figura 3.14), así como un levantamiento con el georradar **GSSI, SIR 3000** (figura 3.17) usando una antena de 270 Mhz en zonas delimitadas de acuerdo con los resultados obtenidos de la primera visita a campo. Así mismo, se llevó a cabo el levantamiento topográfico del sitio con la finalidad de mejorar la interpretación de las TRE 2D y 3D. Cabe mencionar que en esta ocasión el tiro de la tumba se encontraba cerrado, por lo que en estas circunstancias era posible colocar electrodos por encima del tiro.



Figura 3.14: Resistivímetro Syscal Junior

Tomografía de resistividad eléctrica 2D

Levantamiento S-N El primero de estos levantamientos esta compuesto por 40 electrodos separados 1m con orientación S-N y corta el eje X a los 21 metros (Figura 3.15).

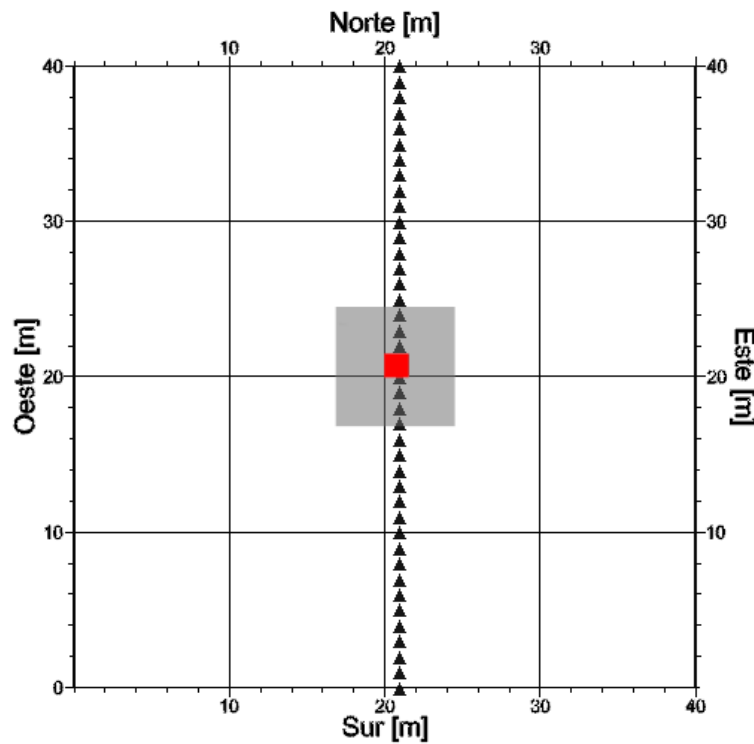


Figura 3.15: Distribución de los electrodos S-N respecto al tiro.

Levantamiento W-E El segundo de estos levantamientos esta compuesto de igual manera por 40 electrodos separados 1m pero con orientación W-E y corta el eje Y a los 28 metros (Figura 3.16).

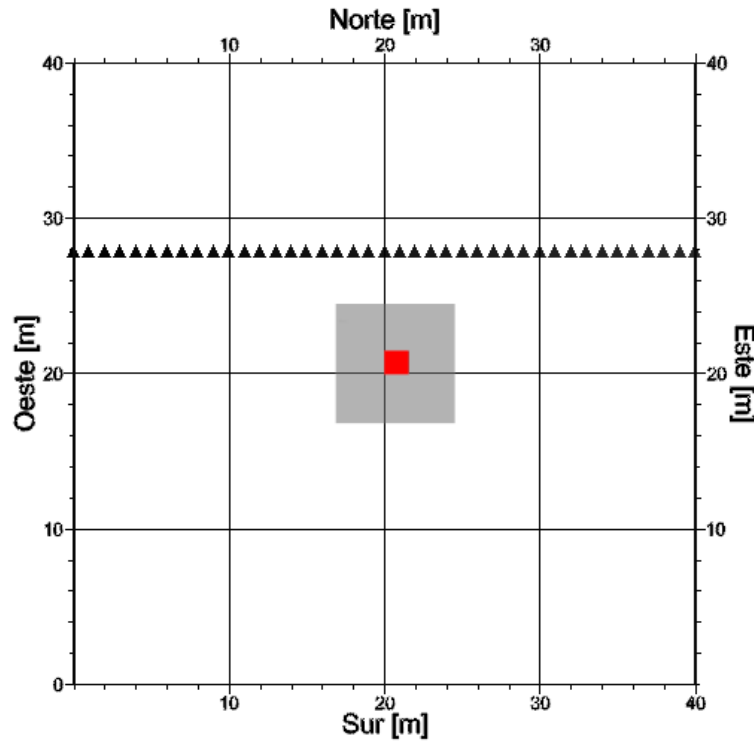


Figura 3.16: Distribución de electrodos W-E respecto al tiro.

Radar de penetración terrestre GPR

Derivado de la necesidad de contar con otro estudio que complemente las imágenes obtenidas a partir de las tomografías de resistividad eléctricas decidimos realizar un levantamiento con el GPR, el cual consiste en una malla de 30x14 m (Figura 3.18 y 3.19) que contempla la parte norte del patio principal. Esta malla sirve como referencia para realizar la adquisición de datos, cada una de estas mallas consiste en líneas paralelas con orientación S-N y W-E. Las líneas S-N tiene una longitud de 14 m, y se encuentran separadas 3.75 m, mientras que las líneas orientadas W-E tienen una longitud de 30 m y se encuentran separadas por 1.75 m.



Figura 3.17: GPR GSSI, SIR 3000 con una antena de 270 Mhz

El levantamiento de datos con el GPR consiste en desplazar en línea recta el equipo de manera que la antena haga contacto con el suelo, siguiendo las líneas planeadas con anterioridad, esto se repite en cada una de las líneas de la malla, lo que permite obtener imágenes del subsuelo. Las siguientes imágenes muestran el recorrido realizado con el GPR.

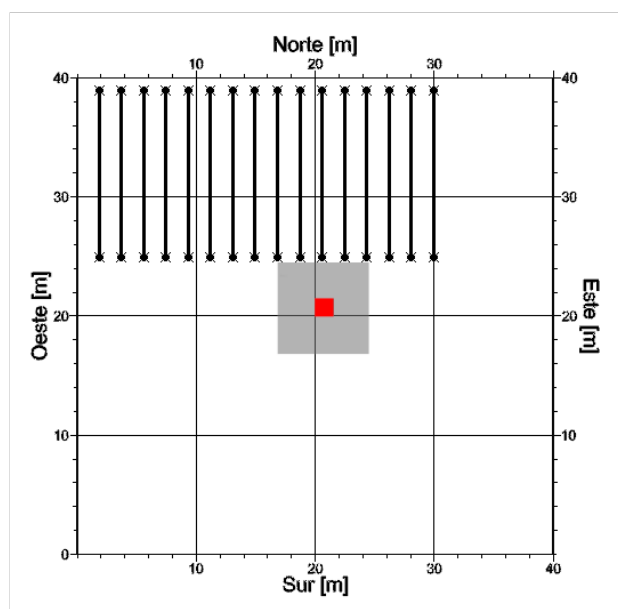


Figura 3.18: Recorrido realizado por el GPR en dirección S-N

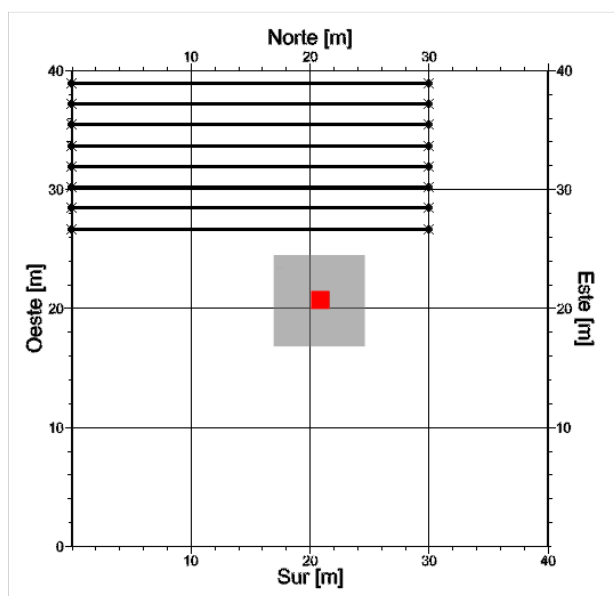


Figura 3.19: Recorrido realizado por el GPR en dirección W-E

3.4. Levantamiento topográfico

El levantamiento topográfico se llevó a cabo utilizando un nivel montado y un estadal graduado a milímetros con el cual obtuvimos la topografía de la plaza principal. Se usó como referencia la malla que utilizamos durante la primera visita a campo (Figura 3.20), de esta manera obtuvimos datos a cada metro. Para realizar el levantamiento topográfico se colocó el nivel en una posición en la que se puedan observar la mayor cantidad de puntos de interés, una vez en esta posición, se midió la altura del equipo y se procedió a tomar la lectura mirando hacia el estadal que se encontraba previamente ubicado en el punto de interés.



Figura 3.20: Levantamiento topográfico en El Cerrito de los Agaves.

3.4.1. Resultados

Topografía

Como resultado del levantamiento topográfico obtuvimos este mapa de elevaciones, mismo que utilizamos en las correcciones topograficas de la TRE 3D y TRE 2D. (Figura 3.21)

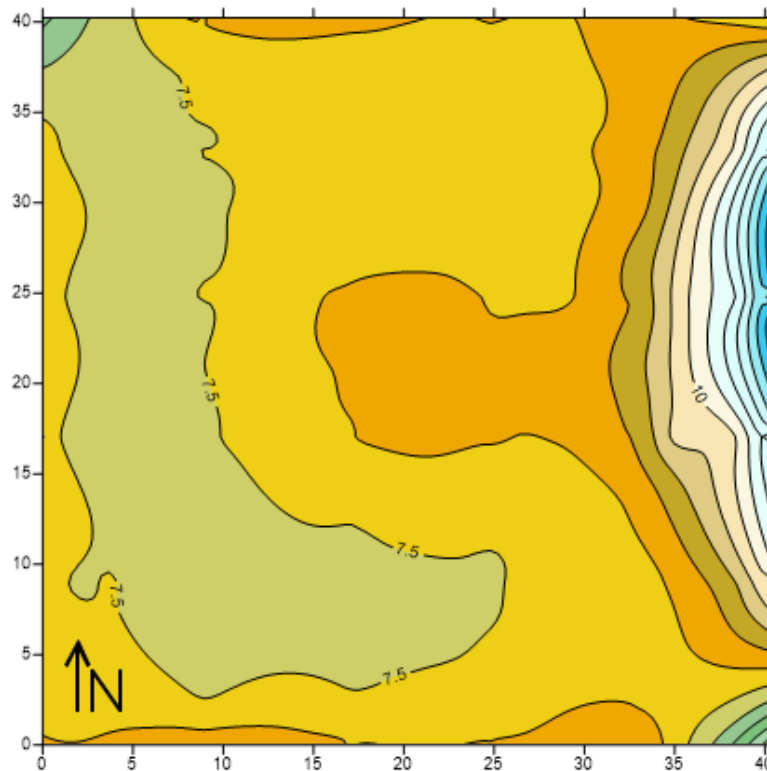


Figura 3.21: Mapa de elevación de Cerrito de Los Agaves

Tomografía de resistividad eléctrica 3D

Uno de los objetivos de realizar el levantamiento topográfico era el de poder agregar la topografía del terreno a la TRE 3D realizada en la visita a campo anterior, ya que como lo habíamos mencionado antes, era importante realizar la corrección del terreno

para de esta forma poder delimitar la posición de lo que se pensaba era la tumba de tiro. Como resultado de esta corrección y un ajuste en los colores que representan los valores de resistividad en el modelo, se obtuvo la siguiente imagen (Figura 3.22).

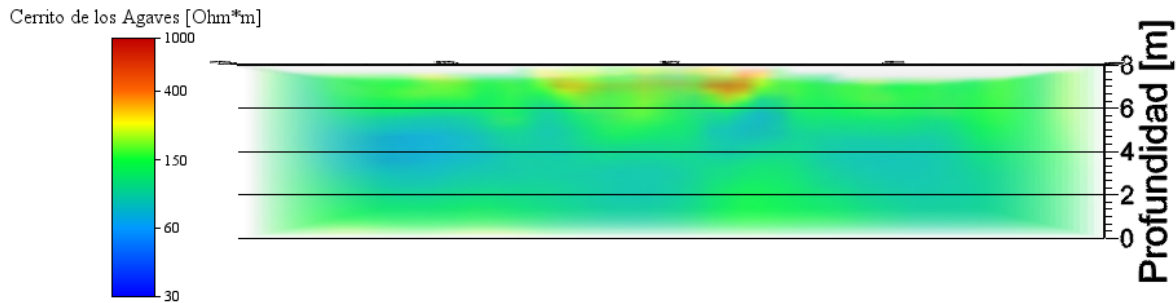


Figura 3.22: Corte a 21 m en el eje X

A diferencia de los resultados obtenidos de la primera visita a campo en el modelo mostrado en la figura 3.22, ya no se aprecia la estructura que se creía correspondía a la posible cámara de la tumba de tiro (Figura 3.11 y 3.13).

Tomografía de resistividad eléctrica 2D

De acuerdo con el análisis realizado de los datos obtenidos de los levantamientos de **TRE 2D** se obtuvieron dos imágenes que muestran la distribución de la resistividad en las zonas seleccionadas, estas imágenes se procesaron usando el software **Earth Imager 2D**. En la figura 3.23 (TRE 2D) observamos un corte que coincide con el mostrado en la figura 3.22, se puede observar que en ninguna de las dos tomografías existe indicio de que se encuentre una cámara mortuoria a la profundidad señalada durante la primera visita a campo. En este mismo sentido, la tomografía que se muestra en la figura 3.24 corta sobre lo que se presumía podía ser la ubicación de la cámara, sin embargo, no hay evidencia de que ésta exista en la posición que mencionamos en las conclusiones de la primera visita. Por otra parte, en la Figura 3.23, podemos observar varios detalles, en

la parte central superior podemos ver valores de resistividad muy altos que dibujan el contorno del altar y la boca del tiro. Debajo de esta firma, podemos ver como resalta una porción semi circular en forma de "gota" que se conforma por valores de resistividad muy bajos. Esta región es de gran importancia, pues esta firma puede ser un indicio de que la tierra que ahí se encuentra corresponda a tierra de relleno.

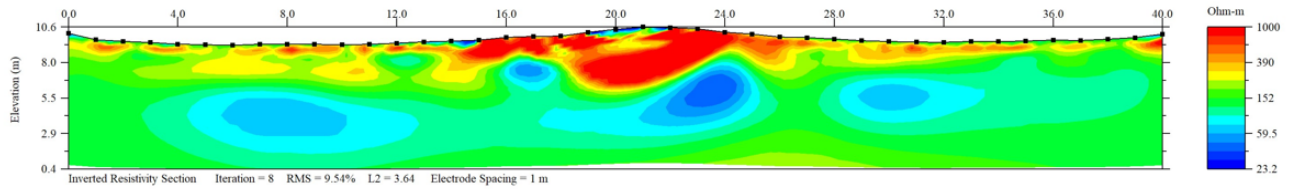


Figura 3.23: Corte a 21 m en el eje X

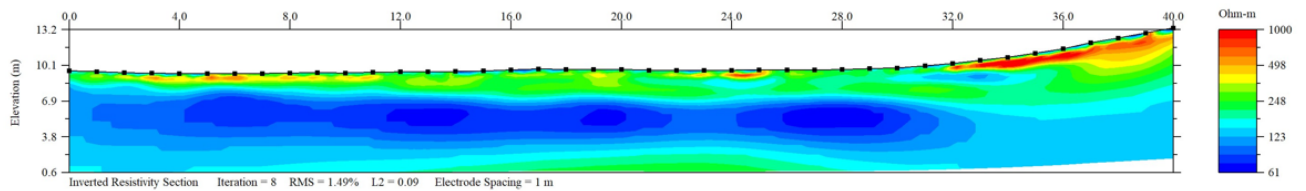


Figura 3.24: Corte a 28 m en el eje Y

GPR

Los archivos generados por el GPR se procesaron utilizando el programa GPRPy, de acuerdo con la malla que diseñamos se obtuvieron 24 imágenes, 8 orientadas Sur-Norte (S-N) (Figura 3.18) y 16 Oeste-Este (W-E) (Figura 3.19). Aunque todos los perfiles fueron procesados e interpretados solo presentamos los perfiles mas destacados. La profundidad alcanzada con el GPR fue de 3.5 m, dentro de este rango no se logra apreciar algún rasgo que pueda resultar de interés (Figura 3.25 y 3.26).

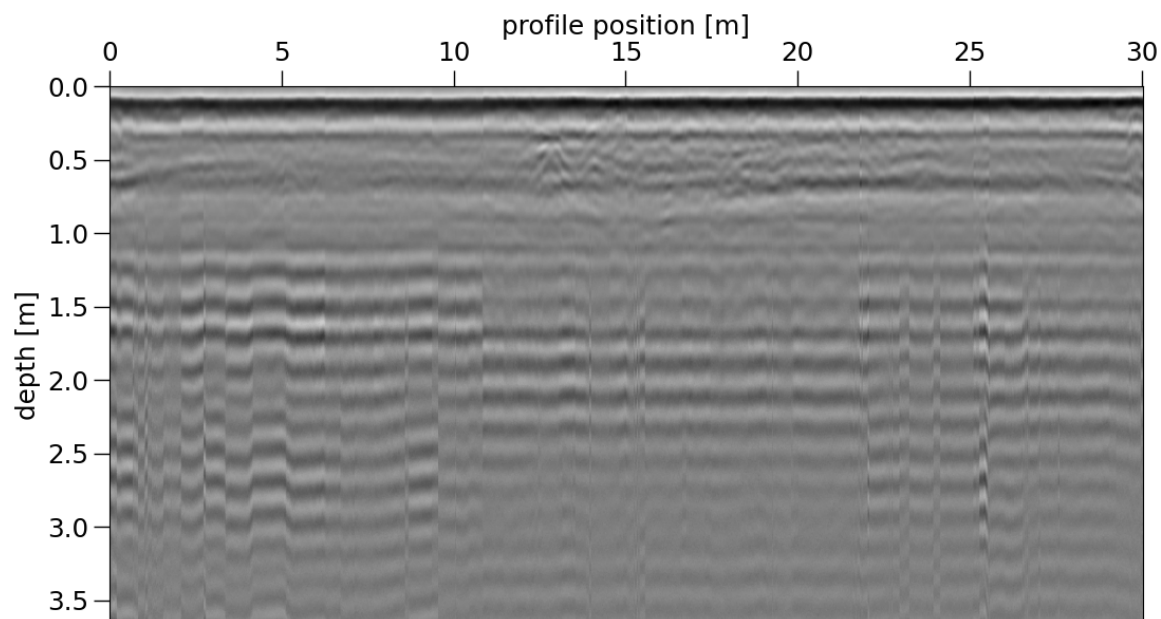


Figura 3.25: Corte del GPR en las coordenadas 0,28 - 30,28.

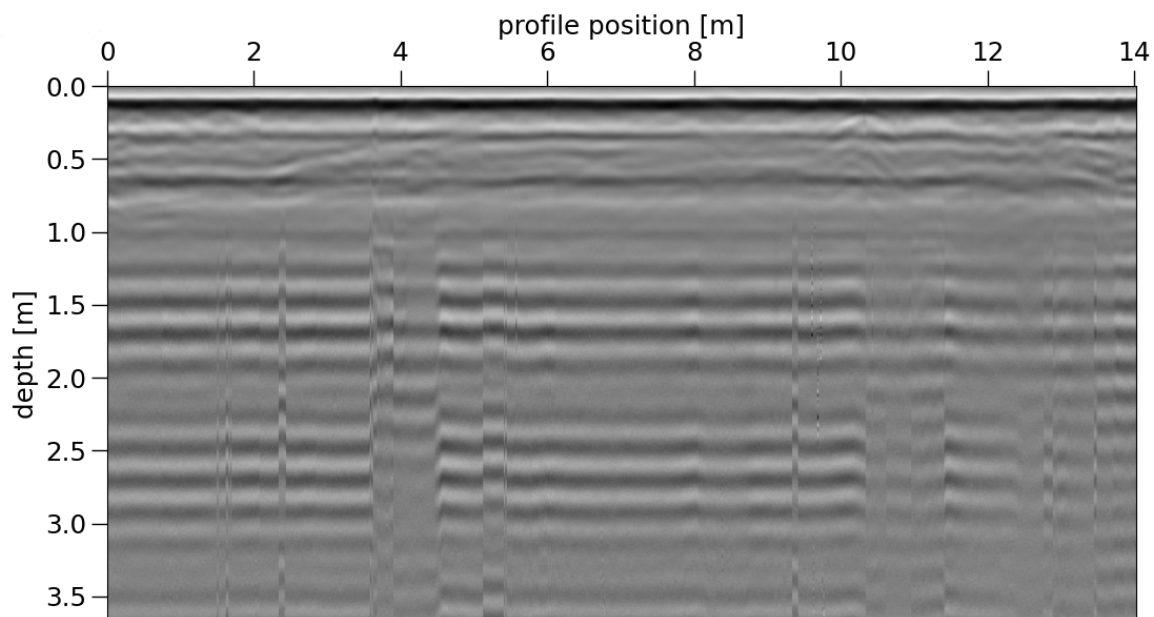


Figura 3.26: Corte del GPR en las coordenadas 21,28 - 21,38.

3.5. Discusión

Con los datos obtenidos de la segunda visita a campo pudimos despejar varias interrogantes: la mas importante es respecto a la ubicación de la posible cámara. Como mencionamos en la discusión de la primera visita a campo, sería poco posible encontrar una cámara mortuoria en la posición presentada, el planteamiento idea de esta posibilidad esta basada en los antecedentes de un caso similar. Tomando esto en consideración, de existir dicha cámara en la posición propuesta, esta debería ser observada en los perfiles TRE 2D realizados durante la segunda visita a campo. Por otra parte, al realizar la corrección topográfica en el modelo de resistividad (TRE 3D), la anomalía relacionada con la cámara mortuoria no se aprecia. Finalmente, con el levantamiento de GPR no logramos visualizar nada relevante en la zona de la plaza donde se realizó el levantamiento.

Capítulo 4

Conclusiones

Los métodos geofísicos de exploración somera ofrecen una serie de herramientas que resultan de gran utilidad para llevar a cabo un estudio arqueológico al realizarlos antes de alguna excavación. La naturaleza no destructiva de estas técnicas ayuda a una delimitación de zonas de interés sin la necesidad de intervenir de manera que afecte la integridad de estructuras de valor cultural. Esto es fundamental para mantener nuestro patrimonio cultural en las mejores condiciones. Así mismo, los diferentes principios físicos que se pueden medir con esas técnicas ofrecen, al contrastarlos unos con otros, nos ofrecen una versatilidad de puntos de vista ante diferentes objetivos arqueológicos, haciendo una definición más certera de los mismos. Para el caso de estudio mostrado en esta tesis, se buscó cumplir con los objetivos planteados por los arqueólogos. Con los resultados obtenidos, en un principio no existe evidencia que confirme la presencia de mas tiros en la plaza principal. Y por otro lado la presencia de una cámara mortuoria, al menos de acuerdo a las evidencias arqueológicas tampoco. Sin embargo si existe en la anomalía geofísica de la TRE (Figura 3.23) una unidad de interés conductora cerca del tiro que puede asociarse a la presencia de humedad en un relleno, el cuál es un sitio candidato a ser explorado debido a que rompe la homogeneidad del subsuelo y probablemente sea un sitio intervenido con anterioridad y por lo tanto de interés arqueológico.

Capítulo 5

Bibliografía

5.1. Artículos

- Arka, I. Balkaya, C., Püis, A., Alanyali, H.S., Kaya, M, A., (2019). Integrated geophysical investigations to reconstruct the archeological features in the Episcopal district of Side, Turkey. J. Appl. Geophys.
- Carcione, J. M. (1996). Ground radar simulation for archaeological applications. Geophysical prospecting 44.
- Conyers, L. y D. Goodman¹ (1997). Ground-Penetrating Radar: An Introduccion for Archaeologists. Altamira Press. Walnut Greek.
- Deidana, R. (2019). The contribution of geophysical prospecting to the multidisplinary study of the Samo baths, Pompeii. J. Cult. Herit.
- Esparza, R. (2021). Estudio petromagnético y arqueomagnético del sitio El Cerrito de Los Agaves en la parte suroriental de los Altos de Jalisco, México. México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.

- Esparza, R. (2013). Un santuario rupestre en los altos de Jalisco, Mexico. USA: American Indian Rock Art Volume 40.
- Goodman, D. (1994). Ground-penetrating radar simulation in engineering and archeology. *Geophysics* 59.
- Gündgdu, Y., Casansayar, N., Genc, E. (2017). Rescue archeaology application: investigation of Kuriki Mound Archeaology Area (Turkey) by using direct current resistivity and magnetic methods. *JEEG* 22.
- Jodry, C., Palma Lopes, S., Fargier, Y., Sanchez, M., Côte, Ph. (2019). 2D-ERT monitoring of soil moisture seasonal behavior in a river levee: a case study. *J. Appl. Geophys.* 167.
- Johnston, B., Ruffell, A., McKinley, J., Warke, P. (2018). Detecting voids within a historical building façade: a comparative study of three high frequency GPR antenna. *J. Cult. Herit.* 32.
- Jol, H.J. (Ed.), 2009. *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. Elsevier.
- Kampke, A. (1999). Focused imaging of electrical resistivity data in archaeological prospecting. *J. Appl. Geophys* 41.
- Lakubovskii y Liajov (1980). *Exploracion Electrica*. Moscu: Editoria Nedra.
- Leckebush, J. (2003). Ground-Penetrating Radar. A moder three-dimensional propection method. *Archaeological Prospection* 10.
- Loke, M., Chambers J., Rucker, D., Kuras, O., Wilkinson. (2013). Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics* 95.

- Loke, M. (2015). Tutorial: 2D and 3D Electrical Imaging Surveys.
- Oldenburg, D., (1978). The interpretation of direct current resistivity measurements. *Geophysics* Vol 43.
- Ortega-Ramírez, J., Bano, M., Lelo de Larrea-López, L., Robles-Camacho, J., Ávila-Luna, P., Villa-Alvarado, L. (2019). GPR measurements to identify cracks and textural arrangements in the altar wall of 16th century Santa Maria Huiramangaro Church, Michoacán, Mexico. *Near Surf. Geophys. (NSG)* J.
- Pérez Gracia, V., Canas, J.A., Pujades, L.I.G., Clapés, J., García, F. (2000). GPR survey to confirm the location of ancient structures under the Valencia Cathedral (Spain). *J. Appl. Geophys.* 43.
- Pieraccini, M., Mecatti, D., Luzi, G., Seracini, M., Pinelli, G., Atzeni, C. (2005). Non-contact intrawall penetrating radar for heritage survey: the search of the ‘Battle of Anghiari’ by Leonardo da Vinci. *NDT & E Int.* 38.
- Pueyo, o., García, C., Diarte, P., Pocoví, A., Casas, A., Pérez, J., Rodríguez, A., (2007). Variables sobre la aplicación de técnicas de prospección geofísica en la caracterización de yacimientos arqueológicos. *Experiencias en los yacimientos del polígono industrial de la dehesa de tarazona.*
- Chavez, R., Tejero, A., Argote, D., Cifuentes, G., Hernández-Quintero, E., Garcia-Serrano, A., (2017). Interior Imagin of El Castillo Pyramid, Chichen Itza, Mexico, Using ERT-3D Methods: Preliminary Results. *Geofísica Internacional.*
- Solla, M., Lorenzo, H., Rial, F.I., Novo, A., 2011. GPR evaluation of the Roman masonry archb ridge of Lugo(Spain). *NDT & E Int.* 44.

- Yalçiner, C. (2019). Coordinated application of structural strengthening injections with GPR method for restoration of historical artifacts: example study of Bodrum castle. *J. Geophys. Eng.* 16 (2).
- Yalciner, C., Ç., Bano, M., Kadioglu, M., Karabacak, V., Meghraoui, M., Altunel, E. (2009). New temple discovery at the Archaeological Site of Nysa (Western Turkey) using GPR method. *J. Archaeol. Sci.* 36.

5.2. Libros

- Ana Osella y Jose Luis Lanata (2006). *Arqueogeofísica. Una metodología interdisciplinaria para explorar el pasado.* Argentina: Universidad Maimódes.
- Butler D. (2005). *Near.surface Geophysics.* Estados Unidos Americanos: Society of Exploration Geophysicist.
- Gad El-Qady, Metwaly. (2019). *Archaeogeophysics. State of the Art and Case Studies.* Springer International Publishing AG.
- John Milsom. (2003). *Field Geophysics (Tercera edición).* Reino Unido: John Wiley & Son Ltd.
- Oswin, J. (2009). *A field Guide to Geophysics in Archaeology.* Reino Unido: Praxis Publishing Ltd.
- Reynolds, J. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics.* Reino Unido. Blackwell Publishing.

5.3. Manuales

- AGI. (2014). Instrucion manual for EarthImager 2D. Processing software, Advanced Geociences Inc. USA
- AGI. (2014). Instructions manaul for Earth Imager 3D. Processing software, Advanced Geoscience Inc. USA
- GPRPy. Open-source ground-penetrating radar processing and visualization software.
- Iris instruments. J. Bernard. (2003). Short note on the depth of investigation of electrical methods. Francia

5.4. Tesis

- De la Torre, B. (2010). Definición de zonas de fracturamiento empleando Tomografía de Resistividad Electrica 3D. Tesis de licenciatura. UNAM. México.
- Alvaréz, E. (2015). Tomografía eléctrica resistiva 3D en la caracterización del subsuelo en estructuras civiles. Tesis de licenciatura. UNAM. México.