



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMÁGENES 3D DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA EN
LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE PAHÑÚ,
EDO. DE HIDALGO**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERA GEOFÍSICA

PRESENTA:

IRIARTE SIERRA LIZBETH

DIRECTOR: Dr. RENÉ EFRAÍN CHÁVEZ SEGURA
CO. DIRECTOR: M. en C. GERARDO CIFUENTES NAVA



CIUDAD UNIVERSITARIA

MÉXICO, D.,F.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en particular a la Facultad de Ingeniería por ser como un segundo hogar para mí y dejarme concluir mis estudios. Por darme la oportunidad de conocer y vivir experiencias con personas que siempre estarán en mi vida.

Al Dr. René Chavéz y el M. en C. Gerardo Cifuentes por brindarme el apoyo, la confianza y la oportunidad de trabajar con ellos, por su tiempo, paciencia e interés por mi trabajo de tesis. Agradezco sus recomendaciones, consejos y por compartir conmigo sus conocimientos.

Al Dr. Andrés Tejero, M. en C. Esteban Hernández Quintero y al Ing. Alejandro García por brindarme su tiempo y conocimientos en la revisión de este trabajo, que ayudaron a mejorar la calidad del mismo.

Al Instituto Nacional de Antropología e Historia, al Proyecto Especial Pahñú (PEP) y al grupo de arqueólogos por su tiempo y atenciones, en especial a Sabrina Farías, Denisse Argote y Fernando López, por compartir sus conocimientos que fueron parte importante del desarrollo de este trabajo.

A Octavio por compartir su tiempo conmigo, por las experiencias agradables que hemos vivido sin dejar a un lado la oportunidad de aprender y vivir con su amistad y cariño cada día.

A todos mis amigos por todos los buenos momentos que hemos pasado juntos, por estar conmigo en todo este proceso, por su apoyo y ayuda que han hecho de este tiempo una grata experiencia.

A Diego, Abraham, Alba y Alejandra, su ayuda fue muy importante en la realización de este trabajo.

A mis padres y hermanos por su apoyo y por enseñarme que debo esforzarme por lo que quiero.

Y finalmente al financiamiento obtenido del proyecto interno G-13, cuyo responsable es el Dr. René Chávez.

Índice

Resumen

I. Introducción

II. Descripción del área de interés

II.1 Ubicación

II.2 Marco geológico general de Hidalgo

II.3 Marco histórico

III. Fundamentos Teóricos del Método Geofísico

III.1 Teoría fundamental

III.2 Potencial de una fuente puntual

III.3 Potencial de un arreglo convencional de cuatro electrodos

III.4 Teoría básica de inversión

- Método de Suavizado Restringido

IV. Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

IV.1 Configuraciones electródicas

- Wenner-Schlumberger
- Dipolo-Dipolo
- Ecuatorial Dipolo-Dipolo
- Arreglo tipo "L"

V. Profundidad de Investigación

VI. Metodología

VI.1 Adquisición de datos

VI.1.1 Rejilla Cuadrada de 33x33 utilizada en la Pirámide Principal y en el Tecpan

VI.1.2 Arreglo Dipolar en las esquinas (configuración 1)

VI.1.3 Arreglo Dipolar en las esquinas (configuración 2)

VI.1.4 Arreglo Wenner-Schlumberger tipo "L"

VI.1.5 Arreglo Ecuatorial Diagonal

VI.1.6 Arreglo Ecuatorial Paralelo

- Ecuatorial Wenner-Schlumberger
- Ecuatorial Dipolo-Dipolo

VI.2 Líneas paralelas utilizadas en el Tecpan

VI.2.1 Arreglo Mínimo Acoplamiento

VI.3 Procesamiento de los datos

VII. Resultados

VII.1 Pirámide Principal

VII.2 Tecpan

VIII. Conclusiones

Anexo

Archivo de entrada URF

Bibliografía

Resumen

Pahñú es un sitio arqueológico localizado al NW del estado de Hidalgo en el municipio denominado Tecozautla, pertenecía a una comunidad otomí y su ocupación inicial originalmente fue fechada en 512 a 600 d. C. por paleomagnetismo, aunque también se han obtenido fechas de C14 que ubican las primeras evidencias arquitectónicas de este sitios en 327 o (380, 385) 443 d.C. El centro cívico-ceremonial tiene una pequeña plaza con un palacio político-administrativo (Tecpan) localizado al oriente y una pirámide principal al norte.

Dentro de la Geología del estado de Hidalgo se distinguen 3 épocas de vulcanismo que predominan en el área de estudio de composición andesítico- basáltico, que dan a la zona el paisaje árido que la caracteriza.

En el estudio geofísico realizado en este sitio arqueológico se implementó la técnica de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) en 2D y 3D, con la finalidad de determinar la profundidad, geometría y grosor del relleno que se encuentra por debajo de la pirámide principal cuyos desplazamientos por efectos de la erosión están afectando la pared norte de la misma. Se utilizó una rejilla cuadrada de 33x33 m con un total de 44 electrodos y una separación electródica de 3 m en la que se midieron diferentes configuraciones electródicas como: el arreglo Ecuatorial Diagonal y Paralelo, el arreglo Dipolo-Dipolo en las esquinas y el arreglo Wenner-Schlumberger tipo "L".

Con el objetivo de encontrar anomalías que pudieran ser de interés arqueológico y ayudaran en las excavaciones que se realizan en el Tecpan se utilizó también una rejilla de 33x33 m con 44 electrodos en total y se midió la misma cantidad de arreglos que en la pirámide principal, se sumó, además, un arreglo de cuatro líneas paralelas que ocupaban un área de 33x30 m con un total de 48 electrodos en el que midieron perfiles en 2D de los arreglos Ecuatorial Paralelo, Wemner-Schlumberger y Mínimo Acoplamiento, ambos tendidos se realizaron con una separación electródica de 3 m.

Todos los datos fueron procesados en el programa EarthImager (AGI 2008) y corregidos por efectos de topografía. Los resultados de aplicar la TRE en Pahñú fueron muy satisfactorios, en el caso de la pirámide principal se determinaron las dimensiones y la posición del relleno que afecta la pared norte, además, se encontraron anomalías que podrían indicar zonas de posibles ofrendas realizadas por los constructores en ambas construcciones y que valdría la pena excavar.

ABSTRACT

Pahñú is an archaeological site located to the NW of the state of Hidalgo, within the so called municipality Tecozautla. The region belonged to an Otomí community and its initial occupation dated originally from 512 to 600 a.d. employing paleomagnetic measurements. Measurements employing C14 observations define the first architectural evidences of this site within 327 and (380, 385) 443 a.d. The civic-ceremonial center has a small place with a palace political-office staff (Tecpan) located to the east and a main pyramid to the north. Geological evidence within the Hidalgo State, establishes three main volcanic events predominantly of basaltic-andesitic composition, which characterized the semiarid scenery of the region.

The geophysical study performed in this archaeological site, the method of Electric Resistivity Tomography was implemented in 2D and 3D. Such method gave important information to determine the depth, geometry and thickness of the filling material beneath the main pyramid. Such a structure suffers displacements by effects of the erosion, which affects the Northern front of the pyramid.

A squared array of 33x33 m with a total of 44 electrodes and electrode separation of 3 m was used employing different arrays as: Equatorial, Diagonal and Parallel, employing Dipole-Dipole, and Wenner-Schlumberger array set as "L" method.

Similar electrode array was employed in the next building called Tecpan. In addition, an array of four parallel lines that occupied an area of 33x30 m with a total of 48 electrodes in which they measured profiles in 2D employing: Equatorial, and Parallel arrays, using the Wenner-Schlumberger and Minimum Coupling. The layout was carried out with electrode separation of 3 m. All the data were processed in the EarthImager program (AGI 2008) and corrected by topography effects. The results of applying the ERT in Pahñú were very satisfactory, in the case of the main pyramid the dimensions were determined and the position of the unconsolidated filling material that affects the North wall, in addition, were anomalies that could indicate zones of possible offerings realized by the constructors in both constructions and that the pain would be worth to excavate.

I. Introducción

Actualmente el INAH (Instituto Nacional de Antropología e Historia) investiga, conserva y difunde el patrimonio arqueológico, antropológico, histórico y paleontológico de la nación para el fortalecimiento de la identidad y memoria de la sociedad que lo detecta (INAH, 2011).

La prospección preventiva es esencial para la preservación de los vestigios arqueológicos, en la actualidad pueden realizarse sondeos y prospecciones de las zonas arqueológicas que ayuden a corregir daños desde su origen y durante la excavación.

La Geofísica de Exploración ha implementado métodos como la Gravimetría y Magnetometría (Argote et al. 2009 y Chávez et al. 2010) que les han permitido conocer las propiedades del subsuelo bajo estas estructuras, y que han producido muy buenos resultados en Arqueología, por ser métodos no invasivos y sobre todo no destruyen ni contaminan el contexto histórico del sitio. Sin embargo, la implementación de la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) ha sido aún poco utilizada en nuestro país.

Recientemente, diversas técnicas de tomografía eléctrica se han ido perfeccionando rápidamente, los algoritmos de inversión permiten producir imágenes eléctricas con mayor precisión en modelos de dos o tres dimensiones del subsuelo (Barker, 1998).

Como las técnicas de recolección de datos se han vuelto más detalladas y las tasas de adquisición de datos mayor, las imágenes eléctricas han sido adecuadas para el estudio del subsuelo.

Bajo este punto de vista, la presente investigación pretende contribuir con un mejor conocimiento del subsuelo bajo los principales edificios pre-Hispánicos de este sitio y ayudar en las excavaciones por parte del grupo de arqueólogos. La zona de estudio se encuentra en la región del Pahñú, hacia el SW del estado de Hidalgo. La primera etapa del estudio se enfoca en la pirámide principal del sitio, dado que ésta sufre un deslizamiento en su porción norte, debido a que se encuentra en la parte más alta de una meseta. Sus constructores utilizaron material de relleno para su nivelación, actualmente dicho relleno sufre los efectos de la erosión, por lo que el estudio de geofísica determinará el estado de dicho relleno además de otras características, como su geometría, grosor, profundidad, etc., que ayudara a los arqueólogos a evitar el colapso de esta estructura y continuar de manera segura con las excavaciones alrededor de la mencionada pirámide.

La segunda etapa se realizó en el Tecpan (Palacio Político-Administrativo), con la finalidad de determinar zonas de interés dentro de esta estructura que permita a los arqueólogos continuar con la restructuración de este edificio y programar áreas de excavación, en particular en las 8 banquetas que se encuentran en su interior.

Los arqueólogos que se encuentran trabajando actualmente en el sitio tienen especial interés en las esquinas y en el centro de ambas estructuras (pirámide principal y Tecpan), debido a que se

cree que en las diferentes etapas de construcción que existieron en ambas estructuras se sacralizaron y volvieron a sacralizar las construcciones colocando pequeñas ofrendas en las esquinas y a sus dioses preferenciales en el centro de las estructuras.

El objetivo de este trabajo es obtener imágenes de TRE en 3D, empleando distintas configuraciones de los electrodos que permitan obtener las características del material de relleno que se encuentra debajo de la pirámide, además de otros efectos que estén relacionados con las etapas constructivas de ambas estructuras.

En el presente trabajo se muestran los levantamientos realizados alrededor de ambas estructuras, formando una rejilla cuadrada de 33x33 m con 44 electrodos en total con una separación de 3 metros. Además de un arreglo de 4 líneas paralelas con 48 electrodos en total que abarco una superficie de 33x30 m que se agrego al estudio del Tecpan. Los datos obtenidos se procesaron con el software *EarthImager (AGI,2008)* y se interpretaron de acuerdo a las variaciones de las resistividades características del relleno y de la geología del sitio.

II. Descripción del área de interés.

II.1 Ubicación

El sitio arqueológico conocido como Pahñú se encuentra al noroeste de la localidad denominada La Mesilla, perteneciente al Municipio de Tecozautla, Hidalgo. Aproximadamente a 133 km al NW de la Ciudad de México.

Tiene una altitud promedio de 1890 m.s.n.m y se encuentra entre los meridianos $99^{\circ} 41' 24''$ y $99^{\circ} 40' 48''$ de longitud oeste, y entre los paralelos $20^{\circ} 30' 36''$ y $20^{\circ} 30'$ de latitud norte (Figura 1).

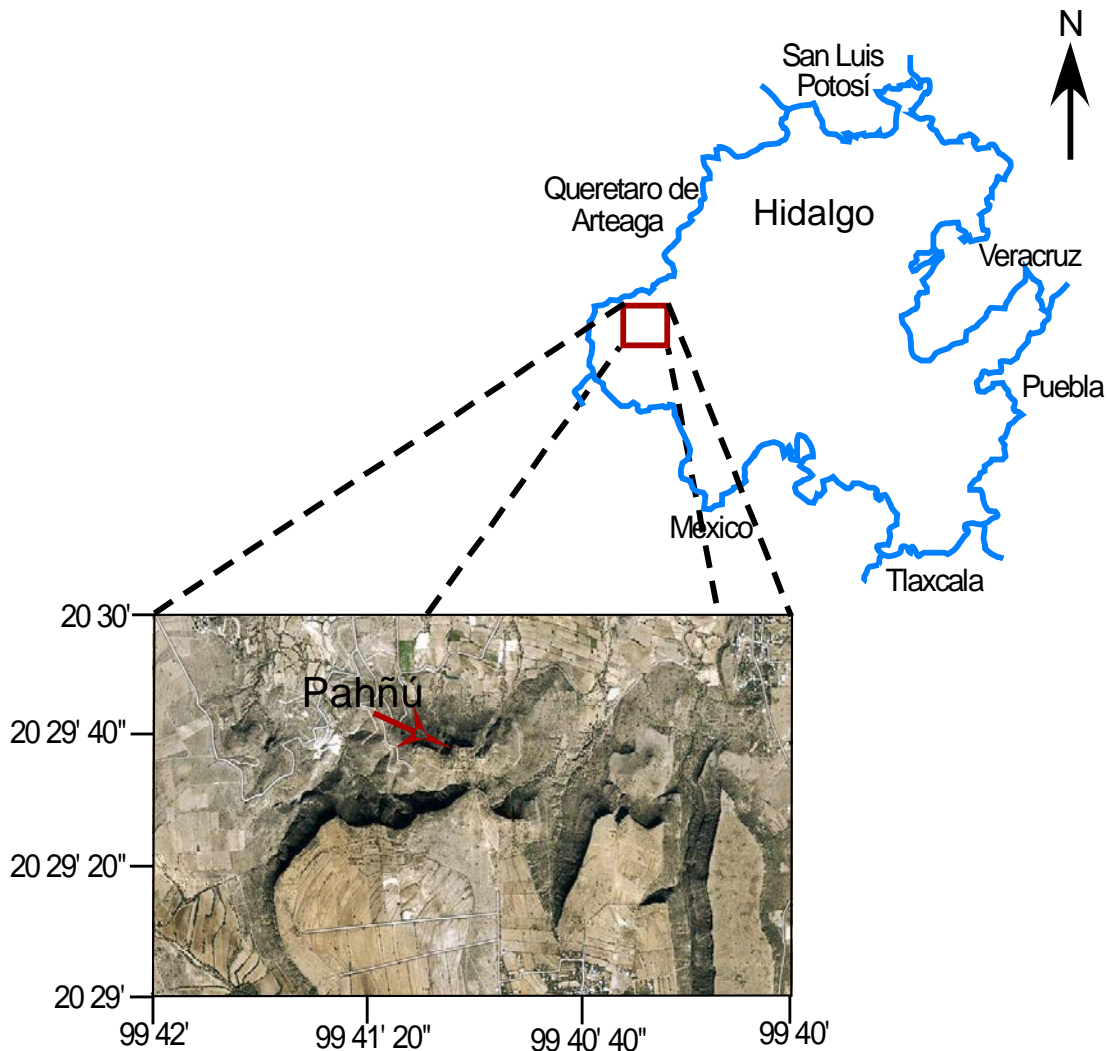


Figura 1. Ubicación del sitio arqueológico Pahñú, Hidalgo. (Tomado de Google Earth, 2011).

II.2 Marco Geológico General de Hidalgo

Las características litológicas y estructurales de las rocas que afloran en las provincias Sierra Madre Oriental, Eje Neovolcánico y Llanura Costera del Golfo del Norte, que cubren el estado de

Hidalgo, indican que hubo diferentes eventos geológicos de tipo orogénico, que asociados al volcanismo y al relleno de cuencas oceánicas dieron el carácter estructural a esta entidad.

Aquí es donde se puede apreciar mejor el complejo desarrollo geológico del territorio nacional, ya que en la provincia de la Sierra Madre Oriental afloran las rocas más antiguas de México (Precámbrico) y junto con está una serie completa de unidades estratigráficas que abarca el Paleozoico Superior (Pérmico), todo el Mesozoico y el Cenozoico.

El relieve estructural de la provincia que cubre al estado fue modelado por diversos agentes que dieron las características morfológicas que ahora se manifiestan superficialmente.



Figura 2. Mapa Geológico de Hidalgo (Tomada de INEGI, 2010).

La Sierra Madre Oriental tuvo su desarrollo sobre estructuras (cuerpos geológicos deformados) precámbricas y paleozoicas, sobre las que ahora se encuentran rocas mesozoicas que forman pliegues de diferentes tipos y orientaciones. En Hidalgo el carácter estructural de esta cordillera es acentuado por pliegues complejos recostados hacia el noreste y grandes fallas de empuje (cobijaduras), que han arrancado de raíz fragmentos del basamento precámbrico y paleozoico, e imbricado la secuencia mesozoica suprayacente.

Es posible que haya una relación estrecha entre los períodos de deformación tectónica y la ubicación de cuerpos intrusivos de diversa composición, como los que aparecen en esta provincia, que atraviesan la secuencia de rocas mesozoicas, y han propiciado la mineralización de zonas como Zimapán.

La continuidad de los fenómenos volcánicos durante casi todo el terciario, se manifiesta en el gran espesor y en la extensión que cubren las rocas ígneas del Eje Neovolcánico, donde pueden encontrarse domos riolíticos, volcanes compuestos, conos cineríticos enteros y erosionados, y mesetas formadas por flujos piroclásticos y derrames de basalto. Estas estructuras han sido modificadas en ocasiones por fenómenos de vulcanismo explosivo, como se manifiesta en "La Caldera" de Huichapán, en la localidad El Astillero.

En la entidad se distinguen 3 épocas de vulcanismo: El más antiguo, Pre-Mioceno Superior, de composición andesítica; el intermedio del Mioceno Superior al Plioceno; característicos del Eje Neovolcánico, también andesítico-basáltico; el último, a finales del Plioceno y Cuaternario, muy ampliamente distribuido, y de carácter andesítico y basáltico. Las unidades correspondientes son:

Grupo Pachuca que comprende una secuencia de 8 formaciones de rocas volcánicas y vulcanoclásticas cuyos nombres en orden ascendente son: Santiago, Corteza, Pachuca, Real del Monte, Santa Gertrudis, Vizcaína, Cerezo y la formación Tezuantla. Todas las formaciones mencionadas están constituidas por capas o estratos interdigitados, compuestos por derrames de lava, brecha volcánica, conglomerado volcánico, tobas y areniscas tobáceas (Geyne, 1963. Citado por SEMIP, 1992). Su espesor es mayor de 2000 m. su edad se ha asignado al Oligoceno-Mioceno.

Formación Las Espinas. Está constituida por un paquete de derrames de rocas volcánicas que varían de andesitas a basalto, tobas, brechas andesíticas que lateralmente cambian a latitas y cuarzolitas, material vulcanosedimentario constituido por tobas arenosas, tobas bentoníticas y paleosuelos intercalados. Esta formación está cubierta discordantemente por la formación El Morro y su espesor máximo es de 400 m.

Tobas Don Guiño. Se encuentra constituida por tobas riolíticas y brechas riolíticas y dacíticas, que representan derrames piroclásticos e ignimbritas, se encuentran aflorando a unos 20 km al poniente de Ixmiquilpan, tiene un espesor aproximado de 170 m, un fechamiento radiométrico señala una edad Plioceno (SEMIP, 1992).

Formación Zumate. Esta constituida por una sucesión de derrames de lavas dacíticas, aglomerados de composición dacítica y lahares o derrames de lodo volcánico; que afloran en las sierras de Pachuca y Actopan. Su espesor medido de esta unidad es de 500 m; subyace en discordancia erosional a la Formación Cristobal y se le asigna una edad del Plioceno Superior.

Formación Tecozautla. Esta formación está integrada por una serie de derrames de lavas dacíticas que muestran una coloración en forma bandeada que es el producto de alteración y fluidez; su espesor máximo es de 150 m.

Formación San Cristobal. Paquete de rocas máficas compuestas por derrames de andesitas y basaltos de olivino, su espesor es de aproximadamente 300 m.

Formación Tlanchinol. Es una secuencia de derrames basálticos que descansan sobre sedimentos marinos. Los derrames de basaltos destacan formando mesetas y cerros testigos que se les asigna una edad de 7.10+0.3 M.A. (Cantagrel y Robin, 1979. Citado por SEMIP, 1992)

Formación Tarango. Se encuentra representado por material clástico que se acumula relleno de amplios valles. Esta formación fue depositada por corrientes de aguas superficiales que acumularon gravas, arenas, limos y arcillas. Su espesor aproximado es de 400 m (Fries Jr., 1962. Citado por SEMIP, 1992).

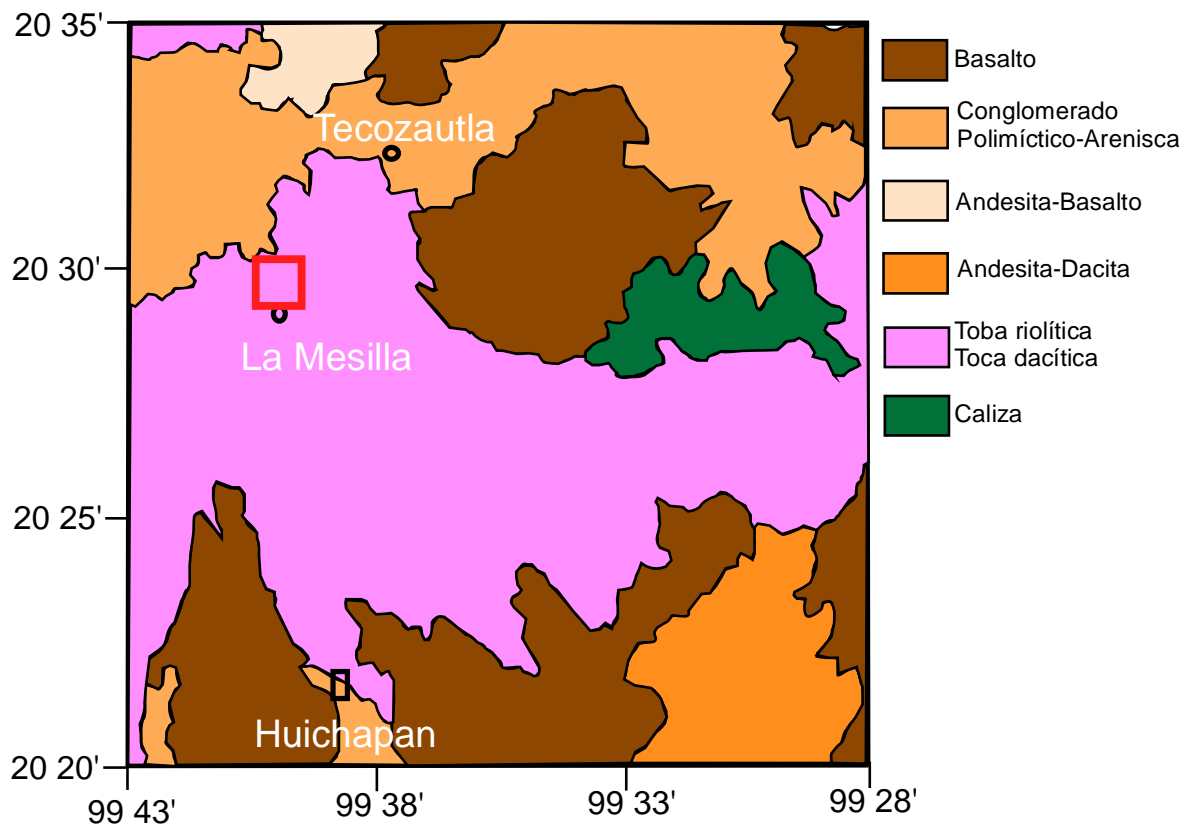


Figura 3. Mapa Geológico del área de estudio. El recuadro muestra la región del Pahñú (Modificado del Servicio Geológico Mexicano, 2010).

Los sedimentos marinos terciarios que se encuentran en la porción noreste de Hidalgo están genéticamente relacionados con la formación de la Llanura Costera del Golfo, la cual tiene su origen en la regresión del Atlántico, iniciada a principios del Terciario, y en el relleno gradual de la cuenca oceánica, donde fueron acumulados sobre la pendiente del talud continental grandes volúmenes de sedimentos de las partes altas del continente.

Los procesos geomorfológicos han modificado el relieve estructural original de las provincias de Hidalgo; a diferentes escalas los deslizamientos de masas rocosas provocados por el

fracturamiento y la fuerza de gravedad han derruido los grandes pliegues de fallas de la Sierra Madre Oriental y las estructuras volcánicas de la provincia del Eje Neovolcánico; el agua actúa como alterador de la roca y propicia el desarrollo de suelos residuales (Atotonilco el Grande). Como agente de disolución aprovecha los sistemas de fracturas y forma en los depósitos de calizas un conjunto de estructuras típicas de regiones "Cársticas", como son las dolinas, uvalas, poljes, cavernas y simas que caracterizan a la Huasteca Hidalguense, también ha profundizado grandes cañones transversales a la cordillera, por donde las principales corrientes de la entidad drenan sus aguas al Golfo de México; y el rejuvenecimiento continuo de la plataforma costera ha permitido la erosión subsecuente de los depósitos arcillo-arenosos terciarios que se encuentran desde el frente este de la Sierra Madre Oriental hasta la planicie costera, con diferente morfología. La distribución geográfica de los recursos geológicos ha favorecido la minería en el estado de Hidalgo, el cual cuenta con una rica tradición en dicha actividad, que se remonta a más de 400 años.

II.3 Marco Histórico

La zona Otomí del Valle del Mezquital cubre más de 7,000 km² en el límite septentrional mesoamericano (Figura 4). Su delimitación se basa en aspectos culturales, históricos y ecológicos con énfasis en los hidrológicos, es decir, en la localización de los parte aguas de las subcuencas de los cauces afluentes del río Tula y San Juan (los ríos Alfajayucan, Arroyo Zarco, Rosas, Salado, Tecozautla, Tlautla, Actopan y Tula). La región forma parte del altiplano central mexicano, dentro de la provincia fisiográfica de la meseta neovolcánica. Comprende el occidente del estado de Hidalgo, parte del norte del Estado de México y una limitada zona del sureste del estado de Querétaro (López y Fournier, 2009).

En la época prehispánica las poblaciones humanas del Valle del Mezquital habían generado un aprovechamiento eficiente del ambiente físico en toda la región, a partir de una economía que se basaba en el aprovechamiento de los gradientes del ecosistema por medio de diversos tipos de prácticas agrícolas. Este sistema agrícola se complementaba con la recolección de diversos tipos de insectos comestibles que proliferaban de forma estacional, así como con los productos de diversos sistemas de caza; en las fuentes etnohistóricas se destaca que estas actividades se realizaban de forma colectiva.

Pahñú tiene una ocupación inicial que originalmente fue fechada en 512 a 600 d. C. por paleomagnetismo, aunque también se han obtenido fechas de C14 que ubican las primeras evidencias arquitectónicas de estos sitios en 327 o (380, 385) 443 d.C.

El centro cívico-ceremonial del Pahñú tenía una pequeña plaza con un palacio localizado al oriente y la pirámide principal al norte, sobre el borde de la mesa donde se localiza el sitio. El patrón de distribución de los centros cívico-ceremoniales se ubican en mesetas, mientras que el conjunto de la población y las milpas se encontraban dispersas en los valles relativamente áridos (López y Fournier, 2009).

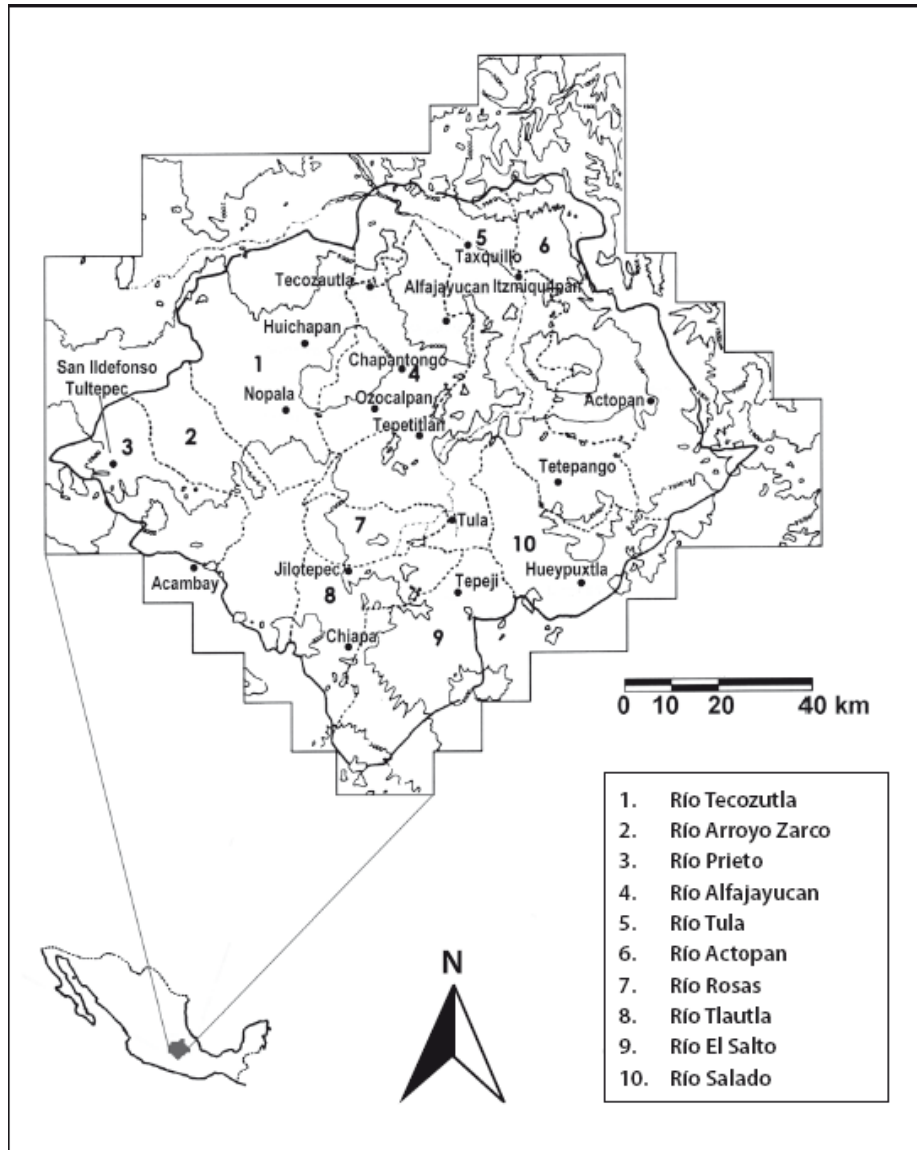


Figura 4. Valle del Mezquital (Tomado de López y Fournier, 2009).

La estructura principal muestra un gran talud muy alto, de cerca de 1.2 m se desplanta un tablero de cerca de 2.6 m de altura. En su lado norte, la fachada muestra una doble escalinata recubierta de barro, delimitada por alfardas que rematan, al menos en la parte conservada, en un dado. En la fachada sur, que da hacia la plaza, existe, al parecer, una sola escalinata (Figura 5).



Figura 5. Centro cívico-ceremonial, pirámide principal de Pahñú.

En la transición Clásico al Epiclásico se incrementó la población y el número de centros nucleados con arquitectura cívico-ceremonial, en tanto que es limitada la presencia de comunidades rurales. Tal vez fue por la oportunidad y la facilidad de ocupar un amplio territorio para explotar recursos naturales y desarrollar prácticas agrícolas, posiblemente reforzada por los lazos de parentesco, lo que, provocó una movilización de distintos grupos que arribaron al Valle del Mezquital desde la Cuenca de México, el Bajío y la región de los lagos al oeste en el marco de la caída teotihuacana.

Todo parece indicar que en los asentamientos Xajay (culturas que construían sus templos en las partes altas de las mesetas y vivían en comunidades establecidas en los valles alrededor de éstas) la transición se realizó sin abandonar los centros cívico-ceremoniales, por lo que es probable que la misma población los desacralizara y los volviera a sacralizar a partir de ofrendas de renovación y la construcción de nuevas estructuras piramidales, sobre ellas, que modificaron radicalmente el viejo estilo arquitectónico hacia el del Epiclásico regional (López y Fournier, 2009). La estructura principal en Pahñú muestra estas características, presenta 3 cuerpos, de los cuales arqueológicamente se encontraron completos 2 y el sistema está basado en cajones constructivos, dentro del cajón constructivo principal se construyeron muros paralelos y perpendiculares con la finalidad de distribuir los esfuerzos de la estructura, en los espacios entre los muros se encontraba una secuencia de relleno (toba volcánica, sedimentos, argamasa, etc.) y una capa delgada de lodo.

Se cree que al momento de desacralizar la subestructura y volver a sacralizarla se hicieron ofrendas en las esquinas de la pirámide y se colocaron a sus dioses preferenciales en el centro de la estructura.

El Tecpan (Figura 6), otra estructura que se encuentra en Pahñú localizada al sureste de la pirámide principal solo muestra dos etapas constructivas que marcan esta transición, era un edificio político-administrativo y en el interior de la subestructura se encontraron ocho banquetas (o asientos que se construyeron dentro de la estructura) que eran parte importante de sus funciones, para la segunda etapa constructiva se hizo una ampliación, se rellenó la estructura original y construyó un nuevo piso, cuenta con una entrada principal y muestra una escalinata delimitada por alfardas.



Figura 6. Centro político-administrativo, Tecpan.

En ambas estructuras se ha encontrado evidencia de que al momento de construir se pretende ofrendar la nueva construcción colocando entre el relleno fragmentos de diferentes materiales, sin embargo no designaban un espacio en particular para dicha ofrenda.

De acuerdo al marco histórico, geológico y a los principales objetivos de interés para los arqueólogos como son la localización de las ofrendas que ayuden a la exploración arqueológica y la localización del relleno que afecta la parte norte de la pirámide principal se ha decidido utilizar la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) como Método Geofísico Prospectivo y los siguientes capítulos pretenden dar una breve introducción de las bases teóricas que lo sustentan, además de las diferentes formas de medición y adquisición de datos del método.

III. Fundamentos teóricos del Método Geofísico

Los métodos eléctricos de prospección, también denominados geoelectrónicos estudian, por medio de mediciones efectuadas en la superficie, la distribución en profundidad de alguna magnitud electromagnética. Existen tres magnitudes electromagnéticas principales o constantes materiales que en principio podrían utilizarse para identificar los cuerpos situados en el subsuelo. Estas magnitudes son la permeabilidad magnética μ , la constante dieléctrica o permitividad ϵ y la resistividad ρ . Entre ellas y hasta ahora, es la resistividad y la permitividad las magnitudes cuya distribución en el subsuelo se estudia.

La *resistividad* es una medida de la dificultad que la corriente eléctrica encuentra a su paso en un material determinado; pero igualmente puede considerarse como la facilidad de paso y sus unidades son ($\Omega\cdot m$). Resulta así el concepto de *conductividad*, que expresado matemáticamente es el inverso de la resistividad (Orellana, 1982).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad \dots (3.1)$$

La resistividad del suelo está relacionada con varios parámetros geológicos, tales como el contenido mineral o de fluido, porosidad, temperatura, presión y el grado de saturación de agua en la roca.

III.1 Teoría fundamental

Consideremos un subsuelo compuesto por un semiespacio de resistividad ρ . El otro semiespacio de resistividad infinita, representará la atmosfera. Para establecer un campo eléctrico será preciso disponer de un generador de corriente y conectarlo a dos electrodos A y B parcialmente clavados en el suelo. Como el tamaño de estos es relativamente pequeño, podemos considerar que los electrodos se reducen a puntos situados en el suelo. La corriente de intensidad I_A penetrará por en el subsuelo, y después de recorrerlo, saldrá por B con intensidad I_B volviendo al generador para cerrar el circuito (Figura 7). Es evidente que

$$I_A + I_B = 0 \quad \dots(4.1)$$

Si el régimen es estacionario.

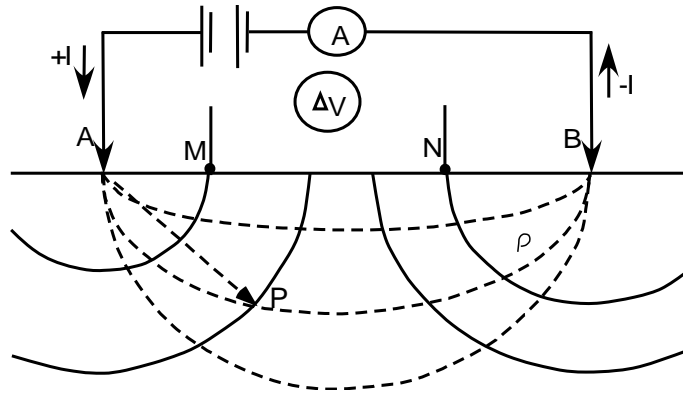


Figura 7. Aplicación de corriente eléctrica al terreno.

Para establecer las leyes del fenómeno considerado, partiremos de las ecuaciones de Maxwell, (Orellana, 1892).

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \dots (4.2)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad \dots (4.3)$$

donde:

B es el campo de inducción magnética (T),
 J es la densidad de corriente (A/m²),
 E es el campo Eléctrico (V/m),
 D es el campo de desplazamiento (C/m²) y
 H es el campo Magnético(A/m).

Por tratarse de un medio estacionario, habrán de eliminarse las derivadas temporales, y tendremos

$$\nabla \times E = 0 \quad \dots (4.4)$$

$$\nabla \times H = J \quad \dots (4.5)$$

La relación entre el potencial eléctrico y el campo de intensidad está dado por (Loke,2009):

$$E = -\nabla\varphi \quad \dots (4.6)$$

La ecuación (4.4) nos dice que el campo eléctrico E es conservativo o irrotacional, por lo que deriva de un potencial escalar φ .

La ley de física fundamental usada en estudios de resistividad es la Ley de Ohm esta rige el flujo de corriente en el suelo. La ecuación de la Ley de Ohm en forma vectorial del flujo de corriente en un medio continuo está dado por:

$$J = \sigma E \quad \dots (4.7)$$

Donde σ es la conductividad del medio, J es la densidad de corriente y E es el campo de intensidad eléctrica. La cual nos dice que la densidad de corriente J en un punto, tiene la misma dirección y sentido que el campo E en el mismo punto, y es proporcional a él. El factor de proporcionalidad es σ . En la práctica, lo que es medido es el potencial del campo eléctrico.

Combinando las ecuaciones (4.6) y (4.7), tenemos:

$$J = -\sigma \nabla \varphi \quad \dots (4.8)$$

III.2 Potencial de una fuente puntual

En casi todos los estudios, las fuentes de la corriente esta en forma de fuentes puntuales. En este caso sobre un elemento de volumen ΔV rodeado de una corriente I , localizado en (x_s, y_s, z_s) la relación entre la densidad de corriente y la corriente está dada por, (Loke, 2009):

$$\nabla \cdot J = \left(\frac{I}{\Delta V} \right) \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad \dots (4.9)$$

Donde δ es la función delta de Dirac. La ecuación (4.9) puede ser reescrita como:

$$-\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z)] = \left(\frac{I}{\Delta V} \right) \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad \dots (4.10)$$

Esta es la ecuación básica que da la distribución del potencial en el suelo debida a una fuente de corriente puntual. Un gran número de técnicas han sido desarrolladas para resolver esta ecuación. Para una distribución de resistividad arbitraria, las técnicas numéricas son comúnmente más usadas.

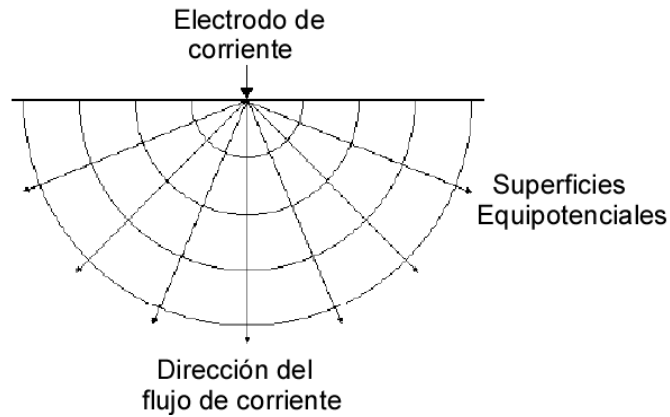


Figura 8. Flujo de la corriente de una fuente puntual en la superficie y la distribución del potencial.

Utilizaremos un caso simple con un subsuelo homogéneo, una sola fuente de corriente puntual, y un potencial que varía inversamente con la distancia de la fuente de la corriente. La superficie equipotencial tiene forma de semiesfera, y el flujo de la corriente es perpendicular a la superficie equipotencial. El potencial en este caso está dado por (Loke, 2009):

$$\varphi = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad \dots (4.11)$$

Donde r es la distancia de un punto en el medio (incluyendo la superficie del suelo) al electrodo. En la práctica, en todos los estudios de resistividad usan al menos 2 electrodos de corriente, uno de corriente positiva y otro de fuente de corriente negativa. Los valores del potencial tienen un modelo simétrico sobre la superficie vertical en el punto medio entre los dos electrodos. El valor del potencial en el medio del par está dado por:

$$\varphi = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \quad \dots (4.12)$$

Donde r_A y r_B son las distancias del punto al primero y segundo electrodos de corriente.

III.3 Potencial de un arreglo convencional de cuatro electrodos

En prácticamente todos los estudios, se mide la diferencia de potencial entre 2 puntos (normalmente sobre la superficie). Para un arreglo típico de 4 electrodos, la diferencia de potencial está dada por:

$$\Delta\varphi = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}} \right) \quad \dots (4.13)$$

La ecuación de arriba da el potencial que puede ser medido en un medio homogéneo con un arreglo de 4 electrodos.

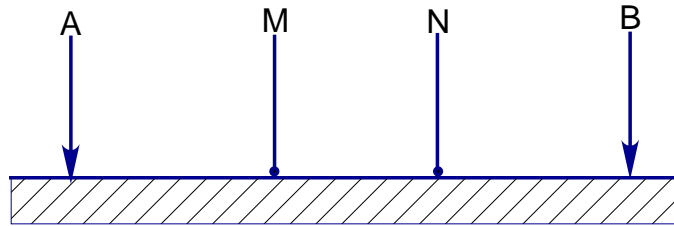


Figura 9. Arreglo convencional de cuatro electrodos.

Actualmente el estudio de los campos está invariablemente conducido sobre un medio no homogéneo donde la resistividad del subsuelo tiene una distribución 3D. Las medidas de la resistividad están aún hechas por la inyección de corriente en el suelo a través de 2 electrodos de corriente (A y B) y se mide una diferencia de potencial resultante con 2 electrodos de potencial (M y N). De los valores de corriente I y de potencial ($\Delta\varphi$), es calculado el valor de una resistividad aparente (ρ_a).

$$\rho_a = k \frac{\Delta\varphi}{I} \quad \dots (4.14)$$

Donde $k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_{AM}} + \frac{1}{r_{BM}} + \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}\right)}$

k es el factor geométrico que depende únicamente de la geometría del arreglo de los 4 electrodos.

La resistividad medida por los instrumentos normalmente dan un valor de resistencia, $R = \frac{\Delta\varphi}{I}$, también en la práctica el valor de la resistividad aparente es calculado por:

$$\rho_a = kR \quad \dots (4.15)$$

El valor calculado de la resistividad no es la resistividad verdadera del subsuelo, pero el valor "aparente" de la resistividad de un medio homogéneo, dará el mismo valor de resistividad con el mismo arreglo de electrodos.

Cuando el medio no es homogéneo (Figura 10). Efectuando las mediciones pertinentes resultará una resistividad ficticia ρ_a que en general no será igual a la ρ_1 que corresponde a la zona del electrodo A, ni a la ρ_2 que se halla bajo los electrodos M y N, sino que dependerá de ρ_1, ρ_2, ρ_3 y de las distancias r y a . Esta resistividad tampoco puede considerarse como promedio ni como media ponderada de las tres resistividades presentes, pues puede ocurrir que sea mayor o menor que todas ellas. Esta resistividad ficticia ρ_a que se obtiene aplicando a los datos obtenidos sobre un medio heterogéneo la expresión correspondiente a medio homogéneo, es la *resistividad aparente*. Esta es la variable experimental que expresa los resultados de las mediciones de la mayoría de los métodos geoelectrónicos y la que se toma como base para la interpretación. Las

dimensiones de la resistividad aparente, en virtud de su definición, son las mismas que para la resistividad, y su unidad será también el ohmio-metro ($\Omega\cdot m$) (Orellana, 1982).

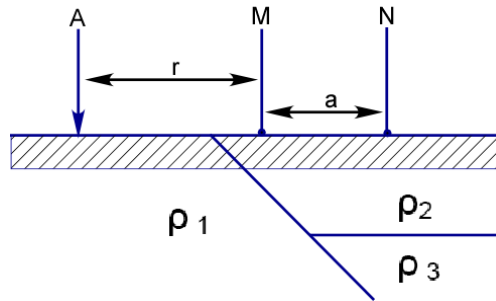


Figura 10. Ejemplo de suelo heterogéneo.

La relación entre la resistividad “aparente” y la resistividad “real” es una relación compleja. Determinar la resistividad real del subsuelo de los valores de la resistividad aparente es un problema de “inversión”.

III.4 Teoría básica de inversión

La *teoría de inversión* puede describirse en términos de un conjunto organizado de métodos matemáticos cuyo propósito común es analizar series de datos u observaciones con objeto de extraer información significativa sobre algún fenómeno físico, con base en inferencias derivadas de las observaciones mismas. Las incógnitas por resolver se plantean en términos de los valores numéricos que pueden asumir las propiedades más características del fenómeno bajo estudio. Estas propiedades se denominan “parámetros del modelo” y se presume la existencia de alguna teoría matemática o “modelo” que describe adecuadamente la relación entre los parámetros del modelo y los datos (Menke, 1989).

El término “*problema inverso*” se utiliza en contraste con el de “*problema directo*”, que se define como el proceso que consiste en predecir los resultados de una serie de mediciones a partir de algún principio general o modelo y un conjunto de condiciones específicas relevantes para el problema de interés. El problema inverso, por el contrario, comienza desde los datos y un modelo apropiado, para posteriormente estimar los parámetros del modelo (Menke, 1989).

En todos los métodos de optimización, un modelo inicial es modificado de manera iterativa hasta que la diferencia entre el modelo respuesta y los valores de los datos observados son reducidos. Este conjunto de datos observados pueden ser escritos como un vector columna y dado por:

$$y = \text{col}(y_1, y_2, \dots, y_m) \quad \dots (4.16)$$

Donde m es el número de mediciones. El modelo respuesta f puede ser escrito de una forma similar:

$$f = \text{col}(f_1, f_2, \dots, f_m) \quad \dots (4.17)$$

Para los problemas de resistividad, es una práctica común usar el logaritmo de los valores de resistividad aparente de datos observados y el modelo respuesta, y el logaritmo de los valores del modelo como el modelo de parámetros. El modelo de parámetros puede ser representado por el siguiente vector:

$$q = \text{col}(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad \dots (4.18)$$

Donde n es el número de parámetros del modelo. La diferencia entre los datos observados y el modelo respuesta está dado por las diferencias en el vector:

$$g = y - f \quad \dots (4.19)$$

En el *método de optimización de mínimos cuadrados*, el modelo inicial está definido tal que la suma del cuadrado de los errores E de la diferencia entre el modelo respuesta y los datos observados es minimizada.

$$E = g^T g = \sum_{i=1}^n g_i^2 \quad \dots (4.20)$$

Para reducir el error de la ecuación anterior, es usada la siguiente *ecuación de Gauss-Newton* para determinar el cambio en los parámetros del modelo que puede reducir la suma de errores cuadrados.

$$J^T J \Delta q_i = J^T g \quad \dots (4.21)$$

Donde Δq es el cambio de los parámetros del modelo y J es la matriz Jacobiana (de tamaño $m \times n$) de derivadas parciales. Los elementos de esta matriz están dados por:

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j} \quad \dots (4.22)$$

Este es el cambio en el i -ésimo modelo respuesta debido al cambio en el j -ésimo parámetro del modelo. Después de calcular los cambios en el vector de parámetros, un nuevo modelo es obtenido por:

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k \quad \dots (4.23)$$

En la práctica, la simple ecuación (4.21) de mínimos cuadrados es raramente usada por si misma en la inversión geofísica. En algunas situaciones la matriz Jacobiana $J^T J$ puede ser singular, y la ecuación de mínimos cuadrados no tiene solución para Δq . Otro problema común es que el producto de la matriz $J^T J$ es casi singular. Esto puede ocurrir si el modelo inicial es pobre y muy diferente al modelo de optimización usado. Los parámetros cambian el vector calculado usando la ecuación (4.21) puede tener componentes tan grandes como el nuevo modelo calculado con (4.23) o puede tener valores que no son reales. Un método común para este problema es la *modificación de Marquard-Levenberg* (Lines y Treitel, 1984. Citado por Loke, 2009) para la ecuación de Gauss-Newton que está dada por:

$$(J^T J + \lambda I) \Delta q_k = J^T g \quad \dots (4.24)$$

Donde I es la matriz identidad. El factor λ es conocido como el factor Marquardt o amortiguado, y este método es también conocido como el Método de regresión rígida (Inman, 1975. Citado por Loke, 2009) o Método de Mínimos Cuadrados Amortiguados. El factor de amortiguamiento efectivamente limita el rango de valores que las componentes del vector de parámetros que Δq puede tomar. Mientras que el Método de Gauss-Newton en la ecuación (4.21) solo intenta minimizar el vector de la suma de los cuadrados de las diferencias, el método Marquardt-Levenberg también minimiza una combinación de la magnitud del vector de diferencias y el cambio del vector de los parámetros. Este método ha sido utilizado con éxito en la inversión de resistividad de datos de sondeo eléctrico vertical (SEV), en donde el modelo se compone de un pequeño número de capas. Sin embargo, cuando el número de parámetros del modelo es grande, como en los modelos de inversión 2D y 3D que consiste en un gran número de muestras pequeñas, el modelo producido por este método puede tener una distribución de resistividad errónea con falsas zonas de alta o baja resistividad (Constable, 1987. Citado por Loke, 2009). Esto significa resolver un problema bajo-o sobre determinado.

- **Método de Suavizado Restringido**

Para superar el problema de tener un número muy grande de parámetros la ecuación de mínimos cuadrados de Gauss-Newton se modifica a fin de minimizar las variaciones espaciales en el modelo de parámetros (es decir, el modelo de resistividad cambia los valores de una manera suave y gradual). Este suavizado limitado por el método de mínimos cuadrados (Ellis y Oldenburg, 1994^a. Citado por Loke, 2009) tiene la siguiente forma matemática:

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_k = J^T g - \lambda F q_k \quad \dots (4.25)$$

Donde $F = \alpha_x c_x^T C_x + \alpha_y c_y^T C_y + \alpha_z c_z^T C_z$, y C_x , C_y y C_z son las matrices de suavizado en las direcciones x , y y z . α_x , α_y , y α_z son los pesos relativos dados por los filtros de suavidad en las direcciones x , y y z . Una forma común de la matriz de suavizado es la matriz de diferencias de primer orden (Groot-Hedlin y Constable, 1990. Citado por Loke, 2009) que esta dada por:

$$C = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ & & & \dots & & 0 \\ & & & & \dots & 0 \\ & & & & & 0 \end{bmatrix}$$

La ecuación (4.25) también intenta minimizar el cuadrado de los cambios espaciales, o robustos, de los valores del modelo de resistividad. *El método de optimización de suavizado restringido* es, de hecho, la norma L2. Esto tiende a producir un modelo con una variación suave de los valores de resistividad. Este enfoque es aceptable si la resistividad real del subsuelo varía de una manera suave o gradual.

IV. Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

La tomografía de resistividad eléctrica (TRE) es una técnica de adquisición particular en prospección eléctrica de corriente continua para generar imágenes de la distribución real en el espacio de una propiedad física sobre una sección plana o volumen de un objeto sólido, realizando mediciones remotas de propiedades físicas.

Este método se emplea para determinar la distribución de la resistividad eléctrica en el subsuelo de un gran número de medidas de resistividad aparente hechas con electrodos posicionados en un patrón geométrico arbitrario con el objetivo principal de determinar una imagen eléctrica que muestre la distribución de la resistividad verdadera en el subsuelo (Tejero, 2002. Citado por Chávez, 2011). La tomografía de resistividad eléctrica es la unión entre el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) tradicional, y los perfilajes o calicatas.

En la TRE suelen usarse cuatro electrodos para realizar medidas minimizando los efectos de las resistencias de contacto. Por dos electrodos es suministrada una corriente conocida y en los otros dos se mide la diferencia de potencial, sin embargo, la TRE requiere decenas o cientos de electrodos para realizar centenas o miles de medidas. La tomografía de resistividad eléctrica puede hacerse en superficie, en pozo o en ambos.

Tradicionalmente la TRE3D ha consistido en el uso de arreglos multi-electródicos localizados en líneas paralelas que cubren el área de estudio, realizando observaciones en las direcciones 'x' y 'y', con una gran cantidad de registros medidos que hacen que el procesamiento y la inversión de datos algunas veces tome demasiado tiempo. Loke y Barker (1996) (Citado por Chávez, 2011) diseñaron una técnica que redujo el número de datos manteniendo la resolución y calidad en los levantamientos. Esta fue llamada Levantamiento Diagonal Cruzado ('cross-diagonal survey'), donde el potencial (V) es observado en electrodos localizados en transectos horizontales, verticales y diagonales que atraviesan a los electrodos de corriente (I). En este tipo de estudios autores como Aizebeokhai (2009) (Citado por Chávez, 2011) recomiendan una separación máxima por línea de hasta 4 veces la separación eléctrica 'a'.

Las construcciones se convierten en obstáculos, pues limitan este tipo de estudios, dejando solo la oportunidad de usar perfiles de TRE 2D., a pesar de ser estas el objeto de estudio. Así las técnicas mencionadas anteriormente no pueden aplicarse pues no existe forma de obtener una cobertura completa o al menos adecuada del área estudiada (Deceuster y Kaufmann, 2003. Citado por Chávez, 2011). Por otro lado la distancia entre líneas paralelas puede ser mucho más grande que lo recomendado por Aizebeokhai et al. (2009) (Citado por Chávez, 2011).

La exploración geofísica se enfrenta entonces a un gran reto cuando se aplica en construcciones como casas, museos, escuelas, monumentos históricos que no permiten posicionar perfiles en paralelo para formar mallas, además de no poder realizar perforaciones para insertar los

electrodos por instalaciones de luz, teléfono, agua, gas o pisos que no deben de ser dañados por su valor patrimonial.

IV.1 Configuraciones electródicas

El principio de los cuatro electrodos se denomina *cuadripolo o tetrapolo*. En principio los cuatro electrodos pueden adoptar cualquier disposición geométrica sobre el plano que representa la superficie del terreno (Orellana, 1982).

Los diferentes arreglos o dispositivos se diferencian entre sí por la distancia relativa entre los electrodos, y la posición de los electrodos de corriente respecto a los de potencial.

Para este trabajo los levantamientos que se realizaron en campo fueron con las siguientes configuraciones electródicas: Arreglo tipo Wenner-Schlumberger tipo "L", Arreglos Ecuatoriales (Paralelos y Diagonales) y Arreglos Dipolares en las esquinas.

❖ Wenner-Schlumberger

Este un arreglo híbrido entre los arreglos Wenner y Schlumberger, esto significa que combina las características de ambos, y que sea moderadamente sensible a estructuras horizontales y verticales. Una de las desventajas de este arreglo es que presenta una pobreza de datos en los extremos (Loke, 2009). Debe mencionarse que a pesar de esta desventaja presenta una alta intensidad de la señal y que posee una buena profundidad de investigación. El arreglo Wenner es un caso especial donde el factor n del arreglo Wenner-Schlumberger es igual a 1. Para las siguientes mediciones el electrodo de corriente se queda fijo, la distancia entre los electrodos de potencial es constante y la distancia entre los electrodos AM y NB esta variando a razón de n , dependiendo de la profundidad de interés y de la longitud del tendido.

La expresión de la resistividad aparente para este arreglo:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \pi n(n + 1)a \quad \dots (5.1)$$

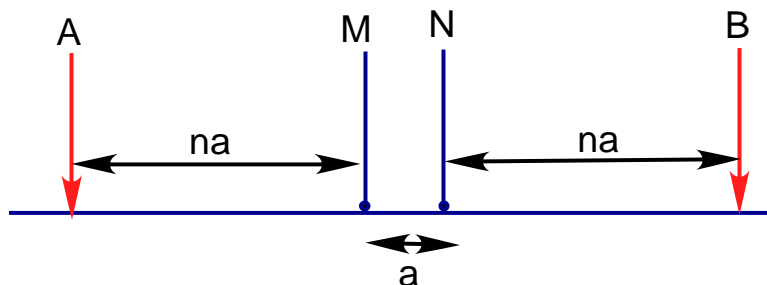


Figura 11. Configuración electródica Wenner-Schlumberger.

❖ Dipolo-dipolo

Está conformado por 4 electrodos, dos de potencial y dos de corriente, caracterizado porque la distancia entre los electrodos que forman los dipolos es la misma en ambos. Este espaciamiento puede denotarse por la letra a . La separación entre los dipolos es de un factor de n veces el espaciamiento a .

Este arreglo es muy usado debido a que proporciona una imagen detallada de la resistividad del subsuelo, posee una gran sensibilidad para la detección de cambios horizontales de resistividad y por su gran profundidad de penetración. Proporciona buena información mediante el modelado. Carece de resolución lateral y tiene la desventaja de que la intensidad de la señal es muy pequeña para grandes valores de n

(Loke, 2009). Un procedimiento para superar estos problemas es aumentar la distancia entre cada par de electrodos que conforman los dipolos para reducir la caída en el potencial cuando la longitud total del arreglo sea mayor para incrementar la profundidad de investigación.

La expresión de la resistividad aparente para este arreglo es:

$$\rho_a = \frac{V}{I} \pi n(n+1)(n+2)a \quad \dots(5.2)$$

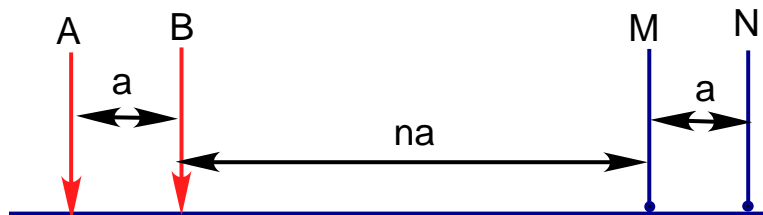


Figura 12. Configuración electródica Dipolo-Dipolo.

Este tipo de arreglos es recomendado para rejillas grandes debido a que tiene la cobertura horizontal más pobre de datos en los extremos.

Es más sensitivo a efectos 3D en comparación con otros arreglos. En muchos casos, la toma de datos 3D para este arreglo se construye a partir de estudios 2D con un número de líneas paralelas necesarias para cubrir esta región 3D establecida como objetivo de estudio.

❖ Ecuatorial dipolo-dipolo

Los dipolos de transmisión y recepción están dispuestos de manera paralela y alineada, los electrodos que conforman ambos perfiles y dipolos actúan como transmisores y receptores. Generalmente la distancia entre los dipolos es a y la separación entre los perfiles paralelos es de n veces a .

La expresión de la resistividad aparente para este arreglo es:

$$\rho_a = \frac{V}{I} \pi a \frac{(n\sqrt{n^2+1})}{\sqrt{n^2+1}-n} \quad \dots (5.3)$$

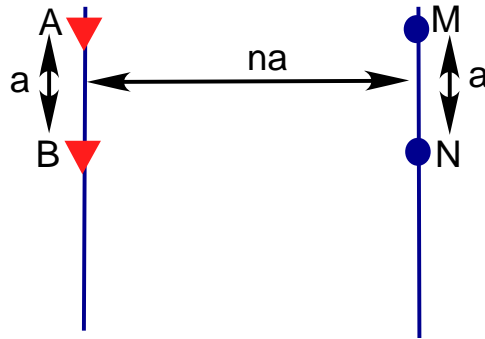


Figura 13. Configuración eléctrica Ecuatorial Dipolo-Dipolo.

❖ Arreglo Dipolo-Dipolo en las esquinas

Consiste en dos perfiles perpendiculares entre sí. Los electrodos de corriente están en los extremos de las líneas perpendiculares, la configuración de los dipolos se muestra en la figura 14, los electrodos de corriente quedarán fijos hasta que los electrodos de potencial hayan recorrido toda la línea moviéndose a razón de a hasta llegar a los extremos opuestos, posteriormente se desplazan los electrodos de corriente una distancia a y se repite el mismo procedimiento con los electrodos de potencial. Para el segundo caso los dipolos de potencial son colineales a una de las líneas (Figura 14b) y la distancia entre el dipolo es constante en todas las mediciones.

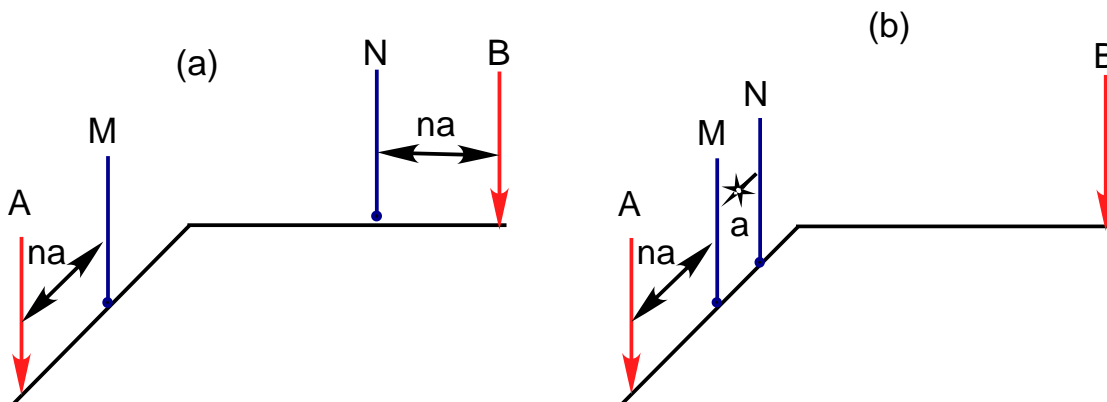


Figura 14. Configuración eléctrica Dipolo-Dipolo en las esquinas (a) y (b).

❖ Arreglo en "L"

El arreglo en "L" consiste en una secuencia Wenner-Schlumberger tomada en dos líneas perpendiculares, la separación MN será a y constante en todas las mediciones y la separación AB cambiara a razón de na . Genera una serie de perfiles 2D por debajo de las líneas perpendiculares y mediciones en 3D justo en el vértice de estas.

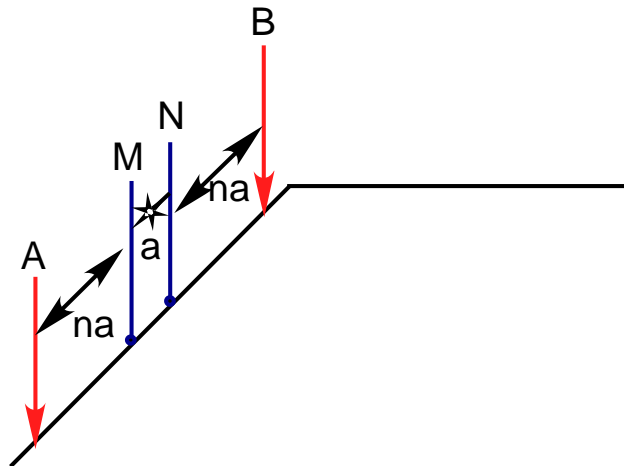


Figura 15. Configuración eléctrica Wenner-Schlumberger tipo "L".

V. Profundidad de investigación

Se supone dos electrodos A y B situados en la superficie plana de un subsuelo homogéneo e isótropo de resistividad ρ . La densidad de corriente, en función de la profundidad z , a lo largo de la línea recta, perpendicular a la superficie que pasa por el centro del segmento \overline{AB} es:

$$J_z = \frac{E}{\rho} = \frac{I}{\pi} \frac{1}{I^2 \left(1 + \frac{z^2}{l^2}\right)^{3/2}}$$

$$\text{Con } l = \frac{\overline{AB}}{2}$$

En esta ecuación se observa que en un medio homogéneo la densidad de corriente disminuye gradualmente con la profundidad en el eje vertical del dispositivo de dos electrodos. Además la mitad de la corriente I circula por encima de la profundidad $z=l$, es decir, que las zonas más profundas influirán menos en el potencial observado en superficie, al ser menor en ellas la densidad de corriente.

Al aumentar la separación \overline{AB} aumenta en la misma proporción la profundidad a que corresponde una determinada densidad de corriente, por lo que podría pensarse que la penetración es proporcional a \overline{AB} , pero en general, esto no es cierto debido a que las expresiones dadas sólo son válidas para un medio estratificado homogéneo.

Roy y Apparao (1971) (Citado por Edwards, 1922) han estudiado la penetración de diversos dispositivos en medios homogéneos, y han introducido el concepto de “profundidad característica de investigación” (DCI, por sus siglas en inglés). Ellos examinaron la contribución de cada elemento de volumen de la Tierra entre la señal total ($\Delta V/I$) observada en la superficie. Integrando esta contribución sobre una delgada capa horizontal, y normalizando de tal manera que el total de la señal es igual a la unidad, ellos construyeron las curvas de la “profundidad de investigación característica normalizada” (NDIC, por sus siglas en inglés) para varios arreglos.

Las curvas de NDIC no son simétricas en sobre el valor máximo $z_{\text{máx}}$, pero están sesgadas hacia la mayor profundidad. Edwards (1977) ha demostrado que la estimación más sólida es la “profundidad media”. En términos sencillos, la parte superior de la tierra por encima de la “profundidad media de investigación” tiene la misma influencia en el potencial medido como la parte inferior. Esto nos dice aproximadamente la profundidad que podemos “ver” con un arreglo (Edwards, 1977). Definiendo z_{med} como:

$$n(n+1)(n+2) \left\{ [n^2 + u]^{-\frac{1}{2}} - 2[(n+1)^2 + u]^{-\frac{1}{2}} + [(n+2)^2 + u]^{-\frac{1}{2}} \right\} = 1$$

$$\text{Donde } u = 4 \left(\frac{z_{\text{med}}}{a} \right)^2$$

Esta profundidad no depende de la resistividad aparente medida o la resistividad del modelo de tierra homogénea. Cabe señalar que las profundidades son estrictamente validas para un modelo de tierra homogénea, pero son lo suficientemente buenas para la planificación de un estudio de campo. Si hay suficientes contrastes de resistividad cerca de la superficie, la profundidad real de la investigación puede ser algo diferente (Loke, 2009).

Loke (2009) publicó una tabla donde muestra la profundidad media de investigación para diferentes arreglos .

No resulta claro cuál es el punto de atribución de un SEV, esto es, el punto del terreno a cuya vertical deben atribuirse los resultados obtenidos por el SEV. Por evidentes razones de simetría se toma como punto de atribución de cada SEV el centro O del dipolo MN, pero no debe olvidarse que la medición está influida por un volumen de terreno más o menos grande.

Sin embargo, en el SEV es predominante el efecto de las formaciones situadas bajo el centro O (Orellana, 1982).

VI. Metodología

VI.1 Adquisición de datos

Como se mencionó anteriormente el objetivo del estudio de Tomografía Eléctrica resistiva, se enfoca en determinar las características del relleno por debajo de la Pirámide principal y posibles anomalías de interés arqueológico en este edificio y en el Tecpan, ambas estructuras pertenecen al sitio arqueológico Pahñú en el estado de Hidalgo.

El equipo utilizado para realizar el levantamiento geofísico fue un resistivímetro modelo SySCAL Pro Switch de 48 canales de IRIS Instruments (Francia), con barras de cobre de 3/4".

Este equipo es un versátil resistivímetro eléctrico que combina un transmisor, un receptor y una unidad de conmutación en una sola cubierta. Se suministra con una batería de 12V. Las mediciones se llevan a cabo de forma automática por elección del operador, se elige el número de ciclos mínimo y máximo a realizar para el apilamiento, esto depende del valor en porcentaje de la desviación estándar o factor de calidad, en cada una de las mediciones va a repetirse el número mínimo de ciclos, si las mediciones tienen un valor de desviación estándar mayor al especificado por el operador el resistivímetro realizara el número máximo de ciclos.

El valor de inyección constante del voltaje es otro parámetro a elegir en el rango de 12 V a 800 V, el tiempo de inyección a su vez, puede seleccionarse en el rango de 250 ms a 8 s, ambos parámetros son de gran importancia, el tiempo de medición en campo depende mucho del número de ciclos a medir y del tiempo de inyección, los valores seleccionados se almacenan en la memoria interna (Figura 16).



Figura 16. Resistivímetro Syscal.

Previamente a realizar el estudio geofísico se programan las secuencias que el Syscal medirá en campo en el software Electre- Pro (IRIS Instruments, 2007), estas secuencias se programan de acuerdo a la longitud del tendido, la posición en la que estará colocado la consola, el número de electrodos y la posición de estos en los diferentes arreglos. Al tomar en cuenta todos estos parámetros en la programación de las secuencias se definen todas las posibles combinaciones en

la que los dipolos podrán desplazarse de acuerdo al arreglo a ejecutar, la distancia de este desplazamiento y, además, la función que el electrodo va a tener, ya sea de corriente o de potencial.

VI.1.1 Rejilla cuadrada de 33x33 utilizada en la Pirámide principal y en el Tecpan

Con la finalidad de poder cubrir toda la superficie de la pirámide principal se propuso una rejilla cuadrada de 33x33 m alrededor de la estructura, se colocaron 44 electrodos con una separación equidistante de 3 metros (Tejero, 2011). En el Tecpan se realizó el mismo procedimiento, la estructura se situó en el centro de la rejilla. En ambas estructuras se midieron los mismos arreglos y la misma cantidad de cuadripolos para la rejilla.

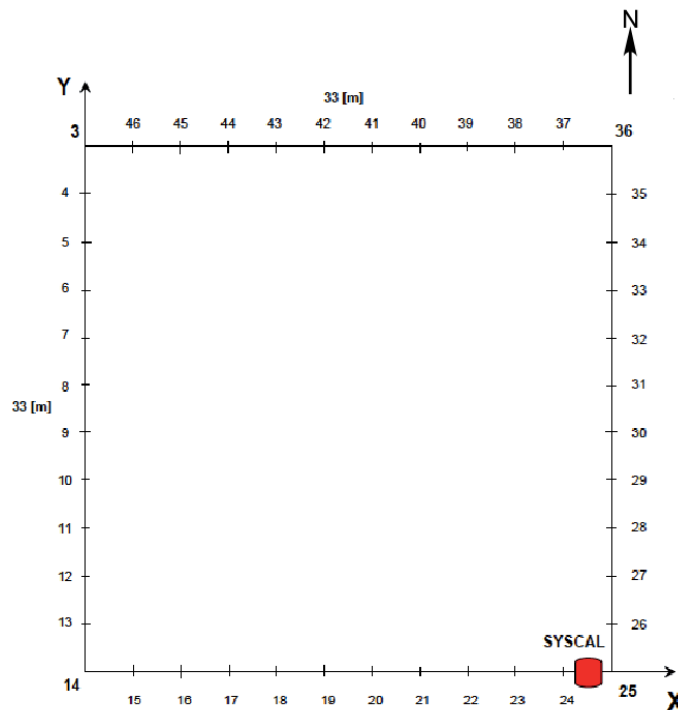


Figura 17. Rejilla utilizada para el levantamiento en la pirámide principal (Tejero, 2011; Fuentes, 2011).

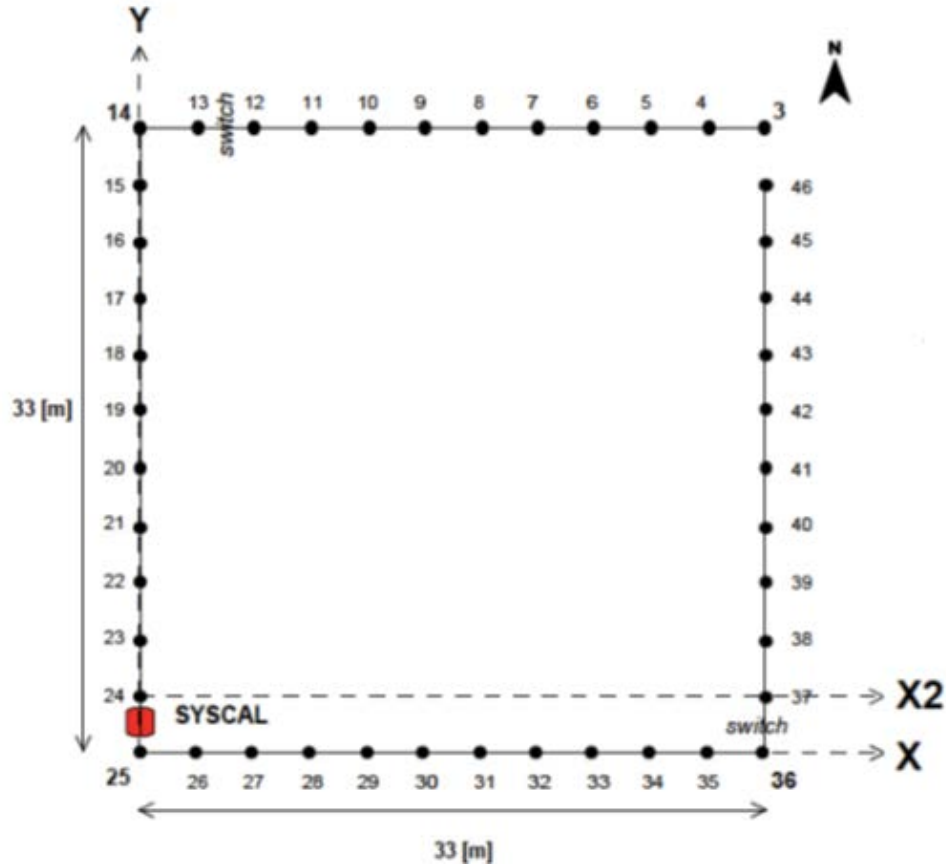


Figura 18. Rejilla utilizada para el levantamiento en el Tecpan (Tejero,2011; Gfuentes, 2011).

Un día anterior al levantamiento se realizaron las perforaciones para las barras de cobre, se le agregó a cada una CuSO_4 (Sulfato de Cobre) y se dejaron las barras parcialmente clavadas, para mejorar la conductividad del terreno.

El día del levantamiento se unió cada uno de los electrodos con el cable y este a su vez con la consola, se cargaron las secuencias previamente programadas de los arreglos multielectrodicos a realizar, que en este caso fueron Wenner-Schlumberger tipo "L", Dipolares en Esquina, Ecuatorial Paralelo y por último Ecuatorial Diagonal.

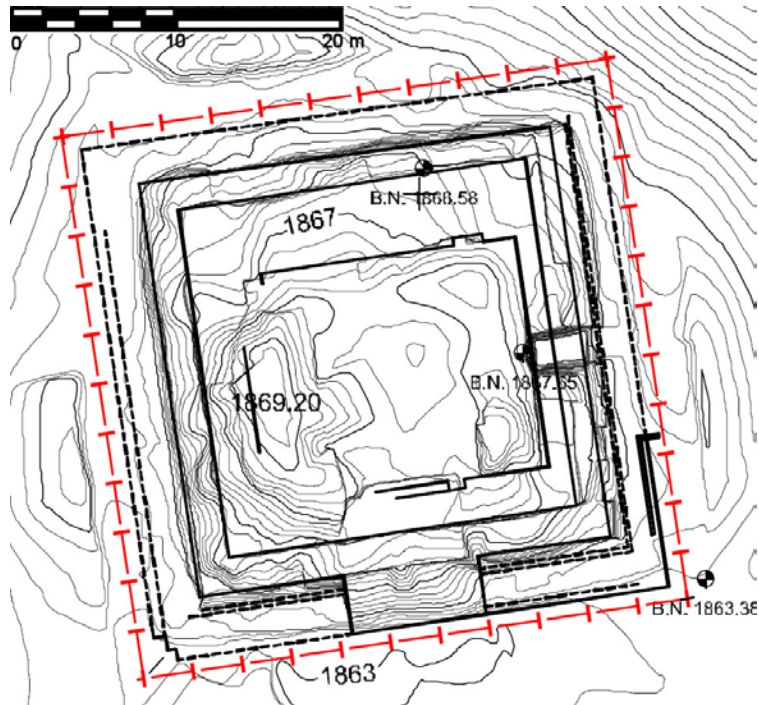


Figura 19. Mapa de elevaciones de la pirámide principal.

Se realizó una prueba de resistencia en todos los dipolos para comprobar el contacto entre la fuente y el medio, es decir, que todos los electrodos estén correctamente conectados y conduciendo corriente y se realizó con un tiempo de inyección de 250 ms.

Al final esta prueba, se comenzó con el estudio, donde se midieron cada una de las secuencias, previamente programadas en la computadora del equipo.

VI.1.2 Arreglo Dipolar en las esquinas (configuración 1).

Para la secuencia de las esquinas se midieron un total de 660 cuadrípolos, siendo esta la secuencia más larga del estudio.

Se realizaron cuatro arreglos, uno por cada esquina de la pirámide, la toma de datos inicia cuando los electrodos de corriente se encontraban en los extremos de las líneas perpendiculares, de la forma AM y BN (Figura 20), respectivamente, estos electrodos de corriente quedan fijos hasta que los electrodos de potencial recorren toda la línea moviéndose un electrodo a la vez hasta llegar a los extremos opuestos, posteriormente se desplazaron los electrodos de corriente al siguiente electrodo y se repite el mismo procedimiento con los electrodos de potencial (Tejero, 2011). Con esta secuencia se obtuvo información en un plano inclinado que va desde el vértice de los perfiles perpendiculares hacia el centro y a profundidad (Figura 21). Las flechas rojas indican la dirección de desplazamiento del dipolo de corriente y las azules la dirección de desplazamiento del dipolo de potencial, los puntos en azul representan los electrodos en el tendido (Figura 20).

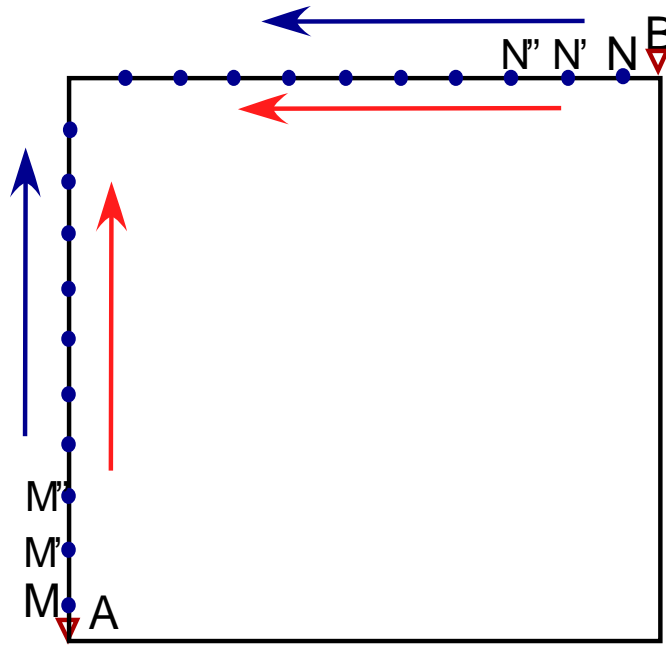


Figura 20. Configuración eléctrica del arreglo en "L". Las flechas rojas indican la dirección en que se mueven los electrodos de corriente (Triángulo rojo invertido) y en azul, los de potencial (puntos azules).

Todos los puntos de atribución están sobre el mismo plano, pero una vez que los electrodos de corriente comienzan a desplazarse se obtienen menos puntos de atribución y de manera más somera.

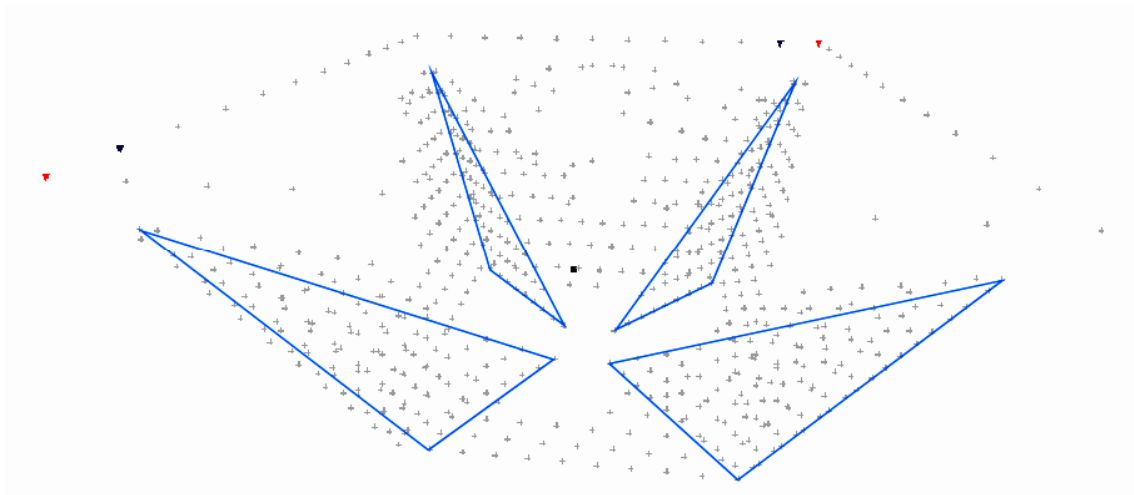


Figura 21. Puntos de atribución del arreglo en "L". (Modificado de Electre- Pro, 2007).

VI.1.3 Arreglo Dipolar en las esquinas (configuración 2)

La secuencia 2, al igual que el arreglo 1, utiliza dos rectas perpendiculares, pero en esta ocasión con un desplazamiento de los electrodos diferente. Para esta secuencia los electrodos de corriente regresan a los extremos de las líneas perpendiculares, en este caso los electrodos de potencial son colineales (Figura 22), los electrodos de corriente quedaran fijos en los extremos mientras que los dipolos de potencial se desplazan un electrodo a la vez hasta que el dipolo de potencial llegue al extremo opuesto de la línea, la separación del dipolo de potencial es de 3 m y constante en todas las mediciones, una vez que termino de medir, los electrodos de corriente se desplazan al siguiente electrodo y se medirá de manera análoga con los electrodos de potencial, el proceso terminara cuando el último cuadrípulo llegue al extremo de las líneas (Tejero, 2011), esto genera un plano inclinado de puntos de atribución, cada vez que los electrodos de corriente se desplazan se miden menos puntos de atribución y de manera más somera (Figura 23). Al término de esta serie de mediciones se volverá a medir, colocando los dipolos de potencial colineales a la segunda línea.

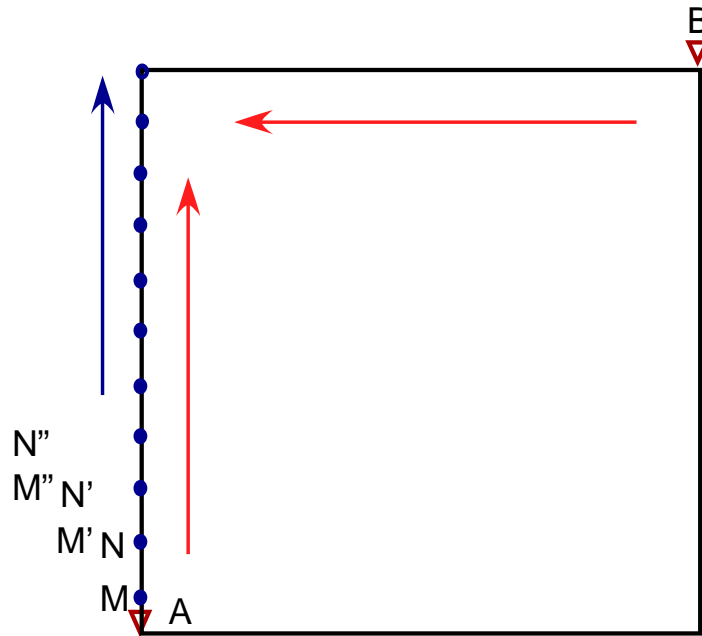


Figura 22. Configuración eléctrica del arreglo dipolo-dipolo en las esquinas.

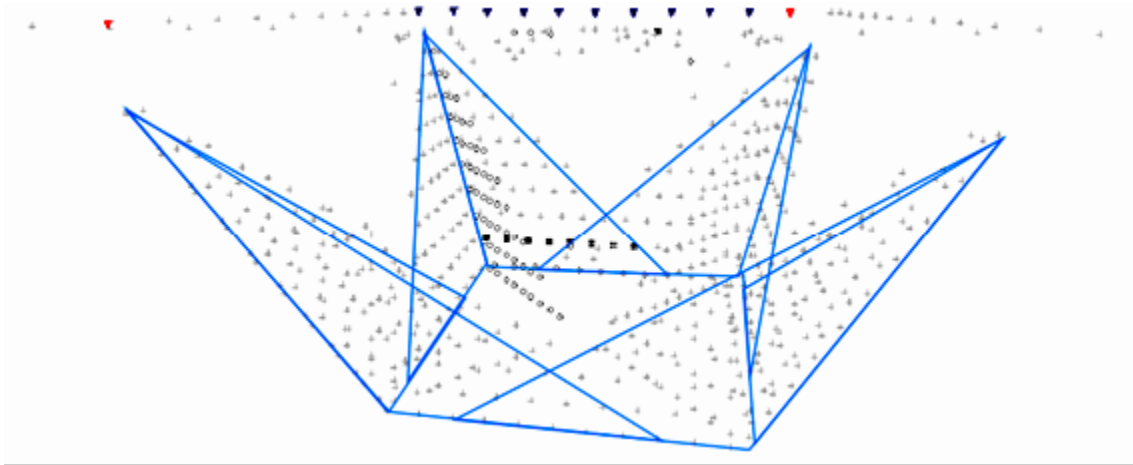


Figura 23. Puntos de atribución obtenidos con la configuración electródica dipolo-dipolo en las esquinas. (Modificado de Electre- Pro, 2007).

Estos dos procedimientos de medición se realizaron para las 4 esquinas y dieron como resultado puntos de atribución en planos inclinados hacia el centro y a profundidad de la estructura, estos arreglos proporcionan muy pocos puntos de medición en el área más somera tanto de la pirámide como del Tecpan y ningún punto de atribución en las esquinas por debajo de la estructura.

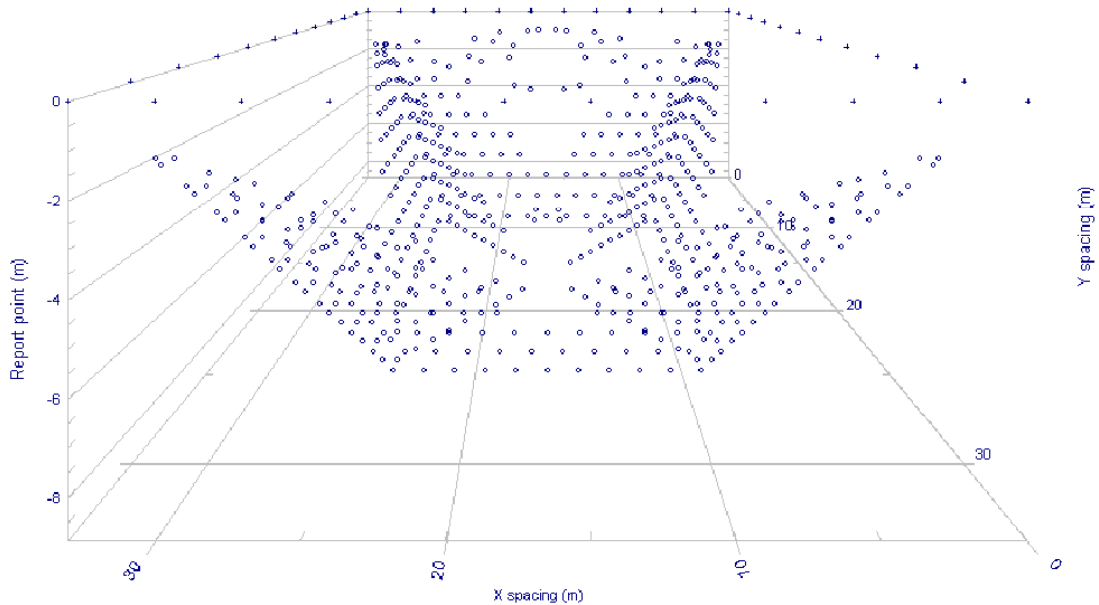


Figura 24. Distribución total de los puntos obtenidos de los arreglos en las esquinas. (Tomado de Electre - Pro, 2007).

VI.1.4 Arreglo Wenner-Schlumberger tipo "L"

La siguiente secuencia en efectuarse fue el arreglo Wenner-Schlumberger tipo "L" con 340 cuadripolos.

Los electrodos de corriente y de potencial se desplazaron alrededor del perímetro de la estructura. Las mediciones comienzan en una de las esquinas de la pirámide, con una separación electródica de 3 m (Figura 25), la separación de los electrodos de potencial fue constante en todas las mediciones $a=3$ m, mientras que los electrodos de corriente cambian a razón de na .

Se comienza a medir en las primeras dos líneas de la rejilla, el electrodo A se queda fijo en uno de los vértices y el dipolo de potencial empieza a desplazarse un electrodo a la vez, conservando la relación de distancia con los electrodos de corriente, la separación máxima que alcanza el dipolo AB es de 30 m, alcanzando esta distancia el electrodo de corriente A avanza al siguiente electrodo, con cada desplazamiento se repite el procedimiento con los electrodos de potencial. El proceso termina cuando el electrodo de corriente A llega al extremo opuesto de la línea (Tejero, 2011). El arreglo comienza a medir de la zona más profunda a la más somera.

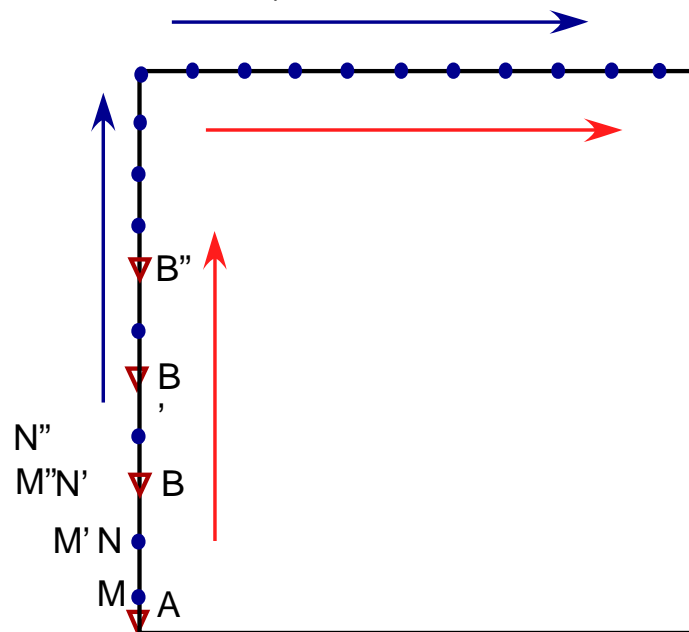


Figura 25. Configuración eléctrica del arreglo Wenner-Schlumberger tipo "L".

Una vez que termino el proceso de medición antes explicado toma automáticamente las siguientes dos líneas de la rejilla y sigue midiendo hasta completar toda la rejilla. Este procedimiento genera perfiles 2D en cada una de las líneas que forman la rejilla y una distribución de datos 3D en las esquinas (Tejero, 2011).

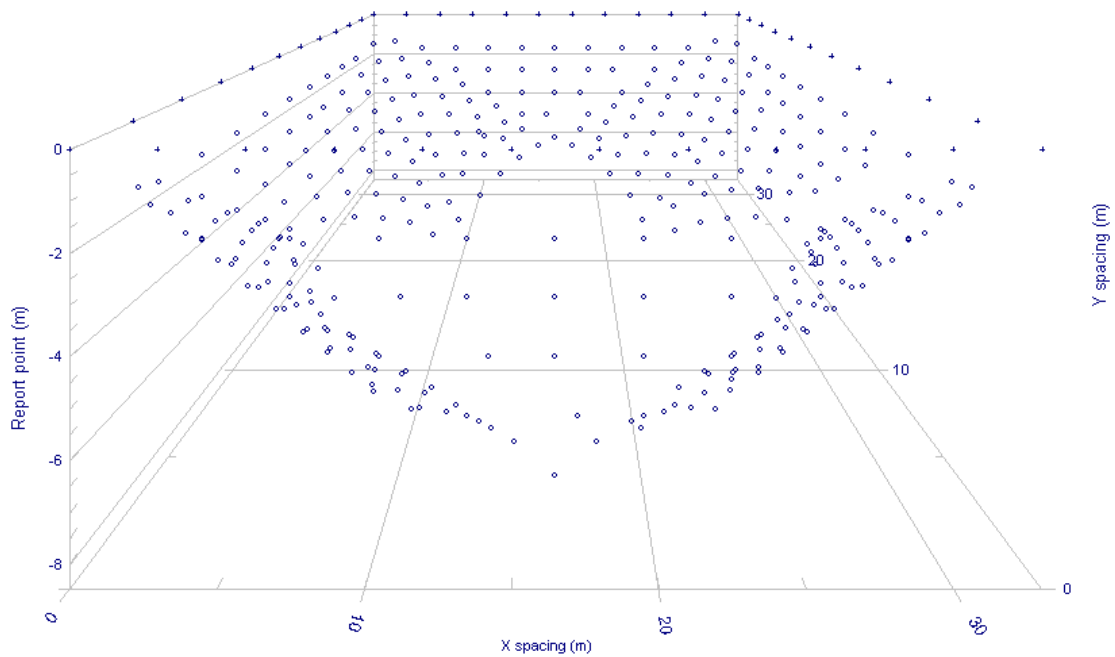


Figura 26. Distribución de puntos de atribución del arreglo Wenner-Schlumberger. (Tomado de Electre-Pro, 2007).

VI.1.5 Arreglos Ecuatoriales Diagonal

El arreglo Ecuatorial Diagonal se realizó con un total de 200 cuadripolos, los puntos de atribución forman dos perfiles 2D diagonales a la rejilla.

Para medir cada uno de los perfiles diagonales los electrodos de potencial se sitúan en los extremos de dos de las líneas perpendiculares de la rejilla y los electrodos de corriente en los extremos de las dos líneas restantes (Figura 27), midiendo simultáneamente con las cuatro líneas.

El dipolo de corriente permanece fijo mientras que el dipolo de potencial se desplaza un electrodo a la vez hacia el vértice de las líneas, cada vez que el dipolo de corriente se desplace al siguiente electrodo se repetirá el procedimiento con el dipolo de potencial.

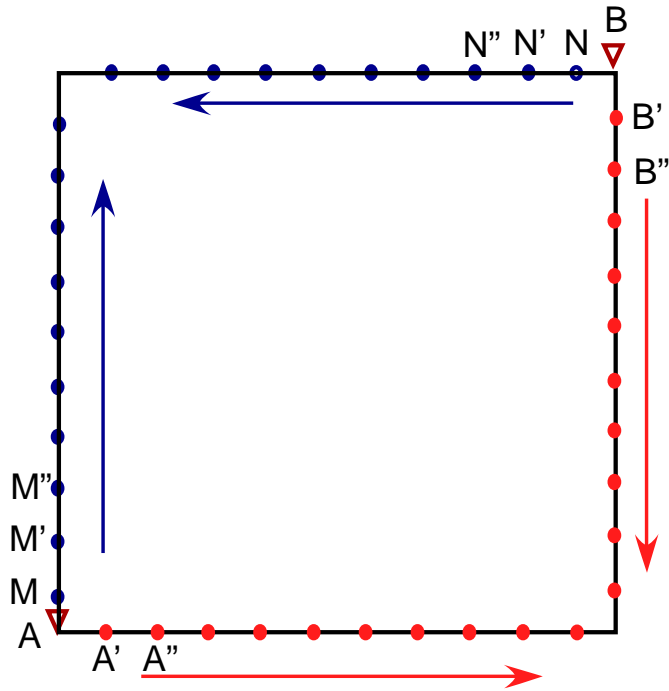


Figura 27. Configuración electródica del arreglo Ecuatorial Diagonal.

Cuando terminan las mediciones de la primera diagonal se cambian las posiciones de los dipolos, tomando las siguientes dos líneas de la rejilla y midiendo de manera análoga el segundo perfil.

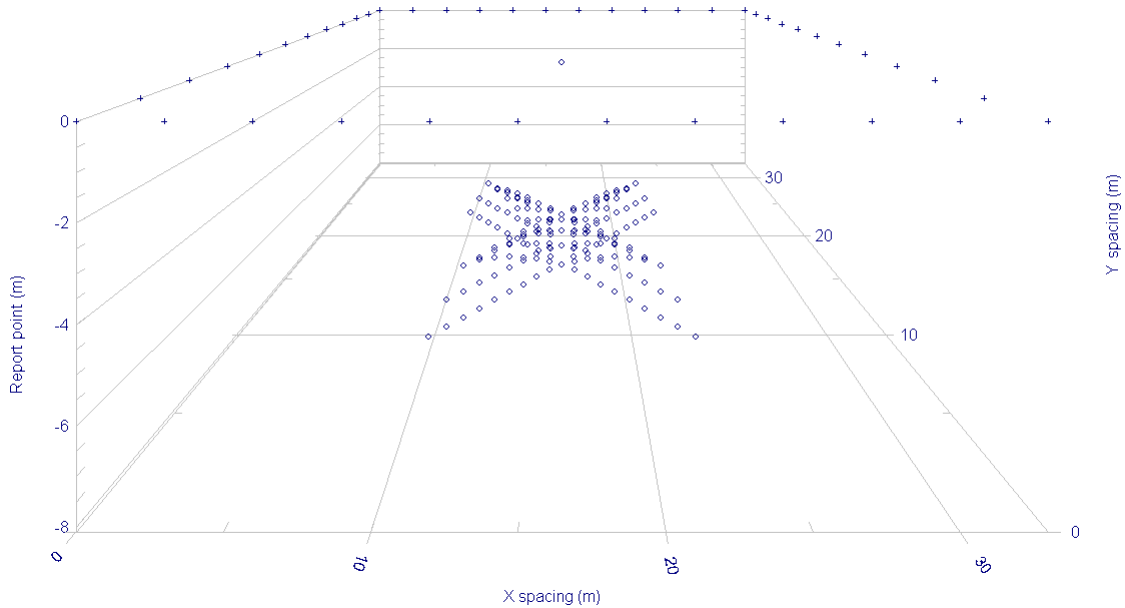


Figura 28. Distribución de puntos de a tribución del arreglo Ecuatorial Diagonal. (Tomado de Electre- Pro, 2007).

VI.1.6 Arreglos Ecuatoriales Paralelos

El arreglo Ecuatorial Paralelo tuvo un total de 182 cuadripolos y los puntos de atribución forman dos perfiles 2D.

- **Ecuatorial Wenner-Schlumberger**

Utilizando dos de las líneas paralelas de la rejilla, el dipolo de corriente se posiciona en una de las líneas y el dipolo de potencial estará en la línea paralela a esta (Figura 29), el dipolo de potencial va a tener una separación constante de $a=3$ m en cada una de las mediciones y la distancia del dipolo de corriente va a ir aumentando a razón de na , el dipolo de potencial va a desplazarse un electrodo a la vez, conservando las relaciones de distancia establecidas entre los dipolos en el arreglo Wenner-Schlumberger hasta recorrer toda la línea.

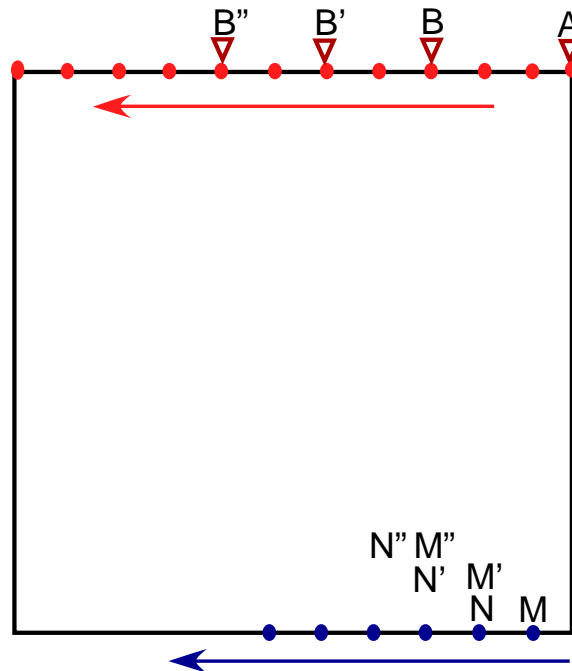


Figura 29. Configuración eléctrica del arreglo Ecuatorial Paralelo Wenner-Schlumberger.

- **Ecuatorial Dipolo-Dipolo**

Para las siguientes mediciones los electrodos cambian de posición, tomando las mismas líneas paralelas, el dipolo de cada uno de las líneas lo forman un electrodo de potencial y uno de corriente de la forma AM y BN (Figura 30), para empezar a medir los electrodos de corriente permanecen fijos y los electrodos de potencial se mueven un electrodo a la vez, una vez que llegan al extremo apuesto de la línea se desplazan los electrodos de corriente al siguiente electrodo, midiendo de manera análoga con los electrodos de potencial.

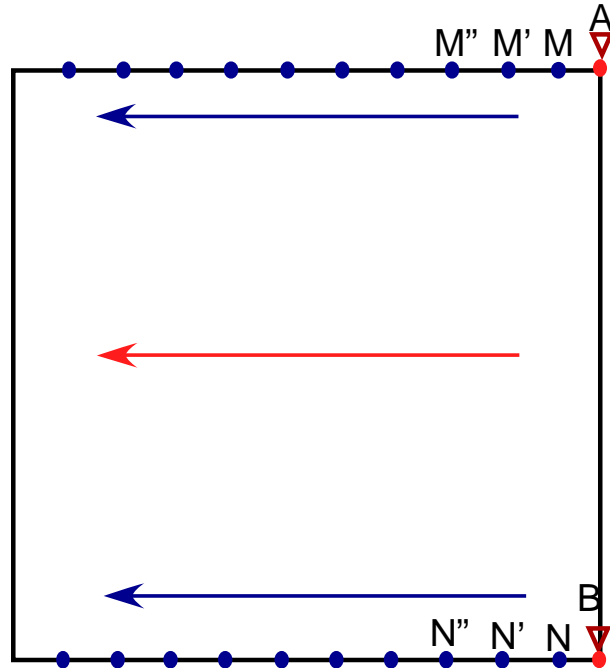


Figura 30. Configuración eléctrica del arreglo Ecuatorial Paralelo Dipolo-Dipolo.

Al conducir la medición toma automáticamente las dos líneas paralelas restantes y repite ambos procedimientos, cubriendo así toda la rejilla.

Los Ecuatoriales paralelos y Diagonales nos brindaron mayor información en el centro de la estructura, los perfiles generados se encuentran en el centro y a profundidad, los arreglos anteriores carecían de información en las áreas más someras de las estructuras.

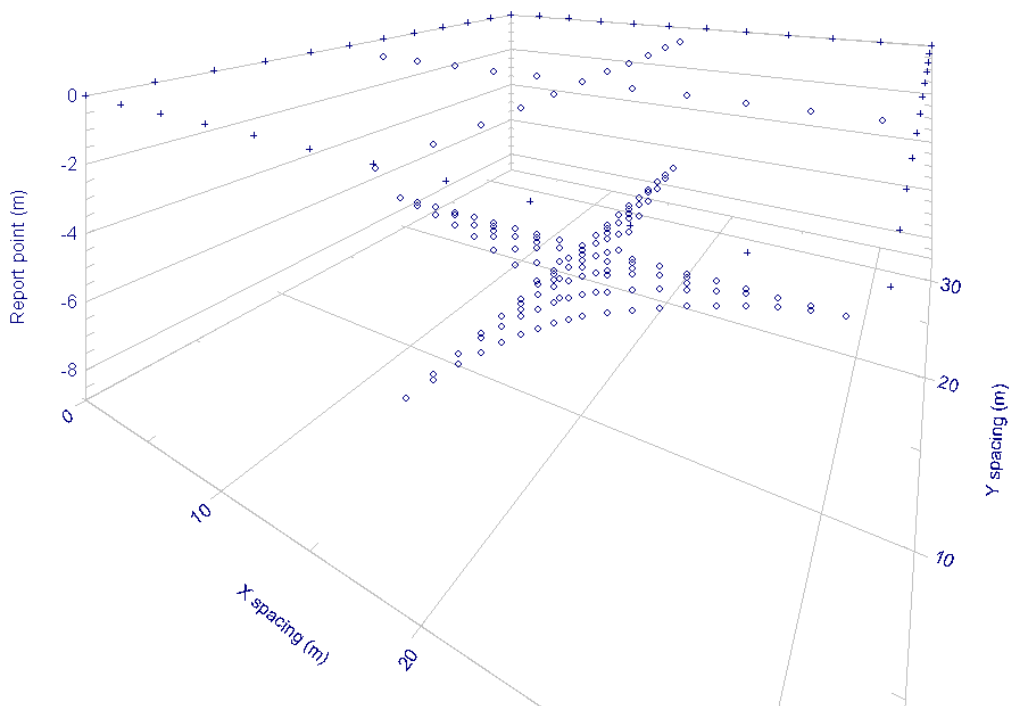


Figura 31. Distribución de puntos de atribución del arreglo Ecuatorial Paralelo WS y DD. (Tomado de Electre- Pro, 2007).

En cada una de las estructuras se hizo levantamiento topográfico de la posición de cada uno de los electrodos, se tomo con el equipo la marca LEICA, modelo NA724, que comprende de un nivel con un tripie y un estadal de resolución milimétrica, esta información es de gran importancia para corregir los datos por efectos de topografía durante la etapa de procesado.

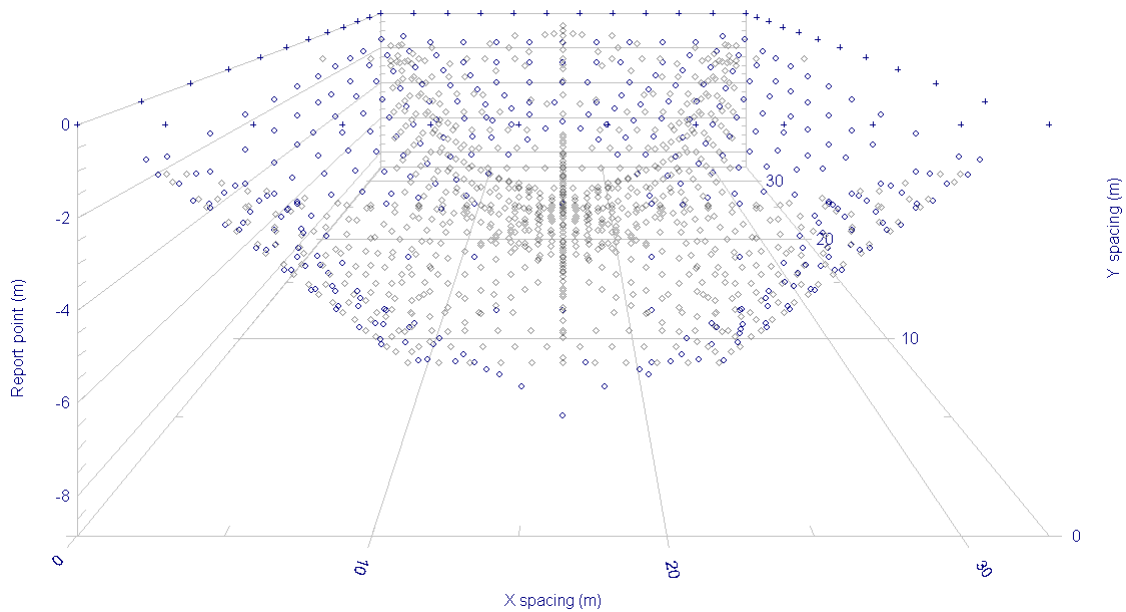


Figura 32. Distribución del total de puntos de atribución obtenidos de la rejilla cuadrada. (Tomado de Electre- Pro, 2007).

VI.2 Líneas paralelas utilizadas en el Tecpan

Para el caso del Tecpan, se agregó un estudio de cuatro líneas paralelas de doce electrodos cada una (48 en total) cumpliendo con la propuesta de Aizebeokhai et al. (2009) al tener una separación máxima de 10 m entre éstas, ya que fue posible emplazar electrodos encima del edificio (Figura 33). En esta nueva configuración se usaron únicamente arreglos Wenner-Schlumberger, Ecuatoriales Paralelos y de Mínimo Acoplamiento de donde se obtuvo una cobertura con un total de 976 cuadripolos medidos en 16 perfiles.

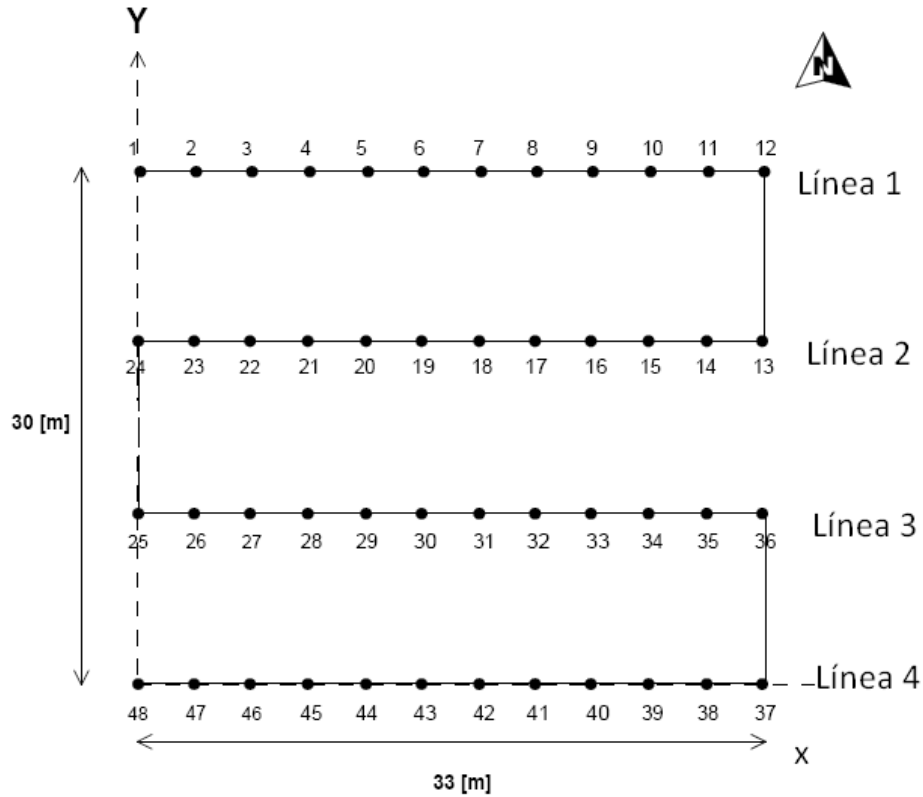


Figura 33. Arreglo de líneas paralelas utilizado en el Tecpan (Gfuentes 2011).

Se midieron cuatro perfiles 2D con el arreglo *Wenner-Schlumberger*, uno por cada línea del tendido (0, 10, 20, 30 m respectivamente), con un total de 100 cuadripolos. El principio de medición es el explicado anteriormente en la sección (IV.1), la separación del dipolo de potencial fue de 3 m y constante en todas las mediciones.

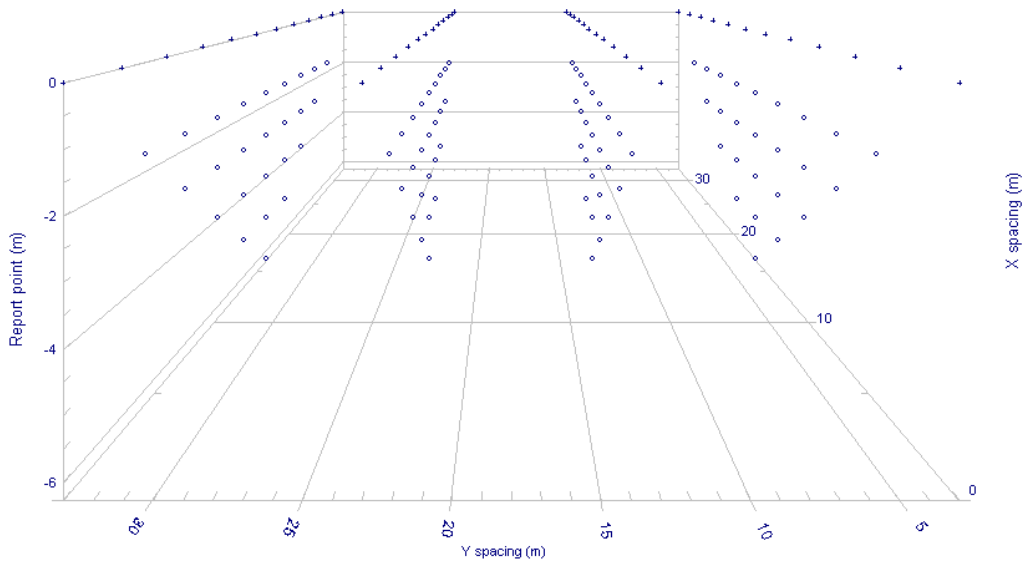
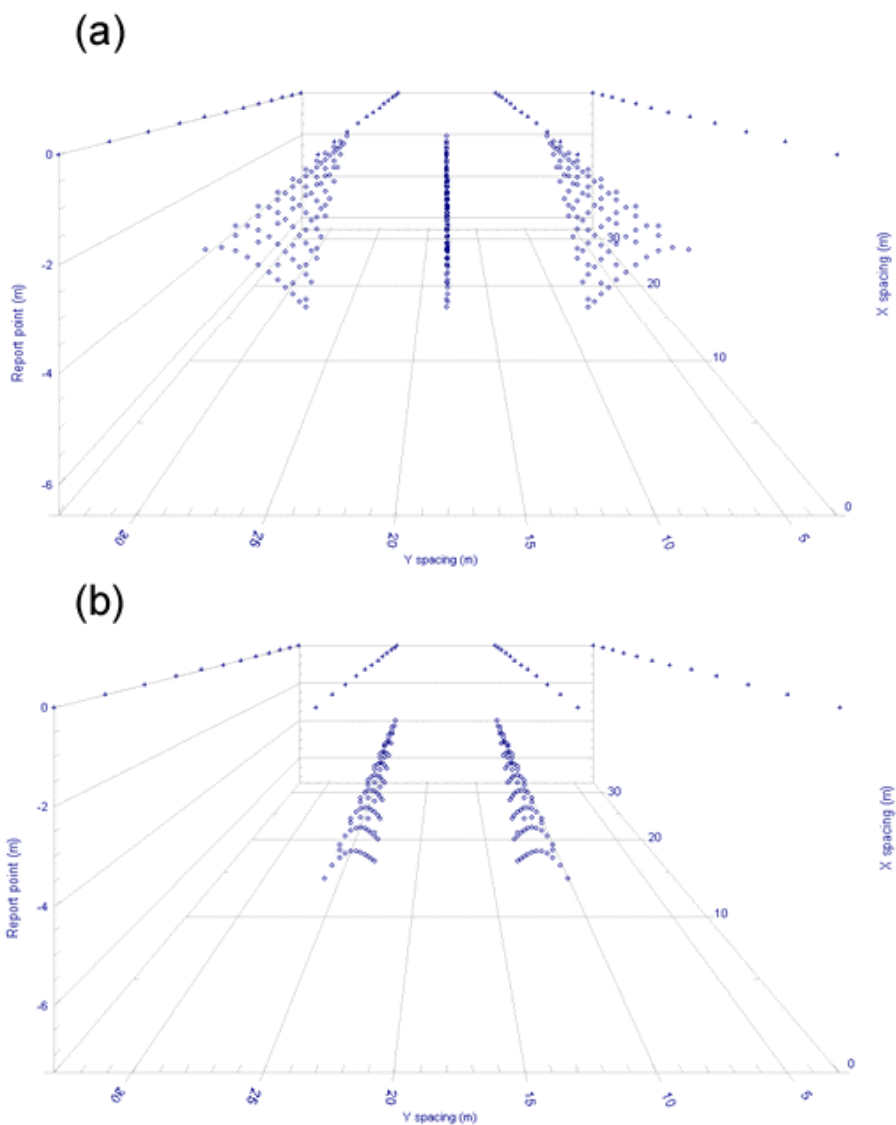


Figura 34. Puntos de atribución obtenidos de los perfiles Wenner-Schlumberger. (Tomado de Electre- Pro, 2007).

En el caso del arreglo *Ecuatorial Paralelo* se obtuvieron un total de seis perfiles, el procedimiento de medición fue el mismo explicado para la rejilla en la sección (VI.1.6), se utilizó el ecuatorial WS y DD para todos los perfiles.

Para mejorar la cobertura del área de estudio se utilizaron todas las líneas del tendido y se combinaron, la Figura 35a muestra los perfiles obtenidos entre las líneas 1 y 2, 2 y 3 y 3 y 4, estos se encuentran a una distancia de 5, 15 y 25 m respectivamente y se midieron con 273 cuadripolos. Para obtener los perfiles a 10 y 20 m que muestra la Figura 35b se utilizaron las líneas 1 y 3 y 2 y 4, con un total de 182 cuadripolos y por último se utilizaron las líneas 1 y 4 para medir el perfil a 15 m, que por la separación de las líneas paralelas alcanza mayor profundidad que el perfil obtenido entre las líneas 2 y 3 y se utilizaron 91 cuadripolos (Figura 35c).



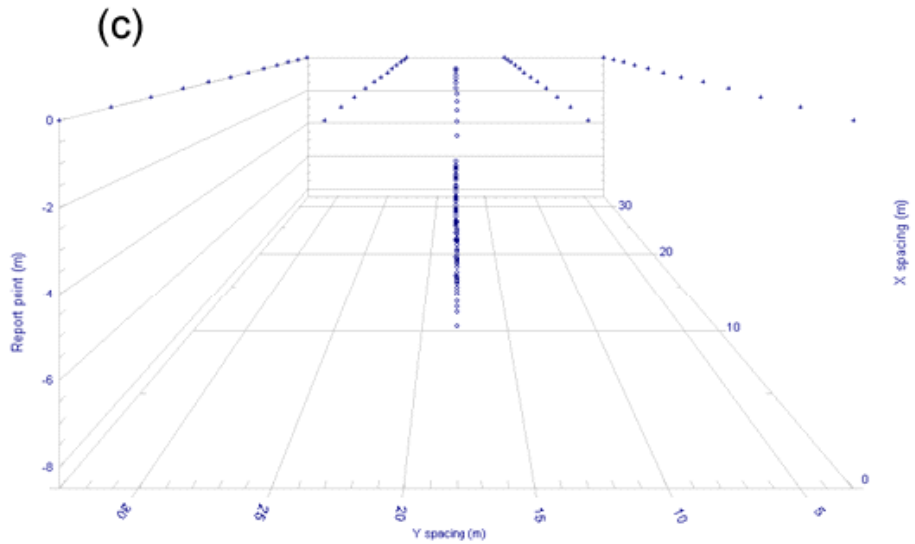


Figura 35. Puntos de atribución obtenidos de los perfiles Ecuatoriales Paralelos. a) Perfiles a 5, 15 y 25 m, b) Perfiles a 10 y 20 m y c) Perfil a 15 m. (Tomado de Electre- Pro, 2007).

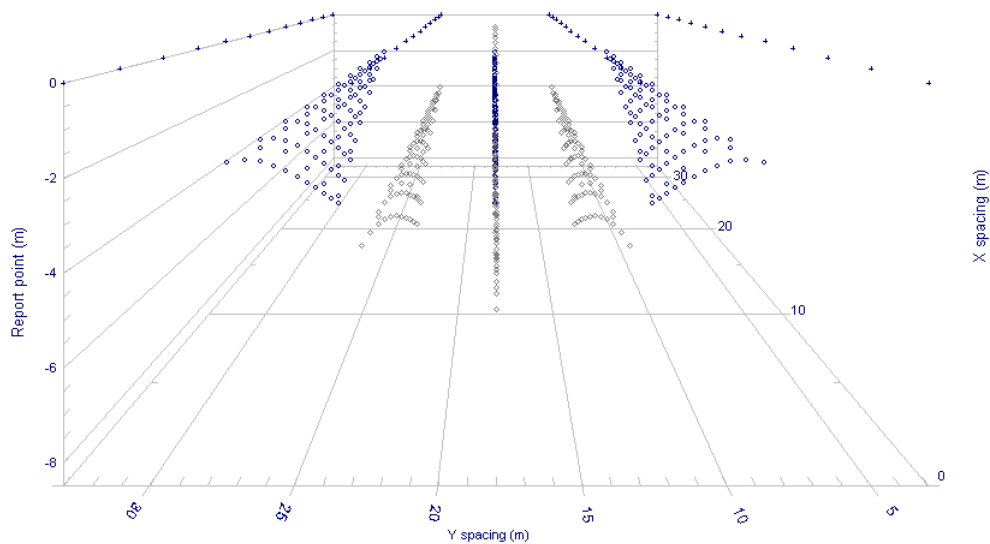


Figura 36. Puntos de atribución obtenidos de todos los Ecuatoriales Paralelos. (Tomado de Electre- Pro, 2007).

VI.2.1 Mínimo Acoplamiento

Por último, se midieron seis perfiles más por Mínimo Acoplamiento, la secuencia tuvo un total de 330 cuadripolos y el procedimiento de medición es el mismo utilizado para el arreglo Dipolo-Dipolo en las esquinas (configuración 2), con la única variación de usar líneas paralelas en lugar de líneas perpendiculares. Los electrodos de corriente permanecen fijos en los extremos de las líneas, el dipolo de potencial es colineal con uno de los electrodos de corriente (Figura 37), desplazándose un electrodo a la vez, el dipolo de potencial tiene una separación constante de 3 m en todas las

mediciones, una vez que el dipolo de potencial llega al extremo de la línea el dipolo de corriente se desplaza al siguiente electrodo y repite el procedimiento con el dipolo de potencial, generando perfiles verticales.

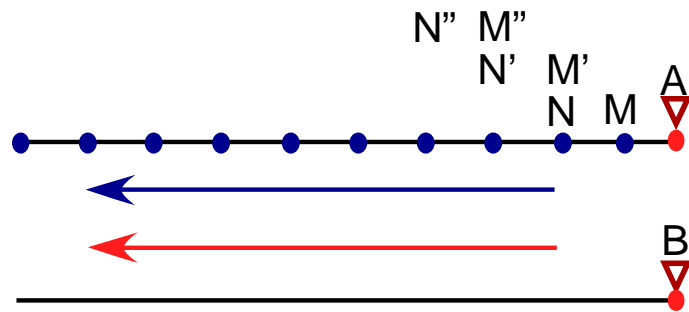


Figura 37. Configuración eléctrica del arreglo Mínimo Acoplamiento.

Se obtuvieron dos perfiles por cada par de líneas paralelas, es decir, al utilizar las líneas 1 y 2, se obtuvieron perfiles a 2.5 y 7.5 m, esto depende de la posición de los dipolos de potencial, si estos son colineales a la línea 1, se obtiene el perfil a 2.5 m y si son colineales a la línea 2, se obtiene el perfil a 7.5 m.

El resto de los perfiles se midieron de manera análoga, entre las líneas 2 y 3 se obtuvieron perfiles a 12.5 y 17.5 m, y por último se utilizaron las líneas 3 y 4 para medir perfiles a 22.5 y 27.5 m.

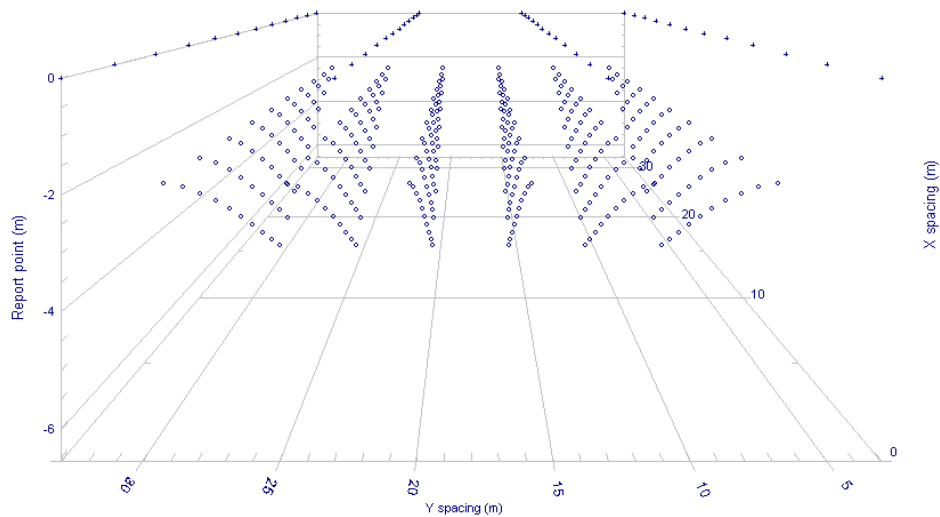


Figura 38. Puntos de atribución obtenidos de los perfiles Mínimo Acoplamiento. (Tomado de Electre- Pro, 2007).

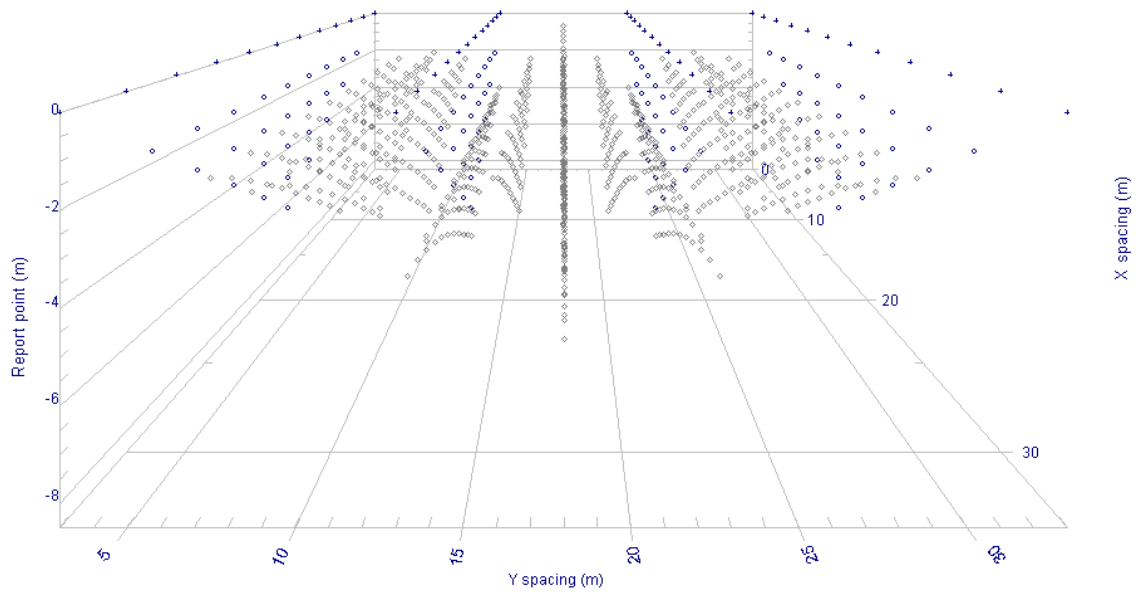


Figura 39. Distribución total de puntos de atribución obtenidos con las líneas paralelas. (Tomado de Electre- Pro, 2007).

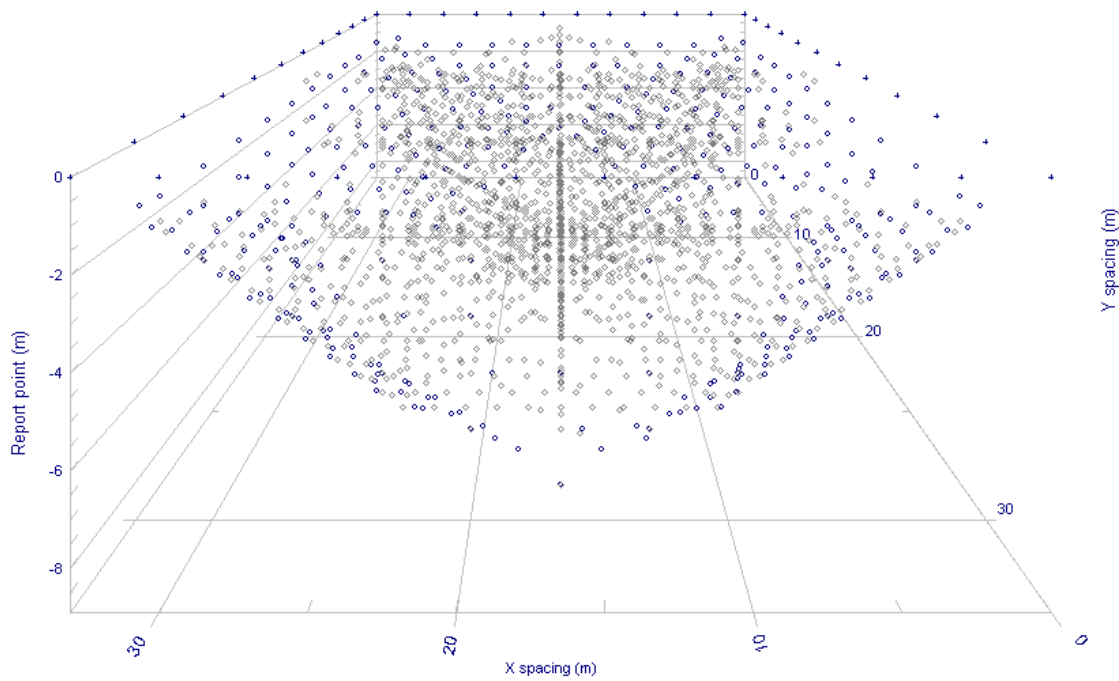


Figura 40. Distribución total de puntos de atribución obtenidos para el Tecpan. (Tomado de Electre- Pro, 2007).

VI.3 Procesamiento de los datos

El Syscal guarda automáticamente en la memoria interna los resultados de cada una de las secuencias realizadas, estos datos se descargaron en la computadora y es posible visualizarlos con el programa Prosys II, diseñado por IRIS INSTRUMENTS, Prosys II es el software de gestión de datos para las unidades tipo Syscal y ELREC.

Los datos obtenidos y desplegados por el Prosys II fueron: el tipo de arreglo, la cantidad de corriente inyectada, la desviación estándar, la resistividad aparente calculada, la diferencia de potencial medida y la posición de los electrodos en cada una de las mediciones.

Con ayuda del Prosys se generó un archivo .txt con todos los datos, esto con la finalidad de poder seleccionarlos y realizar el archivo URF (Universal Resistivity Files) necesario para generar el modelo directo y el modelo de inversión con ayuda del software *EarthImager* 3D (AGI,2008). El ejemplo para crear un archivo URF se encuentra en el Anexo, Archivo de entrada URF.

EarthImager (AGI,2008) es una plataforma de Windows de 32-Bits basada es un programa computacional que interpreta datos de resistividad eléctrica en tres dimensiones (3D), y produce imágenes de resistividad invertidas en secciones 2D y en volumen 3D, revelando la distribución de resistividades reales del subsuelo, de manera tal que es posible definir los objetivos de interés y la geología del subsuelo. *EarthImager*, calcula el modelo directo de resistividades y realiza el proceso de inversión de datos de resistividad.

Se hizo un archivo URF para cada una de las secuencias medidas por el Syscal, además de un archivo general para la rejilla cuadrada y para las líneas paralelas que contenía todas las secuencias utilizadas y mostraba todos los puntos medidos en campo. Esto para cada una de las estructuras.

El URF es el formato necesario para cada uno de los modelos que se desee obtener del software *EarthImager*.

Otro archivo necesario para hacer la inversión en el software es un archivo .txt que contenga 3 columnas, una para las coordenadas en x , otra para las coordenadas en y y la última con la altura de cada electrodo. Esto nos permitirá hacer la corrección topográfica de cada uno de los tendidos. Una vez que se cuenta con todos los archivos es posible empezar la inversión de los datos.

EarthImager te da la posibilidad de elegir y controlar los parámetros con los que el software calculara el modelo directo y el modelo de inversión.

En el procesamiento de los datos de Pahñú se conservó el mismo criterio en la elección de los parámetros para cada uno de los modelos. Para calcular el modelo directo de la Pirámide principal y del Tecpan se seleccionó el Método de Elemento Finito y la solución de la matriz fue con Gradiente Conjugado. El modelo inverso de ambas estructuras se obtuvo con el Método de Suavizado, explicado en la sección (III.4), se eligió un factor de suavidad de 100 y un factor de amortiguamiento de 100.

Los criterios que se escogieron para detener el proceso de inversión de los datos de Pahñú en los modelos de ambas estructuras fueron un máximo de 5 iteraciones y un máximo error RMS de 2%.

Al finalizar el proceso de inversión de los datos se obtuvieron un total de cinco modelos 3D para la pirámide principal y once modelos 3D para el Tecpan

VII. Resultados

VII.1 Pirámide Principal

La Figura 41 muestra los modelos 3D obtenidos para la pirámide principal de cada una de las secuencias utilizadas, los puntos negros en el perímetro de los modelos definen la posición de cada uno de los electrodos. Como se explicó anteriormente cada una de las secuencias con una cantidad de cuadrípolos determinada, estos cuadrípolos representan las mediciones hechas con cada uno de los arreglos, cuanto más información tenga el estudio mejor será la caracterización del área. Cada arreglo mostrado tiene características particulares en cuanto a distribución de puntos de atribución, puede observarse que los arreglos con mayor cantidad de datos medidos como los realizados en las esquinas (Figura 41a) y el arreglo Wenner-Schlumberger tipo "L" (Figura 41b) delimitan mejor las anomalías y nos proporcionan más detalles sobre su ubicación y su tamaño. Por otro lado, los arreglos con menor cantidad de mediciones muestran anomalías de mayor tamaño (Figura 41c y 41d), lo que dificulta la interpretación de estas, para un cubo de 33x33 m como en nuestro caso resultaría insuficiente la información de un solo arreglo.

En todos los modelos se muestran únicamente los altos resistivos ya que se pueden asociar al relleno que se encuentra en la parte norte de la Pirámide principal y que es el objetivo de este estudio, las líneas rojas punteada alrededor de los cubos señalan el perímetro de la pirámide principal dentro del tendido.

Una vez que todas las secuencias fueron unidas en un solo archivo se obtuvo el cubo de resistividades mostrado en la Figura 42, con un total de 1382 cuadrípolos. El cubo de trabajo proporciona detalles que las secuencias por separado no tenían, las secuencias del Ecuatorial Diagonal y el Ecuatorial Paralelo brindaron información muy importante en el centro y en el área más somera de la estructura. En la Figura 42a se puede observar el cubrimiento total de la rejilla cuadrada, con una profundidad estimada de 10 m y una resistividad promedio de 1460 (ohm-m). Según el marco geológico esta resistividad puede ser asociada a la toba de origen volcánico característica de la región.

Los valores mayores a los 2000 ohm-m corresponden al materia de relleno **(A)** que los constructores de la Pirámide probablemente utilizaron para la nivelación del terreno (Figura 42b y 42c), este relleno ocupa gran parte del basamento norte de la pirámide con dimensiones de hasta 15 m en su parte más ancha hacia el lado noroeste y 24 m de largo, tiene una forma irregular y empieza justo por debajo de los cimientos de la pirámide. Otra de las características que se pueden observar en el relleno son los planos de deslizamiento del material que afecta actualmente a la pirámide, en la Figura 43 se señalan estos planos con flechas blancas, provocados por el escurrimiento lateral en el terreno, como consecuencia toda la parte norte de la pirámide podría colapsar, situación que preocupa a los arqueólogos y dificulta la conservación de la estructura.

Se pueden observar también tres anomalías más al sureste que podrían ser cavidades rellenas dentro de la toba (Figura 42b y 42c), ya sea artificial o naturalmente, no es posible saber su

contenido o si sean de interés arqueológico, la anomalía **(B)** se encuentra a 1 m de profundidad, tiene una forma tubular y alcanza una profundidad de aproximadamente 3 m, la anomalía **(C)** es de mayor tamaño, tiene forma circular en la parte más somera de 6 m de diámetro y 5 m de altura, pierde volumen a profundidad y se orienta al oeste. La anomalía **(D)** es la más pequeña en el lado sur de la pirámide, de aproximadamente 3 m de ancho y se encuentra a 1 m de profundidad.

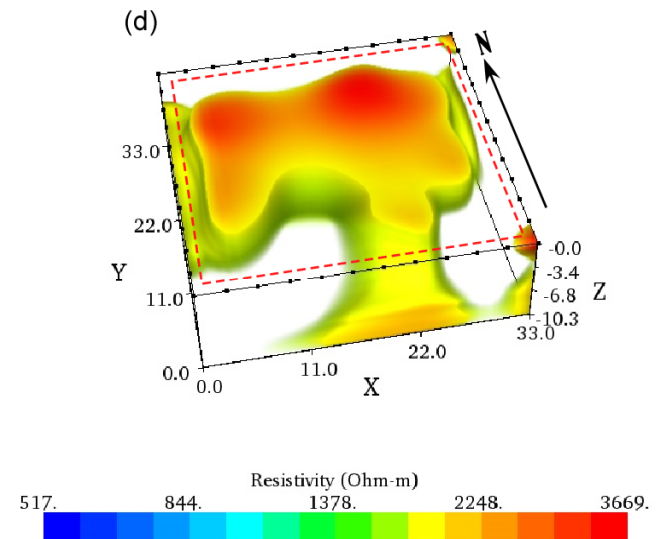
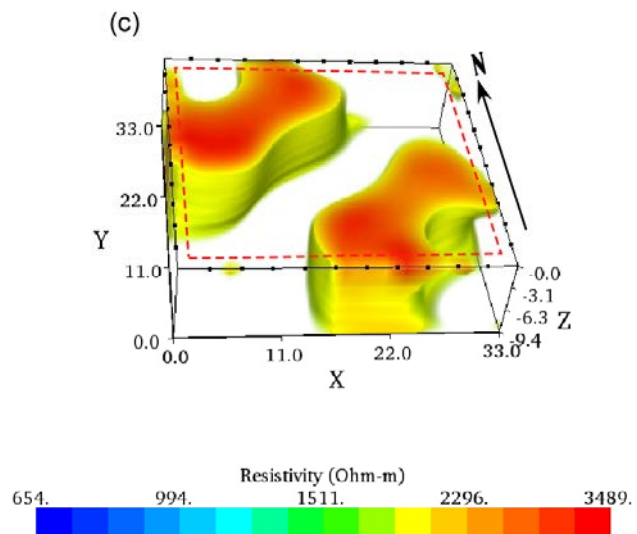
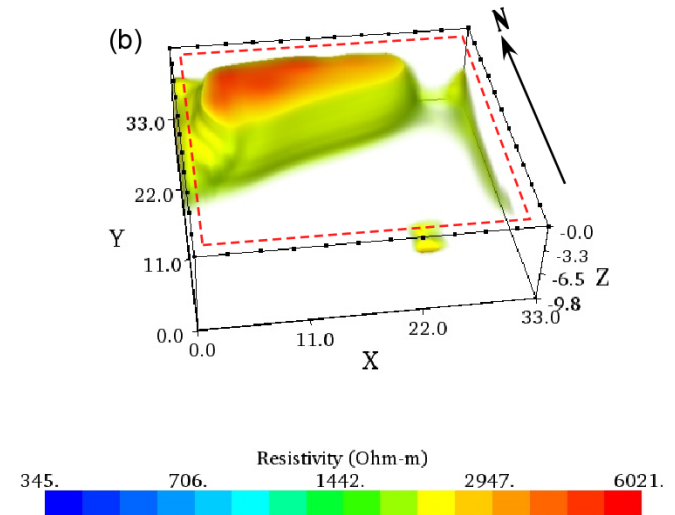
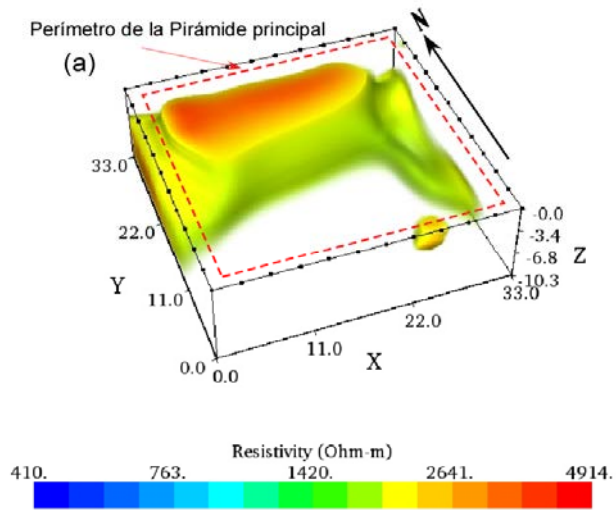


Figura 41. Anomalías de alta resistividad (>200 ohm-m). (a) Arreglos en las esquinas, (b) Arreglo Wenner-Schlumberger tipo "L", (c) Arreglo Ecuatorial Diagonal y (d) Arreglo Ecuatorial Paralelo.

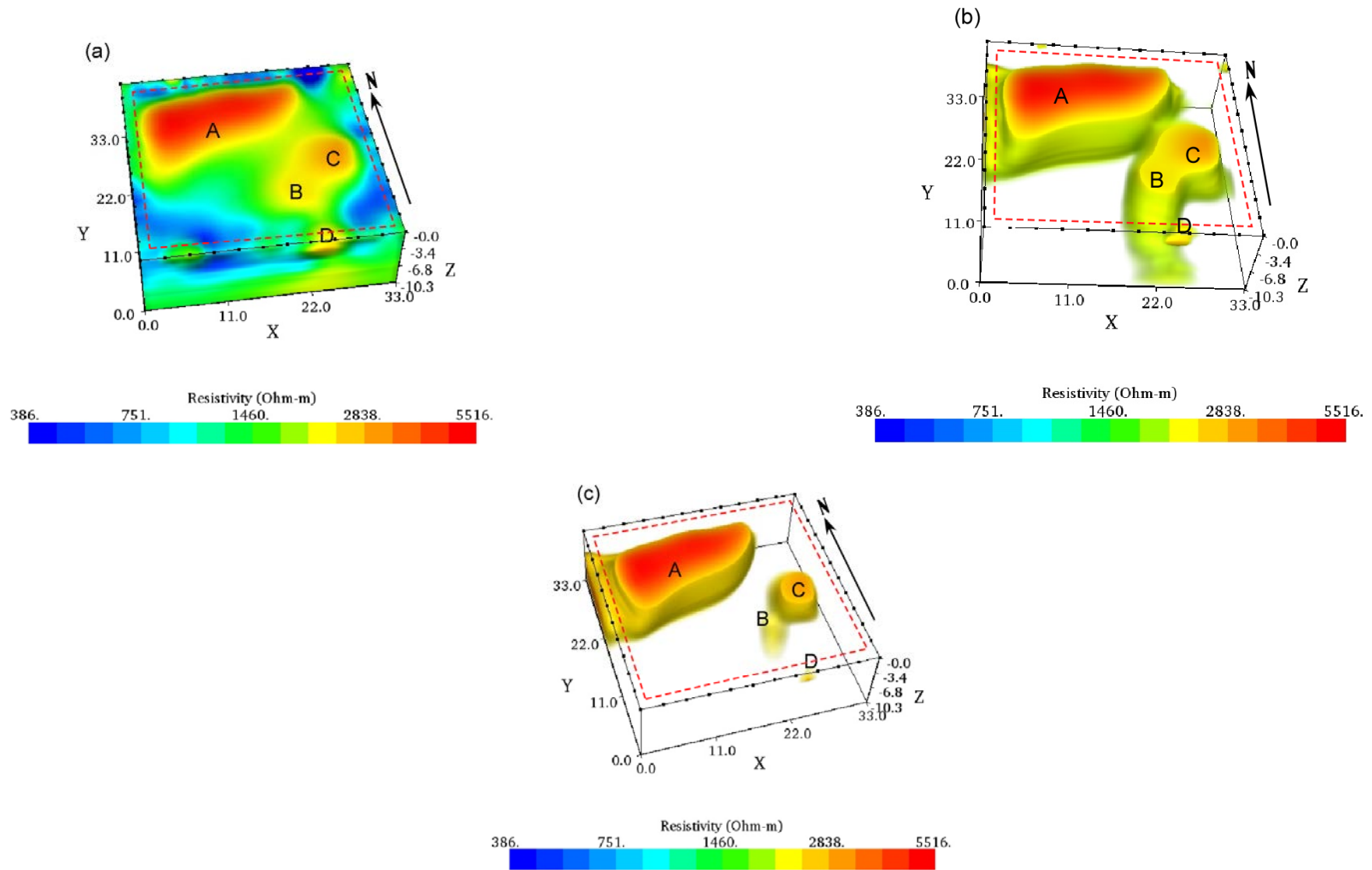


Figura 42. (a) Cubo de resistividades de la Pirámide Principal. Las letras indican las anomalías vistas desde arriba, (b y c) Anomalías de interés encontradas.

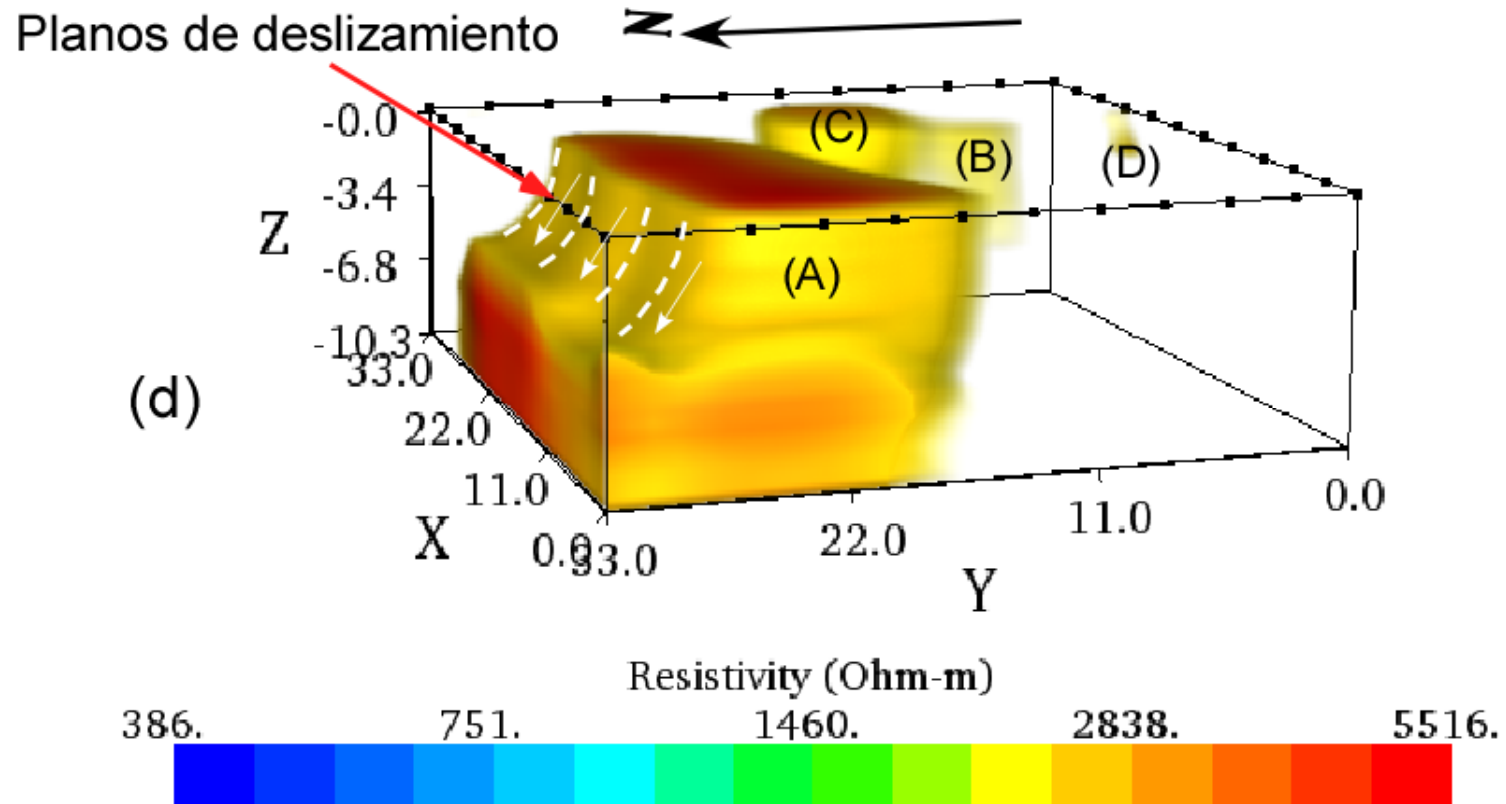


Figura 43. Planos de deslizamiento observados en el material de relleno de la pirámide principal (Argote, 2011).

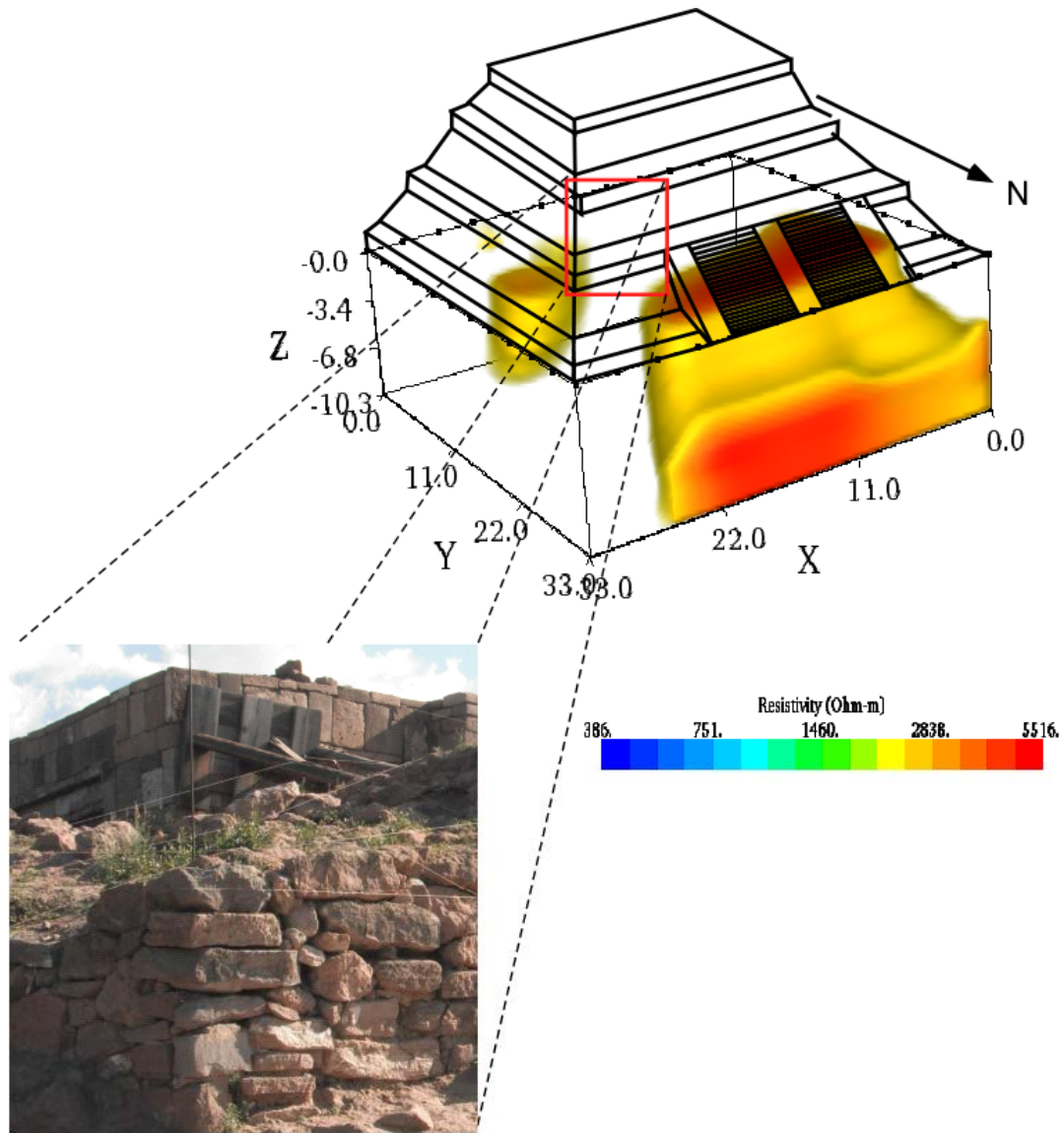


Figura 44. Croquis de la posición de las anomalías bajo los cimientos de la Pirámide Principal y su afectación en la pared norte.

La Figura 44 muestra un croquis de la posición de las anomalías por debajo de la pirámide principal, así como los efectos que el desplazamiento de este material tiene directamente en la pared norte. Se ha tenido que apuntalar la estructura para evitar el colapso.

Los resultados obtenidos de la pirámide principal no muestran anomalías de interés en el centro y en las esquinas de la estructura, anomalías que podrían ser relacionadas con ofrendas fundacionales de los constructores, esto es en parte por la separación electródica utilizada en el estudio y por la distribución de puntos de atribución que estos midieron, los arreglos utilizados en las esquinas y el arreglo Wenner-Schlumberger tipo "L" proporcionaron planos inclinados hacia el centro y a profundidad, con muy poca información somera, los arreglos ecuatoriales diagonales y paralelos proporcionaron perfiles en el centro complementando con pocos puntos de medición en el área más somera de la estructura, provocando que en las esquinas del cubo se generaran "*puntos ciegos*" en los que no tenemos mediciones. Además, la separación electródica de 3 m solo nos permitiría ver anomalías mayores a 1.5 m, si existen ofrendas menores a los 1.5 m el estudio nos la revelaría.

VII.2 Tecpan

Para el Tecpan también se obtuvieron los resultados por separado, y los datos se caracterizaron por tener un nivel bajo de ruido, los puntos negros en las figuras representan la posición de cada uno de los electrodos en el tendido, además, todos los puntos están corregidos por efectos de topografía, en la Figura 45 se muestran las cuatro secuencias realizadas con la rejilla cuadrada, se utilizó la misma metodología que en la pirámide principal, el Tecpan quedó situada en el centro de la rejilla de 33x33 m (líneas rojas punteadas), con la finalidad de observar si había anomalías de interés en los alrededores de la estructura ya que es parte importante de la exploración arqueológica que se está llevando a cabo actualmente en Pahñú.

En los cuatro modelos se muestran los altos resistivos y los bajos resistivos, los valores varían para cada modelo, la Figura 45a corresponde a los arreglos realizados en las esquinas, la Figura 45b al arreglo Wenner-Schlumberger tipo "L" y las Figuras 45c y 45d a los arreglos Ecuatoriales diagonales y paralelos respectivamente, en general siguen la misma tendencia, se puede observar que los cuatro arreglos muestran anomalías de diferentes dimensiones y de forma irregular en el perímetro de la rejilla debido a la cantidad de información con la que cuenta cada una de las secuencias. El único arreglo que mostró una anomalía (**A**) en el centro del arreglo donde se encuentra el Tecpan, con un valor de resistividad menor a los 500 (ohm-m) fue el arreglo Ecuatorial Paralelo (Figura 45d) pero no es posible asegurar que sea de interés arqueológico.

En la Figura 46a se observa el cubo de resistividades completo con un total de 1382 cuadripolos, en este caso se alcanzó una profundidad estimada de 12 m, la resistividad media fue de 1036 (ohm-m) y corresponde con el material geológico de la región. Los altos resistivos no se encuentran bien delimitados y podrían corresponder a material de relleno, la única anomalía que se presenta en el Tecpan (**A**) se muestran en la Figura 46b.

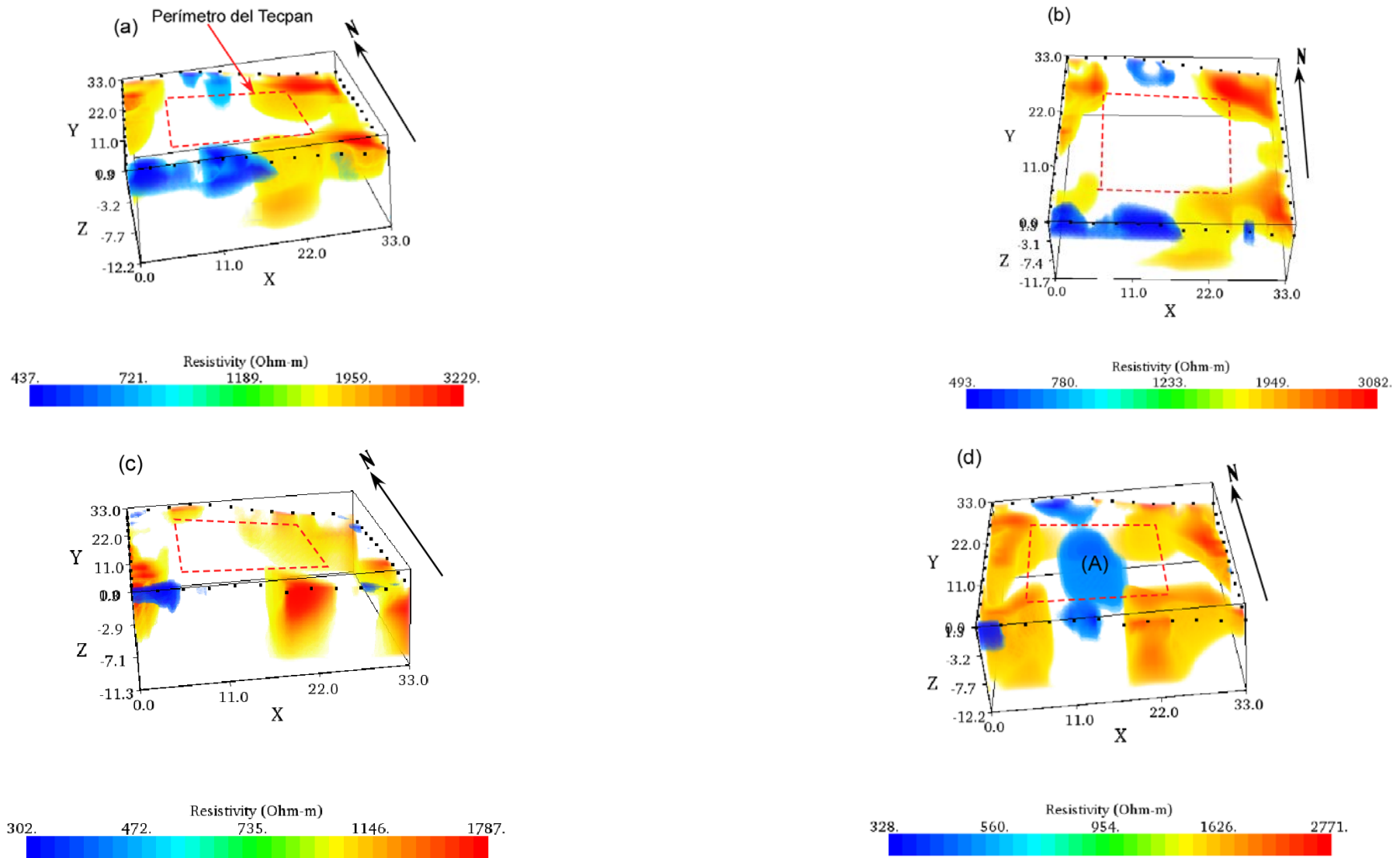


Figura 45. Anomalías encontradas con la rejilla cuadrada en el Tecpan. (a) Arreglos en las esquinas, (b) Arreglo Wenner-Schlumberger tipo "L", (c) Arreglo Ecuatorial Diagonal y (d) Arreglo Ecuatorial paralelo.

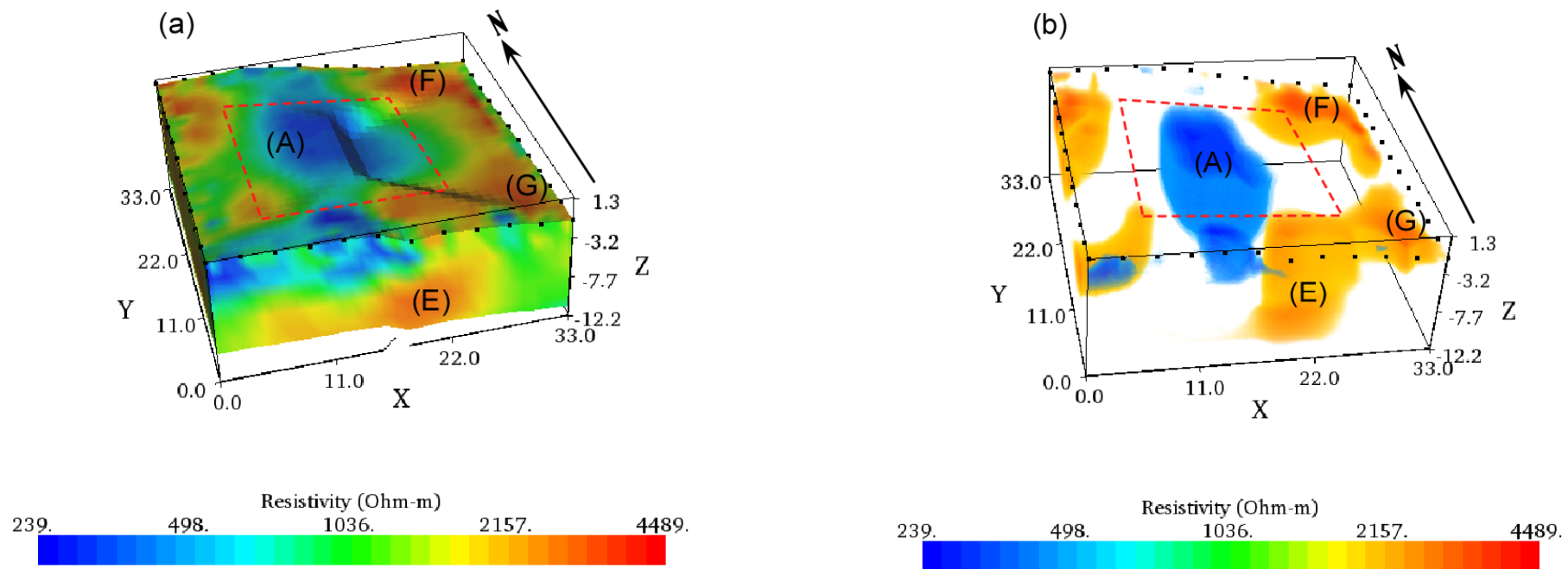


Figura 46. (a) Cubo de resistividades obtenido de la rejilla cuadrada en el Tecpan, (b) Anomalías encontradas, las letras indican solamente las anomalías coincidentes con el arreglo de líneas paralelas.

Se realizó el mismo procedimiento con el arreglo de las líneas paralelas que cubrían un área de 33x30 m y que se midió también en el Tecpan, esta vez los electrodos pudieron colocarse sobre la estructura, lo que nos brinda mayor información. Se presentan por separado cada una de las secuencias (Figura 47 y 48), las figuras mostraron que no existían anomalías en el Tecpan que pudiera relacionarse con cavidades rellenas dentro del material geológico (Toba) que pudieran ser de interés arqueológicos, sin embargo se siguen observando altos resistivos en el perímetro del arreglo, el arreglo Ecuatorial paralelo entre las líneas 1 y 4 (sección VI.2) contiene muy poca información para mostrar anomalías consistentes. Sin embargo, una vez que toda la información fue unida en un solo cubo de resistividades (Figura 49a), se obtuvo una profundidad estimada de 11 m y una resistividad promedio fue de 759 (ohm-m) asociada a la toba, como en el caso de cubo de resistividades obtenidos para la pirámide principal y el Tecpan, este valor se encuentra en el rango de resistividades asociado para el material volcánico que predomina en el área de estudio.

Al analizar los datos obtenidos del arreglo de líneas paralelas se obtuvo mayor detalle y delimitación de las anomalías que son consistentes con algunas anomalías obtenidas por la rejilla cuadrada (**E, F, G**) mayores de 2000 (ohm-m) (Figura 49b y 49c) asociadas con el material de relleno, el Tecpan es de menores dimensiones que la pirámide principal, por lo tanto es posible que sus constructores necesitaran una menor cantidad de material de relleno para nivelar el terreno, el arreglo de líneas paralelas reveló anomalías por debajo del Tecpan con altas resistividades (**B** y **C**) además de la anomalía (**A**) que ya se había observado anteriormente.

Por último, se realizó un modelo con la unión de todas las secuencias medidas en el Tecpan, tanto la rejilla cuadrada como las líneas paralelas, con un total de 2358 cuadripolos se tiene suficiente información para delimitar las anomalías que podían ser de interés para los arqueólogos.

Se obtuvo un cubo de resistividades (Figura 50a) con una profundidad estimada de 11 m, la resistividad promedio fue de 978 (ohm-m) que al igual que los modelos anteriores se puede asociar a la señal resistiva de una toba volcánica. De las anomalías obtenidas con los modelos anteriores y que continúan consistentes y mejor delimitadas en el modelo final obtenido en el Tecpan son: (**B, D, E** y **G**) asociadas con posibles cavidades que pudieran ser de interés arqueológico (Figura 50b) y con valores de resistividad mayores a los 4000 (ohm-m), la anomalía (**B**) se encuentra al norte, tiene forma alargada de aproximadamente 7 m de largo y 1 m de profundidad de la superficie del Tecpan, la anomalía (**D**) se encuentra al suroeste cerca de la escalinata del Tecpan, tienen una forma alargada, una longitud de 6 m y se encuentra a una profundidad de 6 m. La anomalía (**E**) es la de mayor tamaño, se encuentra al sur del Tecpan tiene una forma elipsoidal con 10 m de largo, 7 de ancho y alcanza una profundidad de 7 m, comenzando en la superficie del Tecpan. Por último la anomalía (**G**), tiene 2 m de ancho, 3.5 de largo y principia en la superficie, hacia el SE del Tecpan.

Dentro de la superficie que abarca el Tecpan se encontraron pocos valores de resistividades altos que en este caso serían asociados a cavidades de interés arqueológico, la anomalía que se encontró bajo la superficie del Tecpan (**A**) se muestra en la Figura (50c), esta anomalía tiene un rango de valores entre los 300 y 96 (ohm-m), alcanza una profundidad de aproximadamente 2 m y comienza justo en la superficie del Tecpan, durante varios meses se ha estado explorando arqueológicamente el contenido de algunas áreas del interior del Tecpan, el estudio se realizó a finales de la temporada de lluvia. Los valores obtenidos de esta anomalía son asociados al mayor contenido de humedad que tenía el relleno

artificial colocado en el segundo momento constructivo de la estructura. Presenta una geometría regular de aproximadamente 12x15 m, que también puede ser explicada por las banquetas (sección II.3) que se encuentran en el interior de la estructura y el relleno de cada una colocado previo al estudio.

La Figura 51 muestra un croquis de las dimensiones del Tecpan y de la posición de las anomalías encontradas con el modelo final de resistividades, las líneas rojas punteadas indican la distribución de las dos líneas de electrodos que se colocaron por encima de la estructura.

Cabe destacar que los modelos finales obtenidos fueron resultado de varios procesos de inversión en el programa *EarthImager*, modificando algunos parámetros iniciales de la inversión para observar las diferencias y elegir el mejor modelo, los modelos obtenidos fueron muy similares, en algunos podían presentarse mayor cantidad de anomalías, pero en este estudio solo se están presentando las anomalías consistentes en todos los modelos, y las de mayor relevancia.

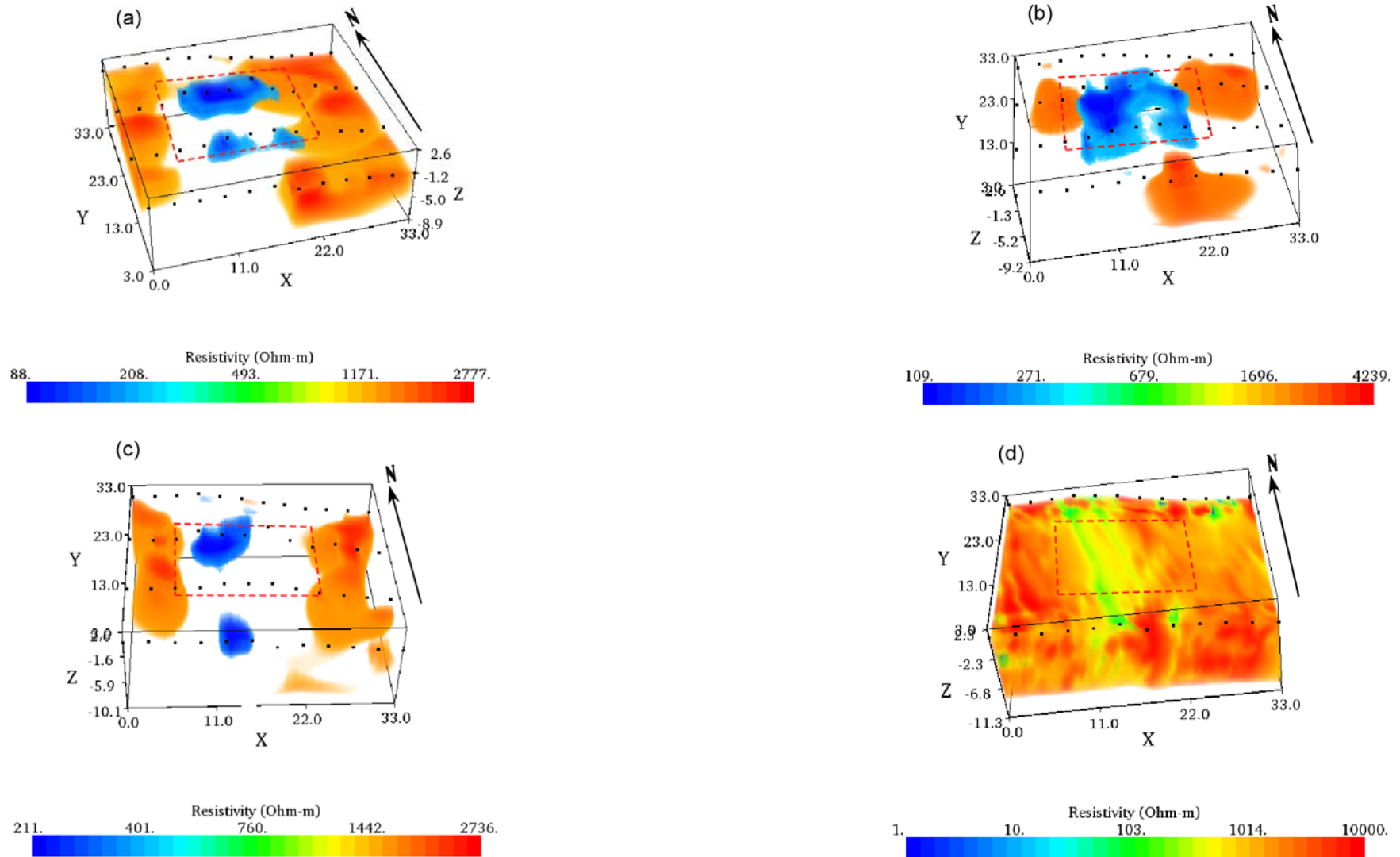


Figura 47. Anomalías encontradas con el arreglo de líneas paralelas en el Tecpan. (a) Arreglo Wenner-Schlumberger, (b) Arreglo Ecuatorial Paralelo, perfiles a 5, 15 y 25 m, (c) Arreglo Ecuatorial Paralelo, perfiles a 10 y 20 m y (d) Arreglo Ecuatorial Paralelo, perfil a 15 m.

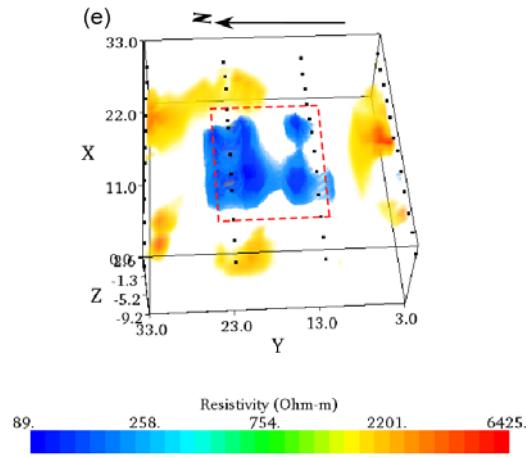


Figura 48. Anomalías encontradas del arreglo Mínimo Acoplamiento.

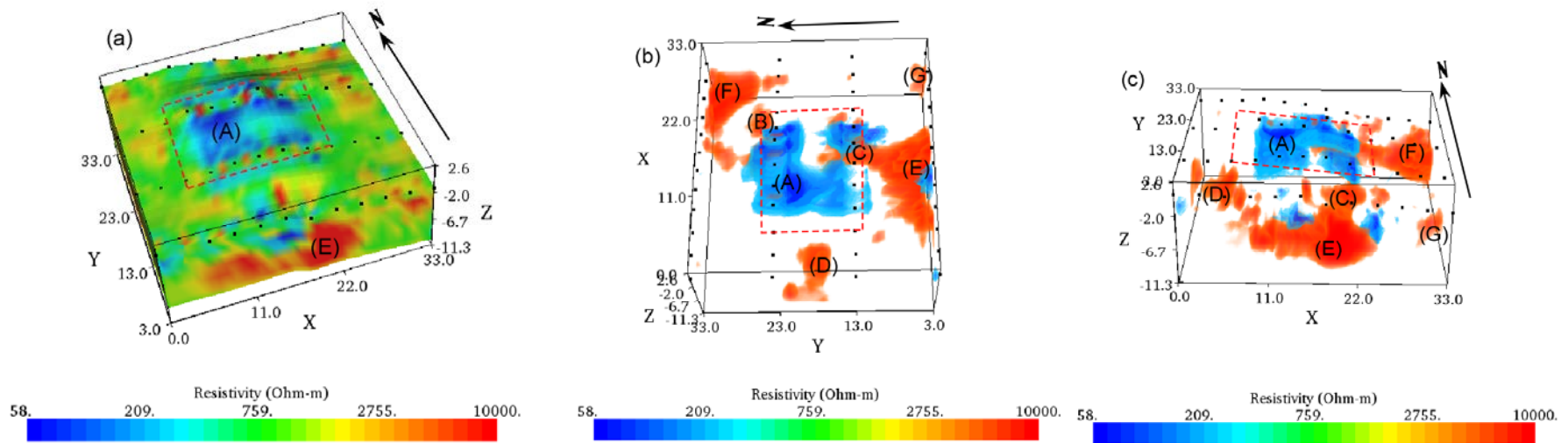


Figura 49. (a) Cubo total de resistividades obtenido con las líneas paralelas en el Tecpan, (b y c) Anomalías encontradas e indicadas con letras.

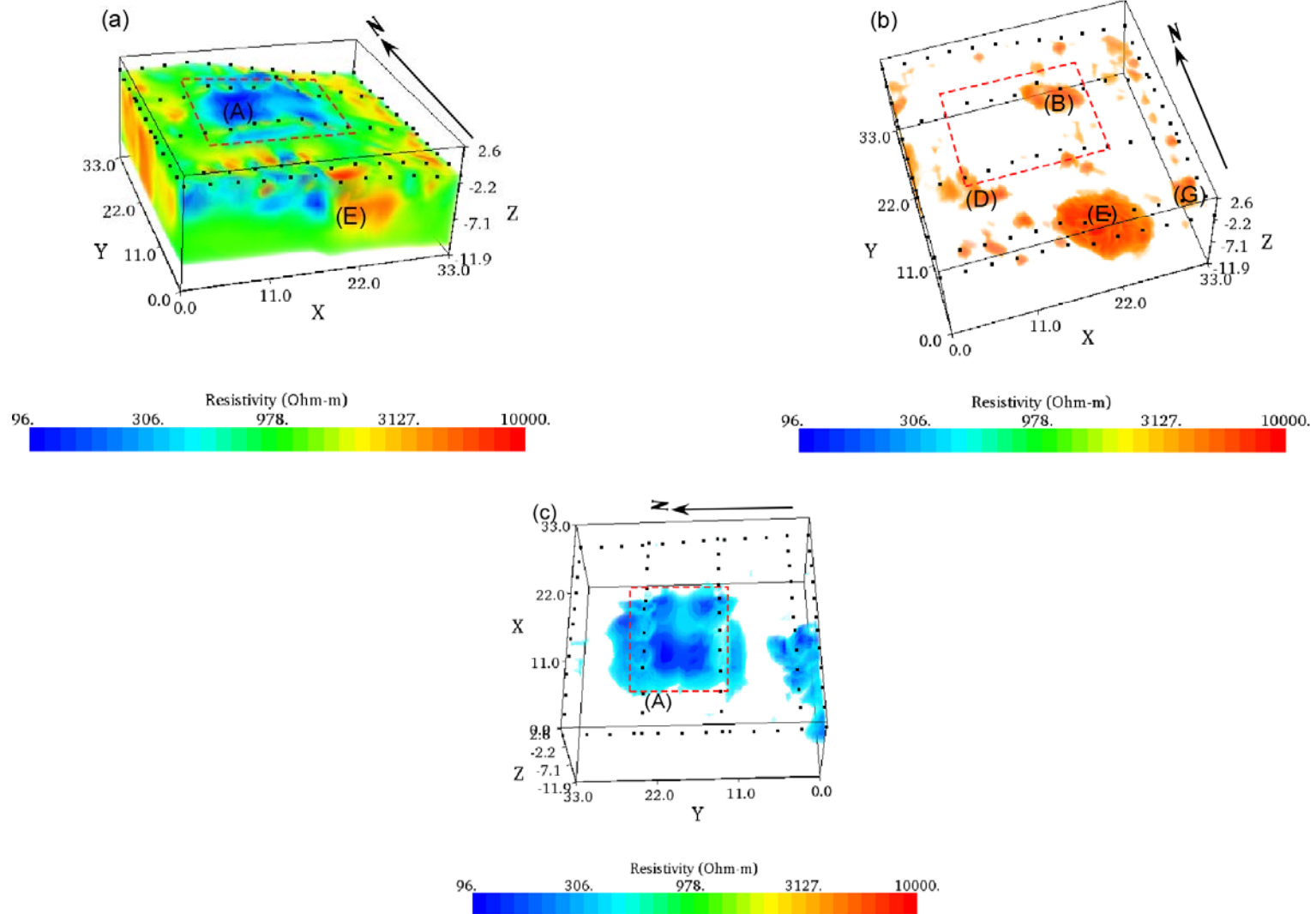


Figura 50. (a) Distribución total de resistividades obtenido con la rejilla cuadrada y las líneas paralelas, (b) Anomalías con valores de resistividad mayores a los 4000 (ohm-m), las letras indican las anomalías consistentes con los modelos anteriores y (c) Anomalía de baja resistividad obtenida en el Teqan.

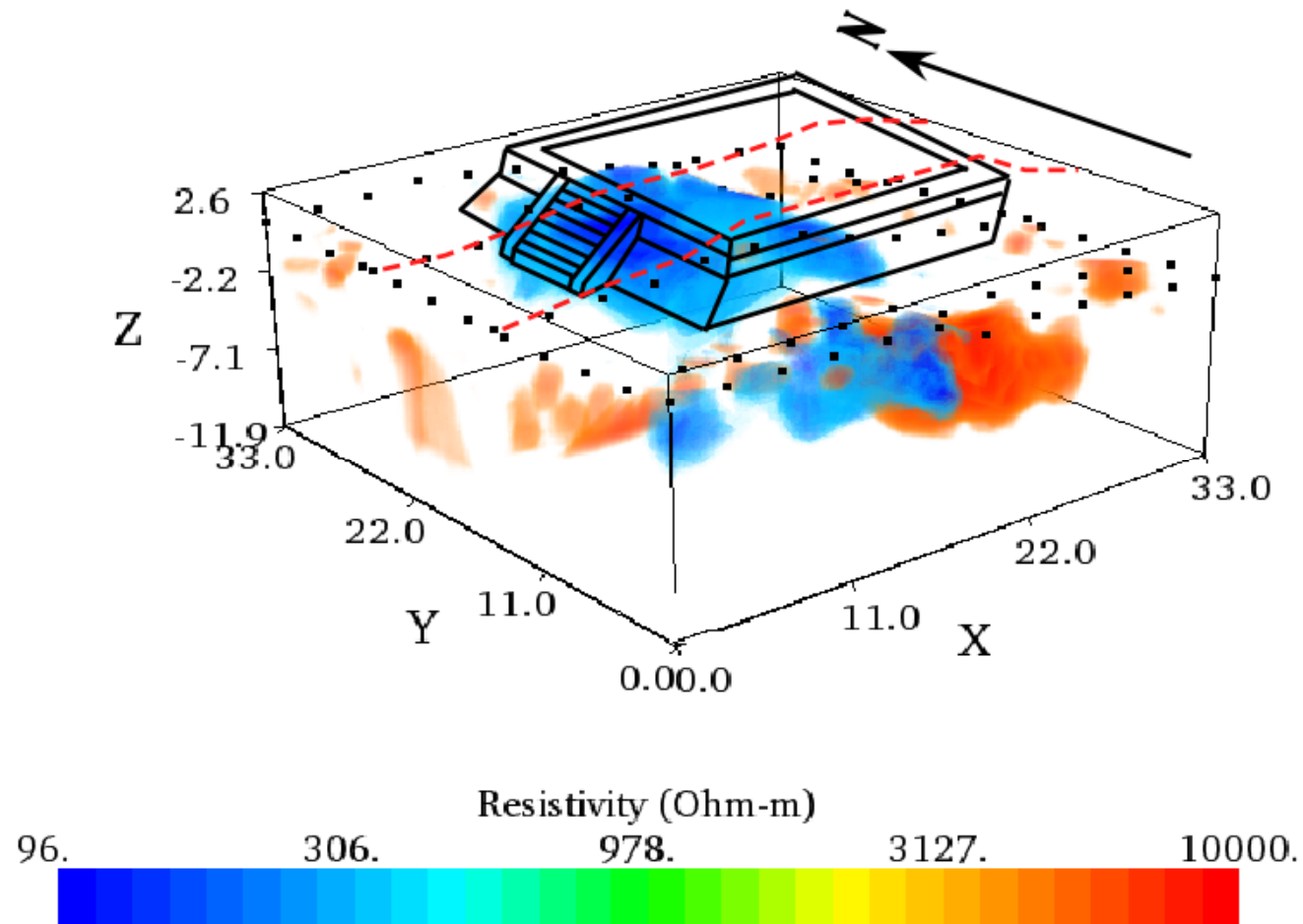


Figura 51. Croquis de la posición de las anomalías bajo la superficie del Teapan

VIII. Conclusiones

Los arreglos utilizados fueron de gran utilidad para obtener la caracterización del subsuelo por debajo de ambas estructuras, las técnicas en 3D utilizadas como el arreglo Wenner-Schlumberger tipo "L" y los arreglos dipolares en las esquinas se encuentran muy bien distribuidos al centro y a profundidad, esto es de gran importancia en zonas o estructuras en las que los electrodos no pueden emplazarse por encima del área de interés, la cantidad de mediciones hechas fueron otro factor importante para delimitar las anomalías. Los arreglos Ecuatoriales complementaron esta información con perfiles en el centro y a pocos metros de profundidad, en su conjunto la suma de éstas técnicas dieron muy buenos resultados. La distribución en 3D permite tener en gran medida buena resolución lateral y vertical, lo que se demuestra al separar cada uno de los modelos por secuencias.

En el caso de la pirámide principal se pudo observar la forma, la posición y las dimensiones que el relleno en el lado norte está afectando seriamente a la estructura, permitió además observar los planos por los que este relleno se está desplazando y que en un futuro podría afectar en mayor medida a la pirámide. Se observaron también anomalías que podrían ser de interés para los arqueólogos y si ellos lo consideran necesario valdría la pena excavar con el mínimo de afectación, objetivo importante al aplicar este tipo de estudios por tratarse de una zona de gran importancia arqueológica.

En el caso del Tecpan fue posible ver anomalías consistentes bien delimitadas en los alrededores y por debajo de la estructura que sugieren cavidades rellenas que podrían ser de interés arqueológico, además, otro de los aspectos importantes es que se pudo distinguir el relleno más reciente colocado por los arqueólogos meses antes a la realización del estudio.

Se pudo comprobar de acuerdo a la hidrología del lugar y a los valores de resistividad obtenidos que se trata de una zona muy árida, la casi nula formación de suelo y la poca porosidad del material volcánico que predomina en el área acentúan la erosión y el deslizamiento del relleno de la pirámide principal por encontrarse en la parte más alta de una meseta. Se recomienda ampliamente reforzar este relleno para detener el deterioro de la estructura.

El estudio realizado en el sitio arqueológico de Pahñú dio resultados satisfactorios, pero en muchas ocasiones los objetivos de interés arqueológico se encuentran en el área más somera de la zona de estudio o son de pequeñas dimensiones, es por esto que en futuros estudios en esta área o en otro sitio en el que se presenten estas condiciones es recomendable disminuir la separación electródica lo que nos proporcionaría puntos de atribución más someros.

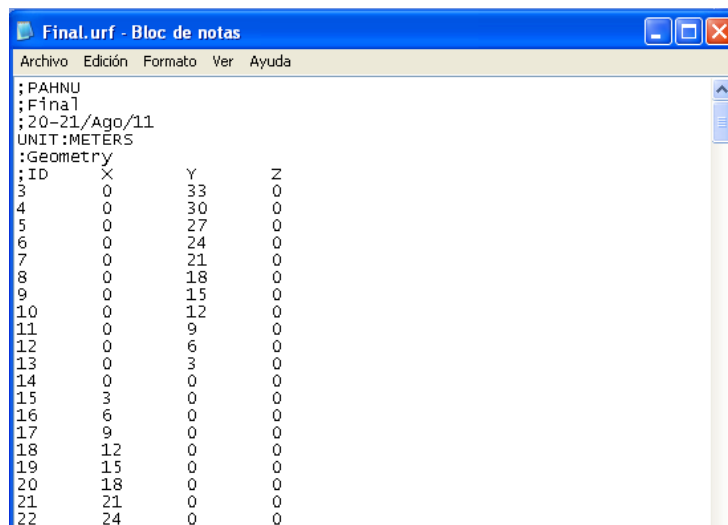
Las técnicas utilizadas son de gran importancia para la conservación de zonas arqueológicas, por proporcionar herramientas que guíen la exploración y así afectar en lo más mínimo las estructuras.

Anexo

Archivo de entrada URF

El archivo URF de entrada consta de dos partes:

1. Geometría: La primera parte contiene tres renglones de comentarios, están indicados con punto y coma (;), está sujeto a consideración del autor el contenido de esos comentarios (lugar del levantamiento en campo, tipo de arreglo utilizado, número de cuadripolos utilizados, etc., etc.). Un renglón con las unidades en las que se está midiendo, otro renglón para la leyenda "Geometry" y un último renglón para el número de electrodo y las coordenadas x, y y z de cada electrodo en el tendido, lo siguiente son columnas con el contenido de ID, X, Y y Z (Figura 1a).
2. Mediciones: La segunda parte la forman un renglón con la leyenda "Measurements", otro más para la posición de los dipolos de corriente y de potencial, voltaje/corriente, la cantidad de corriente en cada medición y el porcentaje de error para cada medida, lo siguiente son las columnas con el contenido del renglón anterior (Figura 1b).



```
Final.urf - Bloc de notas
Archivo  Edición  Formato  Ver  Ayuda
;PAHNU
;Final
;20-21/Ago/11
UNIT:METERS
:Geometry
;ID      X      Y      Z
3        0      33     0
4        0      30     0
5        0      27     0
6        0      24     0
7        0      21     0
8        0      18     0
9        0      15     0
10       0      12     0
11       0      9      0
12       0      6      0
13       0      3      0
14       0      0      0
15       3      0      0
16       6      0      0
17       9      0      0
18      12      0      0
19      15      0      0
20      18      0      0
21      21      0      0
22      24      0      0
```

(a)

Final.urf - Bloc de notas

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda			
45	6	33	0				
46	3	33	0				
:Measurements							
;A	B	M	N	V/I(ohm)	I(mA)	Error(%)	
3	6	4	5	68.53678994	2.623	0	
3	8	5	6	33.48591788	5.894	0.1	
3	10	6	7	15.86680328	12.688	0	
3	12	7	8	11.71825259	17.214	0	
3	14	8	9	8.408058669	23.999	0	
3	16	9	10	4.865848947	41.416	0	
3	18	10	11	2.881301046	69.79	0	
3	20	11	12	2.396164266	83.791	0	
3	22	12	13	1.411231301	142.922	0	
3	24	13	14	1.027619827	138.053	0.1	
4	7	5	6	64.50237834	2.733	0.1	
4	9	6	8	60.14636608	2.972	0	
4	11	7	9	39.82178631	4.792	0.1	
4	13	8	10	20.78063119	9.696	0	
4	15	9	11	11.93144876	16.98	0	
4	17	10	12	8.330083048	24.203	0	
4	19	11	13	5.363512902	37.553	0	
4	21	12	14	3.335550211	60.295	0	
4	23	13	15	2.137433473	94.322	0	

(b)

Figura 1. Formato URF, a) Geometría y b) Mediciones.

Bibliografía

- AGI, 2008. Instruction Manual for EarthImager 3D version 1.5.0 Resistivity Inversion Software. Austin, Texas, 97 p.
- Argote D., Tejero A., Chávez R., López P. y Bravo R. 2009. 3D modelling of magnetic data from an archaeological site north-western Tlaxcala state, Mexico. *Journal of Archaeological Science* (36), 1661-1671.
- Argote D., Tejero A., Cifuentes G. y Chávez R. 2011. Levantamiento de datos Eléctricos en la Pirámide Principal del sitio Arqueológico el Pahñú mediante el método de Tomografía Eléctrica. Informe final.
- Barker R., y Moore J. 1998. The application of time-lapse electrical tomography in groundwater studies. University of Birmingham, Birmingham, U. K. SEG. The Leading Edge.
- Chávez G., 2011. Modelación 3D de datos de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) con arreglo tipo "L". Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra. UNAM. 97 p.
- Chávez R., Tejero A., Argote D. y Cámara E. 2010. Geophysical Study of a Pre-Hispanic Lakeshore Settlement, Chiconahuapan Lake, Mexico. *Archaeological Prospection* (17), 1-13.
- Chávez R., Tejero A., Delgado C., Cifuentes G. y Hernández E. 2011. Poster. L and Corner arrays for 3D electric resistivity tomography: An alternative for geophysical surveys in urban zones. American Geophysical Union.
- Cifuentes, G., Tejero A, Chávez R., Argote D. e Iriarte L. 2011. Poster. Implementación de un estudio de tomografía eléctrica de resistividad 3D en la zona arqueológica de Pahñú. Unión Geofísica Mexicana.
- Daily W., y Ramírez A. 2004. Electrical resistance tomography. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, U. S. The Leading Edge.
- De la Torre González, B., 2010. Definición de zonas de fracturamiento empleando Tomografía de resistividad eléctrica 3D. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. UNAM. 98 p.
- Edwards L. S., 1977. A modified Pseudosection for Resistivity and IP. *Geophysics* 42 (5), 1020-1036.
- Google. Google Earth, 2011. <http://mexico.pueblosamerica.com/i/tecozautla/>
- Instituto Nacional de Antropología e Historia. <http://www.inah.gob.mx/index.php/iquieres-somos>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2011. <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/hgo/geolo.cfm?c=444&e=23>
- IRIS INSTRUMENTS, 2005. Electre Pro User Manual. Francia, 45 p.
- IRIS INSTRUMENTS, 2005. User's Manual for SYSCAL Pro Standard & Switch (48-72 or 96) Version. 10 channels Resistivity-meter for Resistivity and IP measurements. Francia, 85 p.
- Loke, M. H., 2000. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys, 68 p.

- López Aguilar F. y, Fournier P. 2009. Espacio, tiempo y asentamientos en el Valle del Mezquital. Cuicuilco 16 (47), 113-148.
- Menke, W. 1984. Geophysical data analysis: Discrete Inverse Theory. Academic Press, Inc. 149 p.
- Orellana, E., 1982. Prospección geoelectrica en corriente continua. Paraninfo, Madrid, 523 p.
- Secretaria de Energía, Minas e Industria Paraestatal. 1992. Monografías Geológico-Mineras del Estado de Hidalgo. Subsecretaria de Minas e Industria Básica.
- Servicio Geológico Mexicano, 2010. Carta Geológico-Minera Pachuca. F14-11 Escala 1:250000.
SGM.http://portaljsp.sgm.gob.mx/cartas_impresas/productos/cartas/cartas250/geologia/88_F14-11GM.html
- Tejero A., Delgado C., López A., y Chávez R. 2011. L-and CORNER-arrays for 3D Electric Resistivity Tomography: An alternative for geophysical surveys in urban zones. Journal Enviromental and Earth Sciences. Submitted.
- Zúñiga Lara, R. 2010. Detección de zonas de riesgo a lo largo del colector de drenaje de la Ciudad de Guatemala. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. UNAM. 70 p.