

UNIVERSIDAD DE PANAMÁ

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE FÍSICA

**PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA Y MODELADO TRIDIMENSIONAL DE
DATOS EN EL CONVENTO DE LOS JESUITAS, SITIO ARQUEOLÓGICO DE
PANAMÁ VIEJO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE LICENCIADA
EN FÍSICA

PRESENTADO POR:

NOEMÍ ORMELIS RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

CEDULA: 8-862-730

ASESORES:

PROFESORA MARÍA LEZCANO

PROFESOR ALEXIS MOJICA

PANAMÁ, REPÚBLICA DE PANAMÁ

SEGUNDO SEMESTRE 2018

UNIVERSIDAD DE PANAMÁ

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE FÍSICA

**PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA Y MODELADO TRIDIMENSIONAL DE
DATOS EN EL CONVENTO DE LOS JESUITAS, SITIO ARQUEOLÓGICO DE
PANAMÁ VIEJO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE LICENCIADA
EN FÍSICA

PRESENTADO POR:

NOEMÍ ORMELIS RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

CEDULA: 8-862-730

FIRMAS DEL JURADO CALIFICADOR:

María Lezcano
Asesora

Alexis Mojica
Co-asesor

Joaquín González
Jurado

DEDICATORIA

“A mi hija Ema Isabel Ladrón De Guevara Rodríguez, a mi abuelo (q.d.e.p.) y a mi familia con mucho amor, esfuerzo y perseverancia”.

AGRADECIMIENTOS

“...Solamente esfuérzate y se muy valiente... no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo...” Josué 1: 7 y 9

Agradezco primeramente a Dios por darme la vida, la sabiduría, la paciencia, la perseverancia y la voluntad para vencer los obstáculos y lograr los objetivos de este trabajo.

A mis padres por apoyarme siempre con amor, con consejos y motivarme para que lograra mis metas y valorara el esfuerzo y dedicación en mi educación.

A mis asesores, a mi estimada profesora María Lourdes Lezcano, una viva representación de una madre persistente que me vio crecer desde mis inicios en Física con sus orientaciones, sus consejos y que hoy puede ver el fruto de sus enseñanzas. Al profesor Alexis Mojica (Universidad Tecnológica de Panamá), amigo como un padre para mí, por sus palabras de aliento y que hoy puedo decirle gracias.

A los profesores de Física que me formaron, al profesor Cornejo de matemática por su amor a la enseñanza y hacer de sus clases una verdadera fuente de inspiración.

Al Laboratorio de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas - Centro Experimental de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Panamá, a cargo del Dr. Alexis Mojica por facilitarnos los equipos e instrumentos requeridos para la toma de datos. De igual forma al equipo de trabajo de este laboratorio por recibirme en las instalaciones del centro experimental.

A la Dra. Mirta Linero, al Arq. Félix Durán, a la Dra. Graciela Arosemena y a la directiva del Patronato de Panamá Viejo por todo el apoyo y facilidades brindados para la realización de este trabajo.

A mis amigos, que me han apoyado de una u otra forma con su cariño, consejos, manteniendo y fortaleciendo esa amistad. Gracias a todos por su granito de arena.

INDICE GENERAL

Página

PRESENTACION	i
FIRMAS DEL JURADO CALIFICADOR:	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
INDICE GENERAL	v
INDICE DE FIGURAS Y GRAFICAS	vii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
ESTADO DEL ARTE	4
JUSTIFICACIÓN	7
CAPÍTULO 1 - MARCO HISTORICO, GEOGRAFICO Y GEOLOGICO DEL SITIO DE PANAMA VIEJO, CONVENTO DE LA COMPAÑÍA DE JESUS	9
1.1. Sitio De Panamá Viejo	10
1.1.1. Marco Histórico	10
1.1.2. Ubicación Geográfica	11
1.1.3. Importancia de la ciudad de Panamá la Vieja	12
1.1.4. Contexto Geológico	13
1.2. Marco Histórico y ubicación del Convento de la Compañía de Jesús	14
1.2.1 Marco histórico	14
1.2.2. Ubicación geográfica del área de estudio	16
CAPÍTULO 2- MARCO TEORICO	18
2.1. Generalidades del método de Resistividad Eléctrica	19

2.2. Resistividad y conductividad eléctrica de las rocas	20
2.3. Concepto de resistividad eléctrica aparente	24
Trasmisión de la energía eléctrica al medio:	27
2.4. Configuración electródica Wenner-alfa	33
2.5 Modelado	36
2.5.1. Método directo	36
Modelo de diferencias finitas y elementos finitos 3D	37
2.5.2. Solución del problema inverso	45
Contexto teórico del problema inverso en 3D	47
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA	52
3.1 Delimitación del área de estudio	53
3.2 Ubicación de las tomografías eléctricas	55
3.3 Dispositivo y toma de datos	55
3.3.1 Generalidades del equipo Syscal R1 + Switch 48 empleado	55
3.3.2 Toma de datos: generación de pseudo-secciones de resistividades aparentes	58
CAPÍTULO 4- RESULTADOS, ANALISIS E INTERPRETACION	61
4.1. Los programas EarthImager 3D y Res3Dinv	62
4.2 Resultados de la inversión suave mediante EarthImager 3D	63
4.3 Resultados de la inversión suave mediante Re3Dinv	71
CONCLUSIONES	77
RECOMENDACIONES	79
BIBLIOGRAFÍA	80

INDICE DE FIGURAS Y GRAFICAS

	Página
Figura 1. Plano de las principales estructuras del Conjunto Monumental Histórico de Panamá Viejo y ubicación del sitio trabajo (ruinas del Convento de La Compañía de Jesús).	11
Figura 2. Fotografía área del Sitio Arqueológico de Panamá Viejo.....	12
Figura 3. Entrada principal vista a la calle lateral este.....	15
Figura 4. La fotografía de la izquierda muestra la entrada que comunica con el claustro (lugar de estudio). La de la derecha muestra la entrada lateral a la calle la Empedrada.	15
Figura 5. Área de estudio: Convento de La Compañía De Jesús.	16
Figura 6. Área del patio principal, donde se presume estuvo el huerto y se encuentre el pozo.	17
Figura 7. Parámetros que caracterizan la resistividad eléctrica.	21
Figura 8. Circuito de corriente eléctrica en un suelo homogéneo. (Grajales, 2012, p. 38).....	25
Figura 9. Electrodo de corriente sobre una superficie (Ladrón De Guevara, 2018).....	28
Figura 10. Representación del arreglo con dos electrodos de corriente A y B para un voltaje medido entre los puntos M y N en la superficie (Everett, 2013).	30
Figura 11. Configuraciones electródicas tradicionales (a) Schlumberger, (b) Wenner, (c) Dipolo-dipolo. (Everett, 2013).....	34
Figura 12. Configuración Wenner- alfa, donde M y N son los electrodos de potencial y A y B los electrodos de corriente, para una misma separación (a) (Everett, 2013).	35
Figura 13. Esquema de malla tridimensional empleado por el método de diferencias finitas para la resolución del problema directo (Grajales, 2012).	42
Figura 14. Distribución de la conductividad eléctrica en las superficies de las caras (a) frontal, (b) posterior, (c) izquierda, (d) derecha, (e) superior e (f) inferior del bloque cuyo nodo central corresponde a la coordenada (k, l, m) (Grajales, 2012).	43
Figura 15. Muestra el patio principal del Convento de la Compañía de Jesús.	53
Figura 16. Muestra cómo se colocaron los electrodos en el suelo, para la toma de datos.....	54
Figura 17. Muestra parte de los límites del área de estudio.	54
Figura 18. Dispositivo Syscal R1 + Switch 48 empleado en este estudio.....	57
Figura 19. Secuencia de mediciones para la construcción de pseudo-secciones de resistividades eléctricas aparentes (Grajales, 2012).	59
Figura 20. Gráfico doblemente logarítmico de los valores de resistividad eléctrica aparente sintéticos en función de los valores de resistividad eléctrica aparente medidos.	63
Figura 21. Mapas horizontales de valores de resistividad eléctrica calculada como resultado de la resolución del problema inverso utilizando la inversión suave del programa EarthImager 3D, para un total de 2 iteraciones y un error RMS de 22,6 %.....	67
Figura 22. Distribución perpendicular de varios perfiles de resistividad eléctrica calculada en el área de interés, con el objetivo de visualizar las zonas de baja resistividad (en tonalidad violeta) con valores de 3,0 Ω .m.....	68

Figura 23. Distribución de las fuertes anomalías eléctricas ($> 383,0 \Omega.m$) identificadas en el área de estudio.	69
Figura 24. Representación en perspectiva de los mapas horizontales de la figura 21 obtenidos a través de la inversión suave del programa EarthImager 3D.	70
Figura 25. Mapas horizontales de valores de resistividad eléctrica calculada, como resultado de la resolución del problema inverso utilizando la inversión suave del programa Res3Dinv, para un total de 6 iteraciones y un error RMS de 6,65 %.....	73
Figura 26. Representación en perspectiva de los mapas horizontales de la figura 25 obtenidos a través de la inversión suave del programa Res3Dinv.	76

INTRODUCCIÓN

Panamá posee diversidad de riquezas arqueológicas, que dan testimonio de su historia y cultura. Uno de estos sitios es el Complejo Arqueológico de Panamá Viejo, lugar de mucha historia en Panamá, que guarda las huellas de nuestros antepasados. El primer asentamiento europeo establecido en la costa pacífica del continente americano fue la antigua ciudad de Panamá, que estaba unida primeramente al puerto de Nombre de Dios y posteriormente al de Portobelo (ambos en la costa atlántica), a través de los caminos transístmicos: Camino Real y el Camino de Cruces. Todas las riquezas procedentes de Centroamérica, México, Ecuador y Perú (como producto de la conquista española) llegaban a la ciudad para luego ser trasladados y distribuidos a otras regiones del continente.

Dentro de ese complejo arqueológico, el área de interés de este trabajo es el Convento de los Jesuitas, con la finalidad de realizar una prospección geofísica y ver si es posible determinar los límites del claustro y un pozo en ese lugar.

En esta línea, la Geofísica Aplicada contribuye al estudio del subsuelo, basada en el análisis de ciertas propiedades físicas del subsuelo (resistividad eléctrica, conductividad eléctrica, susceptibilidad magnética, densidad, temperatura, velocidad de las ondas, etc.) y en las variaciones temporales y espaciales de las mismas y de los campos terrestres asociados a ellas, ya sea naturales o artificiales (campo eléctrico, campo geomagnético, campo gravimétrico...). La representación de estas variaciones en un mapa, mediante el uso

adecuado de recursos geoestadísticos, constituye una herramienta útil para una interpretación sistemática y científica, que contribuye a dar respuesta a la interrogante sobre la presencia, o no, de estructuras arqueológicas, de ingeniería civil y geotecnia, de impacto ambiental, búsqueda de recursos minerales, entre otras.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Contribuir a ampliar el conocimiento y rescate del patrimonio histórico de Panamá, mediante un estudio geofísico en el Complejo Arqueológico de Panamá Viejo.

Objetivos específicos:

1. Aplicar el método de resistividad eléctrica para estudiar el área del Convento de los Jesuitas, en el Complejo Arqueológico de Panamá Viejo, con el fin de determinar los límites del claustro del convento.
2. Aplicar el método de resistividad eléctrica en el estudio del área del Convento de los Jesuitas, en el Complejo Arqueológico de Panamá Viejo, para tratar de demostrar la posible existencia de un pozo en ese lugar y otras características.

ESTADO DEL ARTE

De acuerdo a Scollar et al (1999), gran parte de las estructuras arqueológicas son potencialmente detectables debido al hecho que dichas estructuras poseen parámetros físicos diferentes al medio que los rodea. Por esta razón, la Prospección Geofísica generalmente puede detectarlas.

En Panamá se han desarrollado una serie de investigaciones científicas enfocadas a la detección de rasgos arqueológicos de tipo precolombino e hispánico, empleando técnicas de prospección geofísica (Pastor et al., 2001; Mayo et al., 2007; Mojica et al. 2007; 2009; 2010; 2014a; 2014b; 2016; 2017; Mojica y Acosta, 2008; Mojica y Garcés, 2008; Wake et al., 2012; Lezcano et al., 2018).

En nuestro país se han realizado algunos aportes, donde se aprecia el uso de los métodos geofísicos, en particular los eléctricos, en la búsqueda de vestigios arqueológicos de aquellos pueblos que alguna vez se asentaron en nuestro país, contribuyendo a conocer su historia y salvaguardar su legado como patrimonio histórico de Panamá.

Así fue posible determinar un patrón de distribución de estructuras, grabados rupestres y el área de explotación minera antigua en el interior del país. También estudiar las actividades agrarias que realizaron ciertos pueblos durante el periodo cerámico tardío, donde buscaban asentarse en áreas ideales (Mayo, J.; Mojica, A.; Ruíz, A.; Moreno, E.; Mayo, C. y De Gracia, G., 2007). Además, estructuras arquitectónicas incipientes y áreas de explotación minera prehispánica de las cuencas de los ríos Grande y Coclé del Sur, Panamá.

En esta misma línea, las investigaciones de Mojica, A.; Mayo, J.; Mayo, C.; Chantada, J.; De Gracia, G. y Florsch, N. (2007), con prospecciones magnéticas y eléctricas en el yacimiento arqueológico El Caño, Gran Coclé, Panamá, permitieron reconstruir el plano de yacimientos de estructuras de asentamientos culturales de pueblos descendientes de El Caño, con el fin de proteger y salvaguardar las diferentes estructuras y yacimientos, que se caracterizan por haber sido el «centro ceremonial» más importante de la Región Cultural Gran Coclé.

Mojica, A.; Pastor, L.; Vanhoeserlande, R. y Salamanca, M. (2010), También realizaron estudios de micro-resistividad en Nombre de Dios, un importante sitio arqueológico de Panamá, que representó una importante y antigua colonia española fundada en la época de la conquista europea en el continente americano, alrededor del año 1510. Aquí se estudió un piso hispánico, empleando el método de resistividad eléctrica para generar un mapeo de toda el área y confirmar luego, con las excavaciones, que se trataba de un piso hispánico,

que se encontraba sobre una capa húmeda de material sedimentario superficial, de acuerdo con los datos obtenidos.

La geofísica aplicada es una herramienta altamente importante y útil en la arqueología y en otras áreas. Existen muchos más trabajos de investigación geofísica que se han realizado en Panamá a lo largo de los años, sin embargo, solo mencionamos los más relevantes y que se han enfocado al área de la arqueología en el territorio panameño.

JUSTIFICACIÓN

Posterior a la destrucción de la antigua ciudad de Panamá en el año de 1671, por corsarios ingleses, la ciudad sufre un abandono y no fue hasta la década de los años 70 del siglo pasado que sus ruinas se transforman en foco de investigaciones arqueológicas. Ya para el año 1995 se dan inicios a intervenciones sistemáticas que ponen en evidencia la importancia de la ciudad. Para llegar a entender el aprovechamiento del espacio ocupado por estos primeros pobladores europeos en el Istmo de Panamá y sus diversas formas de vida, se desarrollaron un conjunto de proyectos interdisciplinarios, que incluyeron trabajos geofísicos y que tomaron en cuenta aspectos históricos, urbanísticos, arquitectónicos, antropológicos y arqueológicos. En este mismo contexto de conservación del patrimonio histórico, la Prospección Geofísica es una herramienta adicional, no invasiva, que puede contribuir a la detección y parametrización de rasgos culturales enterrados. Esto mediante la medición de parámetros físicos u observaciones realizadas en la superficie del área de interés y la generación de modelos del subsuelo, acordes con la realidad geológica.

En esta línea y conscientes de que toda nación es responsable de salvaguardar su historia, su cultura y su patrimonio histórico y que para esto es necesario rescatar las evidencias que existen y que la apoyan, la Universidad de Panamá y el Patronato de Panamá Viejo han venido realizando esfuerzos conjuntos desde finales del siglo pasado, desarrollando proyectos para la búsqueda y rescate de estructuras arqueológicas en este sitio.

Actualmente, en el marco de un proyecto que se desarrolla en el Complejo Arqueológico de Panamá Viejo, apoyándose en los datos históricos del Convento de los Jesuitas, surgió el interés de realizar un estudio de prospección geofísica en esta zona, en donde se sospecha se encuentra un claustro y un pozo, pero que en el terreno no se observan evidencias de dichas estructuras; es un área completamente plana y uniforme.

Aquí los métodos geofísicos pueden apoyar mucho al trabajo de los especialistas (arqueólogo, arquitecto, ...) en el conocimiento, detección, rescate y conservación del patrimonio histórico, pues mediante técnicas no invasivas y en armonía con el medio y las estructuras, proporcionan información del subsuelo y de las estructuras que subyacen en él. Según el interés de estudio, se asocia la magnitud física o campo a estudiar y se selecciona el método y la o las técnicas a aplicar, basándose en el contraste de dicha magnitud de la estructura y la del medio que la rodea. En este caso particular, la magnitud física a estudiar es la resistividad eléctrica.

Otra de las grandes ventajas que ofrecen los métodos de prospección geofísica aplicados a la arqueología es que orientan a los arqueólogos en dónde hacer las excavaciones, optimizando tiempo y recursos, pues con los resultados geofísicos delimitan más el área de prospección y tienen mayor certeza de dónde buscar las estructuras de interés.

Capítulo 1

Marco Histórico, Geográfico y Geológico del Sitio de Panamá Viejo y del Convento de la Compañía de Jesús

1.1. Sitio De Panamá Viejo

1.1.1. Marco Histórico

En la época pre-colombina, los aborígenes fundaron pequeñas ciudades, entre las cuales estaba una pequeña comunidad llamada Panamá, ubicada en el área en la que posteriormente se fundara la Ciudad de Nuestra Señora de la Asunción de Panamá (Panamá la Vieja), por los españoles, específicamente por Pedrarias Dávila, el 15 de agosto de 1519. La fundó debido a la necesidad de tener un punto estratégico para otras expediciones que se dirigían hacia el sur, además de que su localización la colocaba en una posición privilegiada para ser una ruta de tránsito comercial. La ciudad constaba con un área aproximada de 60 hectáreas; su arquitectura fue auténtica y relativamente sencilla, utilizando materiales como madera, piedra, que aparece como material muy utilizado desde finales del siglo XVI y sólo en edificios importantes o gubernamentales, iglesias, conventos y grandes residencias. La ciudad se construyó con los puntos cardinales y en su foco principal estaba la plaza mayor; las manzanas urbanas estaban bien uniformes. En cuanto a la arquitectura de las iglesias, eran las que más resaltaban en la ciudad, entre ellas, dos ermitas, siete conventos y una catedral. Esta ciudad fue destruida en 1671, bajo el mando del pirata inglés Henry Morgan y nunca más se reconstruyó, quedando así las ruinas de la antigua ciudad, que fue trasladada al Casco Antiguo (Castillero, 1994). Se estima que la cantidad de casas que existían al momento de esta destrucción oscilaba entre 600 y 700, las cuales en su mayoría fueron arrasadas por el incendio, quedando las estructuras de piedra, y gran parte de ellas se deterioraron por las condiciones ambientales con el paso de los años. (Mojica, 2004).

1.1.2. Ubicación Geográfica

El Sitio Arqueológico de Panamá Viejo está ubicado al Este de la ciudad de Panamá, entre las desembocaduras del río Algarrobo y río Abajo, frente a las costas del Océano Pacífico en la sección más angosta del Istmo. Limita al noreste con un área pantanosa, al Norte con el Río Abajo, al Este con el viejo puerto (actual área pantanosa), al noroeste, con el Jardín de la Paz y al oeste con la comunidad de Panamá Viejo (Mojica, 2004). Las figuras 1 y 2 muestran la ubicación del sitio.

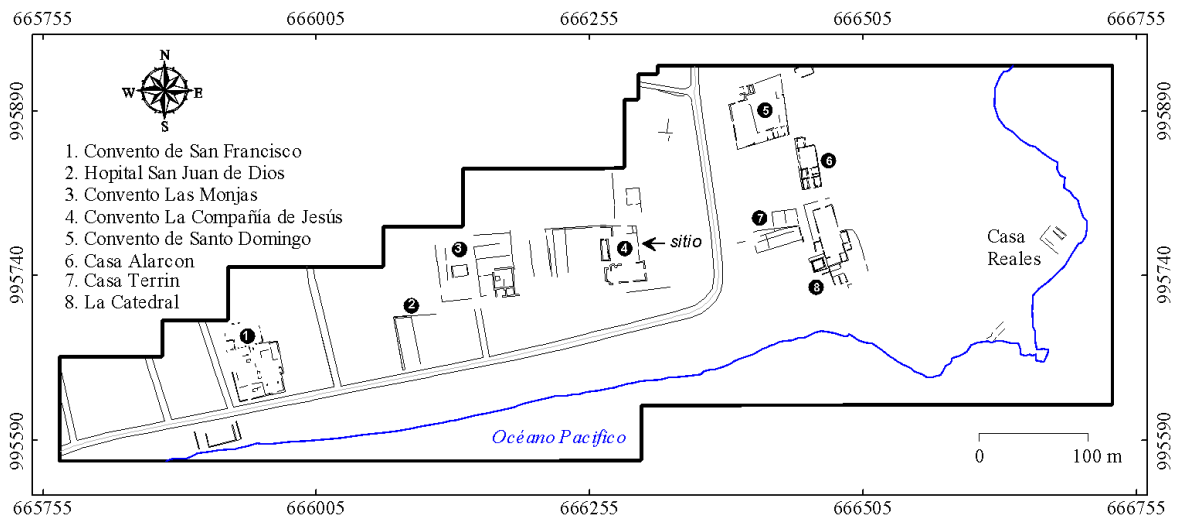


Figura 1. Plano de las principales estructuras del Conjunto Monumental Histórico de Panamá Viejo y ubicación del sitio t rabajo (ruinas del Convento de La Compañía de Jesús).



Figura 2. Fotografía área del Sitio Arqueológico de Panamá Viejo.

1.1.3. Importancia de la ciudad de Panamá la Vieja

La antigua ciudad de Panamá tuvo una gran importancia, ya que, gracias a su ubicación, se volvió una de las principales rutas de tránsito para los comerciantes, debido a que a las embarcaciones les resultaba más factible cruzar por tierra desde Portobelo hasta Panamá Viejo y viceversa, que navegar para bordear toda la costa sur del continente americano. Esta actividad ayudó a incrementar el comercio y por ende la economía del país, así como la de los comerciantes, tanto que se dieron las primeras ideas de la construcción de un canal a través de Panamá y marca su tendencia de un país de servicio comercial.

Era la principal residencia de la élite en Tierra Firme, así como la sede de los representantes de la Corona y del aparato administrativo local de la iglesia, los dos grandes puntales de la sociedad colonial (página web del Patronato de Panamá Viejo).

Las ruinas de Panamá Viejo estuvieron abandonadas desde que fueron destruidas en 1671, hasta que mediante la ley 91 de diciembre de 1976 son declaradas Conjunto Monumental Histórico de Panamá Viejo, con el propósito de conservar y rescatar esa parte importante de nuestro patrimonio histórico. Actualmente el sitio consta de 28 hectáreas, que incluyen las ruinas de las edificaciones más importantes. En el 2003 el comité de patrimonio mundial de la UNESCO incluyó el Sitio Arqueológico de Panamá Viejo en la lista de Patrimonio mundial, como una extensión del distrito histórico de Panamá.

1.1.4. Contexto Geológico

Según Rubio (1949), el Istmo de Panamá presenta diferencias en su constitución geológica debido a la formación lenta que experimentó a lo largo del tiempo. Además, de acuerdo con Mojica (2004), el istmo está constituido por rocas ígneas propias del periodo pre terciario. La mayor parte de los sedimentos que constituyen la base de la ciudad de Panamá pertenecen a los sedimentos más antiguos del oligoceno y las tobas del eoceno.

Además, el análisis efectuado en una muestra de tierra de este sector (Panamá), revela un 65 % de silicio, 3 % de potasio y 2 % de sodio. Lo restante es basalto, que está formado por plagioclasas o feldespato, albita y anortita y también están presentes los minerales máficos, formados por elementos ferromagnéticos (Rubio, 1949).

1.2. Marco Histórico y ubicación del Convento de la Compañía de Jesús

1.2.1 Marco histórico

El Convento de la Compañía de Jesús fue uno de los últimos en ser fundados en Panamá Viejo. Esta zona estaba ocupada por el edificio de mayor importancia. Este convento fue construido a mediados del siglo XVII. La estructura era de madera, con techo de teja (Castillero, 1994). A pesar de todas las características que poseía este importante convento, hubo poco interés por parte de sus administradores en la construcción de edificaciones sólidas y planificadas, como sí fue el caso de otras ciudades coloniales.

La orden fue fundada durante los años de 1578 y 1582, por el Padre jesuita Miguel de Fuentes. Es así que la orden funcionaba al principio con aproximadamente cinco religiosos en una casa del vecindario. Por mucho tiempo el convento fue de madera y esto provocó que se hundiera en 1602, y no fue hasta principios del siglo XVII que empezaron a rehacerlo con piedra y nuevos cimientos. La obra se hizo de acuerdo a los planos del padre Andrés Alonso de Valladolid, arquitecto que se encontraba en Panamá en 1610.

La nave principal tenía dos entradas: una lateral, que era la principal, sobre la Calle de la Empedrada, que daba hacia una calle transversal, al Este (figuras 3 y 4). Otra que comunicaba con el claustro (lugar de interés de este estudio), figura 4.

El refectorio y las otras dependencias se encontraban en la planta baja. Se presume que las celdas se encontraban en la planta alta. Es probable que las estructuras hacia el Oeste estuvieran conformadas por los patios y otros lugares de servicios, posiblemente de un sólo

nivel, entre las cuales se encontraban la huerta y los pozos. El monasterio llegó a tener alrededor de 5 000 m² (Patronato de Panamá Viejo, 2013).



Figura 3. Entrada principal vista a la calle lateral este



Figura 4. La fotografía de la izquierda muestra la entrada que comunica con el claustro (lugar de estudio). La de la derecha muestra la entrada lateral a la calle la Empedrada.

1.2.2. Ubicación geográfica del área de estudio

El área de estudio fue en el patio principal dentro del Convento de La Compañía De Jesús. Está ubicado cerca de la Plaza Mayor del Sitio Arqueológico de Panamá Viejo, entre la Calle de la Empedrada y la Calle del Obispo (figura 5).



Figura 5. Área de estudio: Convento de La Compañía De Jesús.

Como se mencionó en la introducción, se sospecha de la existencia de un pozo de esa época, en el subsuelo del patio principal del convento (figura 6), que es de interés en este estudio. El área del patio principal es un llano, compuesto de tierra bastante seca y piedras sueltas, que van desde el centro en forma de cruz hasta los lados, dando origen a 4 cuadrados, donde se supone se encuentra un camino que comunica con las demás secciones del convento.

Es probable que la estructura hacia el Oeste estuviese conformada por los patios y las dependencias de servicios, entre las cuales se encontraban la huerta y los pozos.



Figura 6. Área del patio principal, donde se presume estuvo el huerto y se encuentra el pozo.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Generalidades del método de Resistividad Eléctrica

El papel que juega la resistividad eléctrica en los estudios de prospección geoelectrica se debe a que este parámetro físico varía en función de las características del terreno, como ocurre en ciertos materiales (rocas, minerales, otros).

Según Telford (1990):

En el método de resistividad eléctrica se miden y analizan las variaciones de resistividad eléctrica del subsuelo, tanto en profundidad como laterales, empleando fuentes de corriente directa. El procedimiento consiste en enviar una corriente eléctrica mediante dos electrodos (A, B) que se insertan en el suelo inducen un campo eléctrico artificial, generando una diferencia de potencial, que se mide mediante dos electrodos (M, N) también clavados en el suelo y conectados a un voltímetro, cuyas distancias se mantienen o varían de acuerdo a lo que se quiere estudiar. De este modo se mide la corriente eléctrica y se puede determinar la resistividad aparente del terreno en función del cociente de la diferencia de potencial medida entre los electrodos de investigación y la intensidad de corriente que se inyecta al terreno. En este sentido, la técnica de resistividad eléctrica es superior, al menos teóricamente, a todos los métodos eléctricos.

En la relación anterior interviene el coeficiente que se conoce como factor de penetración, que es el que controla la profundidad de investigación a la que se está operando. Este coeficiente proporciona información cuantitativa de las propiedades conductoras del subsuelo, permitiendo obtener una aproximación de la distribución vertical de la

resistividad del subsuelo. Este método se fundamenta en dos leyes fundamentales: la ley de la conservación de la carga espacial y la Ley de Ohm. Es aplicado en trabajos de hidrogeología, ingeniería civil, prospección mineral, minas, domos de sal, intrusión salina, fallas de zonas, inclusiones volcánicas, diques, entre otros (Cantos, 1987, p. 394).

Además, es importante tener en cuenta que “mediante estas mediciones se puede determinar la situación en el subsuelo, de posible existencia de fuentes minerales o reconocer estructuras internas de cuerpos geológicos.” (Cantos, 1987, p. 379).

2.2. Resistividad y conductividad eléctrica de las rocas

“En los métodos de prospección geoelectrica lo fundamental es conocer las propiedades eléctricas de los materiales, es decir se basan esencialmente en las diferentes interpretaciones de la *resistividad eléctrica* del terreno. Estos parámetros físicos se conocen como la resistividad eléctrica ρ y la conductividad σ .” (Grajales, 2012, p. 32)

En los siguientes párrafos ampliaremos estos conceptos.

Resistividad (ρ): es la propiedad de los materiales de oponerse al paso de la corriente eléctrica. Este parámetro se define a partir de la expresión de la resistencia eléctrica R en ohmios (Ω), de un material de resistividad ρ , con dimensiones unitarias, de longitud L, área S de sección transversal (figura 7).

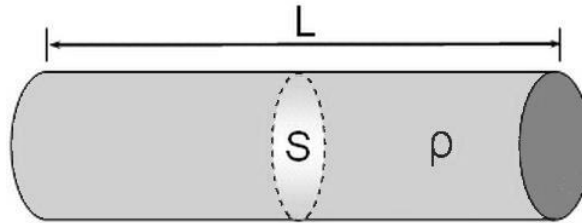


Figura 7. Parámetros que caracterizan la resistividad eléctrica.

$$R = \rho \frac{L}{S}, \quad (1)$$

Despejando de la expresión (1), la resistividad eléctrica viene dada por:

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (2)$$

De manera que si $L = 1,0 \text{ m}$ y $S = 1,0 \text{ m}^2$, obtenemos la unidad de resistividad ($\Omega \cdot \text{m}$).

La corriente resultante I que pasa por un cuerpo y la diferencia de potencial ΔV que se produce se relaciona por la Ley de Ohm:

$$I = \frac{\Delta V}{R} \quad (3)$$

Donde R está expresado en ohm (Ω), ΔV en voltio (V) e I en ampere (A).

La relación entre la resistividad y la conductividad σ está dado por:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

Donde la unidad de la conductividad es $\frac{\Omega^{-1}}{\text{m}}$ ó $\frac{\text{S}}{\text{m}}$ (S = siemens).

Y la corriente por unidad de área, $J = \frac{I}{A}$, se conoce como densidad de corriente (Cantos, 1987, p. 381).

Conductividad (σ): Es la medida de la capacidad de un material para dejar pasar la corriente eléctrica a través de él y es inverso de la resistividad eléctrica. La conductividad eléctrica depende de la estructura atómica y molecular del material.

Considerando cada roca como un medio homogéneo e isotrópico, se pueden distinguir dos clases de conductividad en estos estratos rocosos: la conductividad metálica o electrónica y la conductividad iónica o electrolítica. La metálica o electrónica se caracteriza por permitir el transporte de electrones; la poseen ciertos minerales conductores llamados metálicos, como la pirita, la galena y el sulfuro de cobre. La conductividad iónica se presenta cuando los iones son los portadores de carga; esta condición existe en los minerales y rocas aislantes en estado de sequedad, por ejemplo, en las arenas cuarzosas o las areniscas, que conducen la corriente debido a un porcentaje de agua que presentan en su composición. Es decir, la conductividad se da en función del contenido de agua y de las sales ionizadas disueltas en la misma (Cantos, 1987, p. 382).

En resumen, la resistividad de las rocas y de las formaciones se ve afectada por los siguientes factores: resistividad de los minerales constitutivos; resistividad del agua que llena los poros, el volumen relativo de ambos y la disposición de los mismos. (Cantos, 1987, p. 383).

La conductividad eléctrica σ también se puede expresar en función del campo eléctrico \vec{E} y de la densidad de corriente eléctrica \vec{J} , pero como en general las propiedades conductoras

de un material varían con la dirección, ρ y σ son tensores de segundo rango, de modo que la Ley de Ohm puede expresarse como:

$$\vec{J}_i = \sigma_{ij} \vec{E}_j \quad (5)$$

En el caso de medios isotrópicos, σ es un escalar y sólo para materiales homogéneos será constante (Udías y Mezcuca, 1997, p. 365).

Cabe señalar que:

Existe una estrecha relación entre los iones del agua y la conductividad de los materiales, tal que este valor puede variar ampliamente entre los metales. La conducción eléctrica en el suelo es de tipo electrolítica y se basa en el desplazamiento que experimentan los iones en el agua; es preciso que dicho parámetro físico se encuentre relacionado tanto a la presencia de sales disueltas como al agua por la movilidad de los iones, es decir la conductividad eléctrica dependerá de su tamaño y de la viscosidad del agua (Grajales, 2012, p. 35).

Considerando que:

Los suelos son materiales de tipo trifásico donde el comportamiento de la arcilla es bastante complejo y es difícil dar un tipo de mediciones empíricas de la conductividad y su inverso la resistividad en el suelo, se considera que la Ley de Archie permite relacionar la resistividad del agua intersticial (ρ_w) y la porosidad (n) para un ambiente saturado sin arcilla, despreciando la conductividad eléctrica:

$$\frac{\rho}{\rho_w} = an^{-m} \quad (6)$$

Donde a y m son coeficientes empíricos variables (Grajales, 2012, p. 36).

Además:

Es importante conocer algunos factores que afectan la resistividad, ya que es un parámetro que varía en función de las condiciones del terreno, entre estos factores tenemos: el grado de saturación, la temperatura, la porosidad y la forma de los poros, la salinidad del fluido, el tipo de roca, los procesos geológicos que afectan a los materiales y la presencia de materiales arcillosos con alta capacidad de intercambio catiónico. Es esta estrecha relación entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación que permite utilizar estos métodos de resistividad en la búsqueda de focos de filtración de agua en el subsuelo, pues sabemos que un gran porcentaje de agua en el terreno provocaría una disminución de la resistividad (Cantos, 1987, p. 384-387).

2.3. Concepto de resistividad eléctrica aparente

En los métodos eléctricos se utiliza la hipótesis de que el interior de la tierra tiene una resistividad eléctrica uniforme, por lo que la resistencia eléctrica medida se representa como una resistividad eléctrica aparente (ρ_a), ya que generalmente el suelo no es homogéneo. Las expresiones para calcular la resistividad aparente (ρ_a) dependen de los diferentes arreglos de electrodos, para distintas posiciones en el espacio (1D, 2D ó 3D) según se planteó el estudio. Con estos valores se construyen mapas, constituidos por pseudosecciones de resistividad aparente, que posteriormente pasan por un proceso inverso, para dar como resultado información de la resistividad eléctrica real (ρ_r) del subsuelo estudiado.

Tal que:

Considerando que el medio es netamente heterogéneo, es útil medir esta resistividad y llamarle aparente como se ha mencionado en el párrafo anterior, puesto que tratamos con un valor promedio de las resistividades verdaderas de los diferentes medios afectados por la distribución de corriente.

Para determinar una expresión general de resistividad aparente, consideremos un medio homogéneo e isotrópico de resistividad (ρ), donde encima de éste se encuentre un semiespacio de resistividad infinita, como es el caso de la atmosfera. En este medio, las líneas de superficies equipotenciales son perpendiculares al campo eléctrico generado por una fuente, sobre cierta superficie cerrada. Es por ello que se comprueba el régimen estacionario, donde la suma de $i_A + i_B = 0$. Para esto es necesario inyectar una determinada corriente i con ayuda de una fuente conectada a dos puntos A y B mediante dos electrodos como muestra la figura 8 (Grajales, 2012, p. 37).

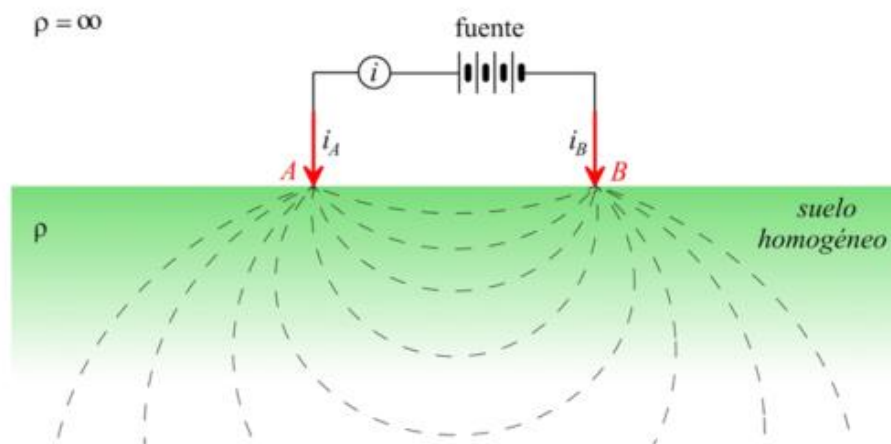


Figura 8. Circuito de corriente eléctrica en un suelo homogéneo. (Grajales, 2012, p. 38).

Podemos emplear las ecuaciones de Maxwell de los campos electromagnéticos:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \zeta \quad (7)$$

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (9)$$

$$\nabla \times \vec{B} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{J} \quad (10)$$

Siendo \vec{B} el vector de campo magnético, (ζ) la densidad de carga en el espacio y \vec{J} el vector densidad de corriente eléctrica. Como las variaciones son nulas en los regímenes estacionarios, las ecuaciones 8 y 10 se pueden resumir a: (Grajales, 2012, p. 38)

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (11)$$

$$\nabla \times \vec{B} = 0 \quad (12)$$

Podemos considerar que la ecuación 11 representa el vector campo eléctrico \vec{E} conservativo medido en (voltios/m), definiéndose como el negativo del gradiente del potencial eléctrico V :

$$\vec{E} = -\nabla V(x, y, z) \quad (13)$$

La Ley de Ohm, anteriormente expresada en la ecuación (5):

$$\vec{J}_i = \sigma_{ij} \vec{E}_j$$

es válida sólo para cuerpos isotrópicos. Considerando el caso del régimen estacionario la densidad de carga espacial será constante, por lo tanto, la ley de conservación de carga espacial se simplifica a: (Cantos, 1987, p. 395)

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (14)$$

Haciendo uso de las dos leyes fundamentales para el régimen estacionario y los cuerpos isotrópicos obtenemos lo siguiente:

$$\nabla \cdot \vec{J} = \nabla \cdot (\sigma \cdot \vec{E}) = -\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla V) = 0 \quad (15)$$

Usando la identidad vectorial $\nabla \cdot (\phi \vec{A}) = \nabla \phi \cdot \vec{A} + \phi \cdot \nabla \vec{A}$ tenemos entonces:

$$\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla V) = \nabla \sigma \cdot \nabla V + \sigma \nabla^2 V ,$$

Donde,
$$\nabla \sigma = 0 \quad (16)$$

$$\sigma \nabla^2 V = 0 \quad (17)$$

Al tratarse de corrientes continuas, la densidad de corriente puede expresarse como:

$$\vec{J} = -\sigma \nabla V$$

Como la divergencia de \vec{J} es nula para regiones en las que no hay fuentes de corriente, el potencial eléctrico V satisfice la ecuación de Laplace:

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \Rightarrow \nabla^2 V = 0$$

$$\nabla^2 V(x, y, z) = 0 \quad ; \quad \nabla^2 V(r, \phi, z) = 0 \quad ; \quad \nabla^2 V(r, \theta, \phi) = 0 \quad (18)$$

Igualando las ecuaciones 16 y 17 resulta:

$$\nabla \cdot \nabla V = \nabla^2 V \quad (19)$$

Ahora bien, “Esta expresión representa el laplaciano del potencial escalar V , de igual forma también es el potencial eléctrico en todo el espacio semiconductor, pero no en los electrodos ni en la superficie de discontinuidad resistiva.” (Grajales, 2012, p. 39).

Trasmisión de la energía eléctrica al medio:

En el campo, la energía eléctrica es transmitida al medio por dos electrodos (A, B) los cuales pueden estar dentro o sobre la superficie.

a. Un electrodo de corriente sobre la superficie:

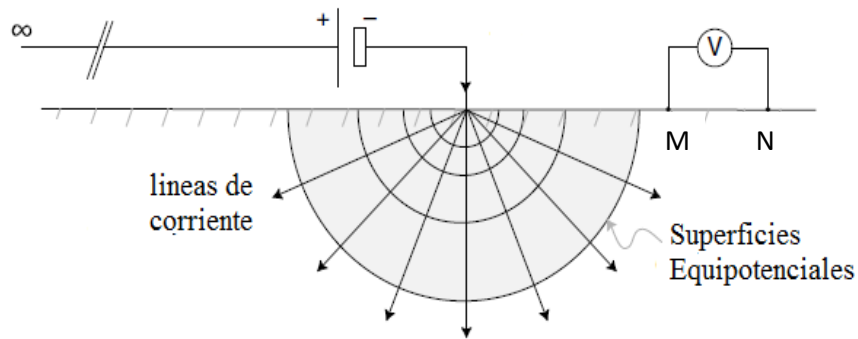


Figura 9. Electrodo de corriente sobre una superficie (Ladrón De Guevara, 2018).

En el estudio de un semiespacio formado por un terreno homogéneo e isotrópico, en cuya superficie suponemos una carga puntual como muestra la figura 9 (un electrodo de corriente en el punto considerado y el otro en el infinito), aplicaremos la ecuación de Laplace en coordenadas esféricas:

$$\nabla^2 V(r) = \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right] + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \left[\frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} \right] = 0$$

y como el sistema presenta simetría con respecto a (θ) y a (φ), supondremos que el potencial depende de la distancia r al electrodo, por eso la ecuación de Laplace se reduce a la ecuación 20 (Cantos, 1987, p. 395).

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right] = 0 \quad (20)$$

Vasta, con $\frac{\partial r}{\partial r} = 0$ para que, $r^2 \frac{\partial V}{\partial r} = C$, represente el valor de una constante, de manera que

la integral sea de la siguiente forma:

$$\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{C}{r^2}$$

$$\int \partial V = C \int \frac{dr}{dr^2}$$

Resultando la siguiente expresión:

$$V(r) = D - \frac{C}{r} \quad (21)$$

Tenemos dos condiciones:

1. $r \rightarrow \infty, V(\infty) = 0$ y $D = 0$

Entonces la ecuación 21 quedaría como:

$$V = -\frac{C}{r} \quad (22)$$

2. Como la densidad de corriente que fluye es radial a través de la superficie esférica, en todas las direcciones tendrá por módulo:

$$J = -\sigma \frac{dV}{dr} = -\sigma \frac{C}{r^2} \quad (23)$$

Conociendo que la densidad de corriente resulta ser la misma en cualquier dirección, a una misma distancia r del electrodo, la corriente I que fluye por dicho electrodo será la misma que la que atraviesa una semiesfera de radio r , por tanto:

$$I = 2\pi r^2 J = 2\pi r^2 \left(-\sigma \frac{C}{r^2} \right) = -2\pi \sigma C$$

Y tenemos que,

$$C = -\frac{I}{2\pi \sigma} = -\frac{\rho I}{2\pi} \quad (24)$$

Entonces el potencial debido a un electrodo puntual figura 9, a una distancia r estará dado por:

$$V = -\frac{C}{r} = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (25)$$

Despejando la resistividad de la ecuación 25 tenemos:

$$\rho = \frac{2\pi r V}{I} \quad (26)$$

A partir de la ecuación 25 se pueden conocer las configuraciones más empleadas en la resistividad aparente (Cantos, 1987, p. 396).

b. Dos electrodos de corriente sobre la superficie:

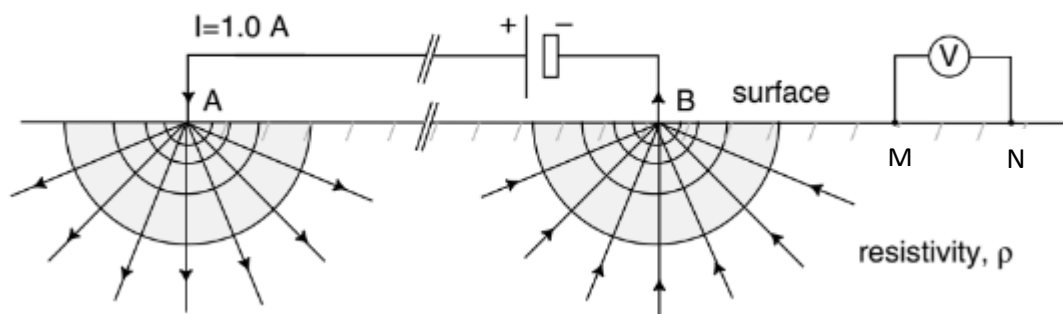


Figura 10. Representación del arreglo con dos electrodos de corriente A y B para un voltaje medido entre los puntos M y N en la superficie (Everett, 2013).

Como sabemos este método utiliza dos electrodos de corriente (A y B), uno es por donde se induce una corriente eléctrica al terreno, uniéndolo al polo positivo de una batería como puente, y otro por el que esta corriente sale del terreno, uniéndose al polo negativo de la batería el cual hace de sumidero.

En la figura 10 consideremos el polo positivo de la batería unido al electrodo A, y el polo negativo al electrodo B.

La expresión para los potenciales viene dada por el teorema de superposición de los campos eléctricos. Así, de la ecuación 25 para los potenciales, con las separaciones r dadas por AM, AN, BM y BN, tenemos las siguientes expresiones para los potenciales:

$$V_1 = \frac{\rho I}{2\pi(AM)}, \quad V_3 = -\frac{\rho I}{2\pi(BM)}$$

$$V_2 = \frac{\rho I}{2\pi(AN)}, \quad V_4 = -\frac{\rho I}{2\pi(BN)}.$$

Donde los voltajes en M y N son:

$$V_M = V_1 + V_3$$

$$V_N = V_2 + V_4$$

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi(AM)} + \frac{\rho I}{2\pi(BM)} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (27)$$

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi(AN)} + \frac{\rho I}{2\pi(BN)} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (28)$$

Y la diferencia de potencial entre M y N, ΔV_{MN} , es:

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right]$$

Despejando obtenemos la resistividad aparente:

$$\rho = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)} \cdot \frac{\Delta V}{I} = k \frac{\Delta V}{I} \quad (29)$$

Donde K es el factor o coeficiente geométrico, que depende del tipo de dispositivo o arreglo electrónico empleado:

$$k = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right)\right]} \quad (30)$$

La ecuación 29 permite evaluar la resistividad del suelo mediante el arreglo de 4 electrodos en diferentes posiciones sobre la superficie, dos de los cuales (A y B) miden la corriente eléctrica y los otros dos (M y N) medirán la diferencia de potencial entre esos dos puntos.

Es importante conocer la simetría de los dipolos A, B, M y N, porque representan un factor necesario en la práctica, puesto que las ecuaciones dependen de la separación que existe entre los electrodos. Así es posible implementar distintos arreglos o configuraciones electrónicas para diferentes situaciones. Se conoce que en el campo o medio real medimos la resistividad eléctrica. Sin embargo, como el medio en la práctica es el suelo, éste es un medio no homogéneo, lo que medimos será la resistividad aparente.

La resistividad aparente es función de la constante geométrica K, del cociente entre la diferencia de potencial medida entre los electrodos alineados y de la intensidad de corriente eléctrica que alimenta el terreno, como es de esperarse, según la ecuación 29 (Grajales, 2012, p. 43).

Además:

La constante geométrica o parámetro geométrico K está relacionada con la profundidad del suelo que se mide en la práctica y tiene como función controlar la profundidad de penetración y su valor variará de acuerdo a la disposición y a la orientación de los electrodos. Como sabemos, el suelo es un medio no homogéneo; esto puede perturbar la distribución

de la corriente eléctrica y también puede dar origen a una variación en las medidas, dependiendo de ciertas características de las configuraciones de electrodos, a saber:

1. Para configuraciones electródicas idénticas, la variación es máxima cuando ésta presenta la sección transversal más larga respecto al volumen de influencia entre A y B, sólo dependiendo de la orientación del cuádruplo.
2. Dependiendo de la posición en la que se encuentren M y N relativa a la posición de A y B, cada cuádruplo tendrá una medida diferente frente a una misma estructura superficial (Grajales, 2012, p. 44).

2.4. Configuración electródica Wenner-alfa

Existen distintos tipos de arreglos electródicos dependiendo del objetivo de la investigación. Estos 4 electrodos pueden adoptar posiciones diferentes sobre el plano (el suelo); también es posible que puedan intercambiarse las posiciones, por ende, la resistividad aparente será independiente de la posición de los electrodos (Pérez, 2014).

Algunos ejemplos de configuraciones electródicas son:

Wenner – alfa, Wenner – beta, Wenner – gamma, Schlumberger, Dipolo – dipolo, Polo – dipolo, Polo – polo, como se observa en la figura 11.

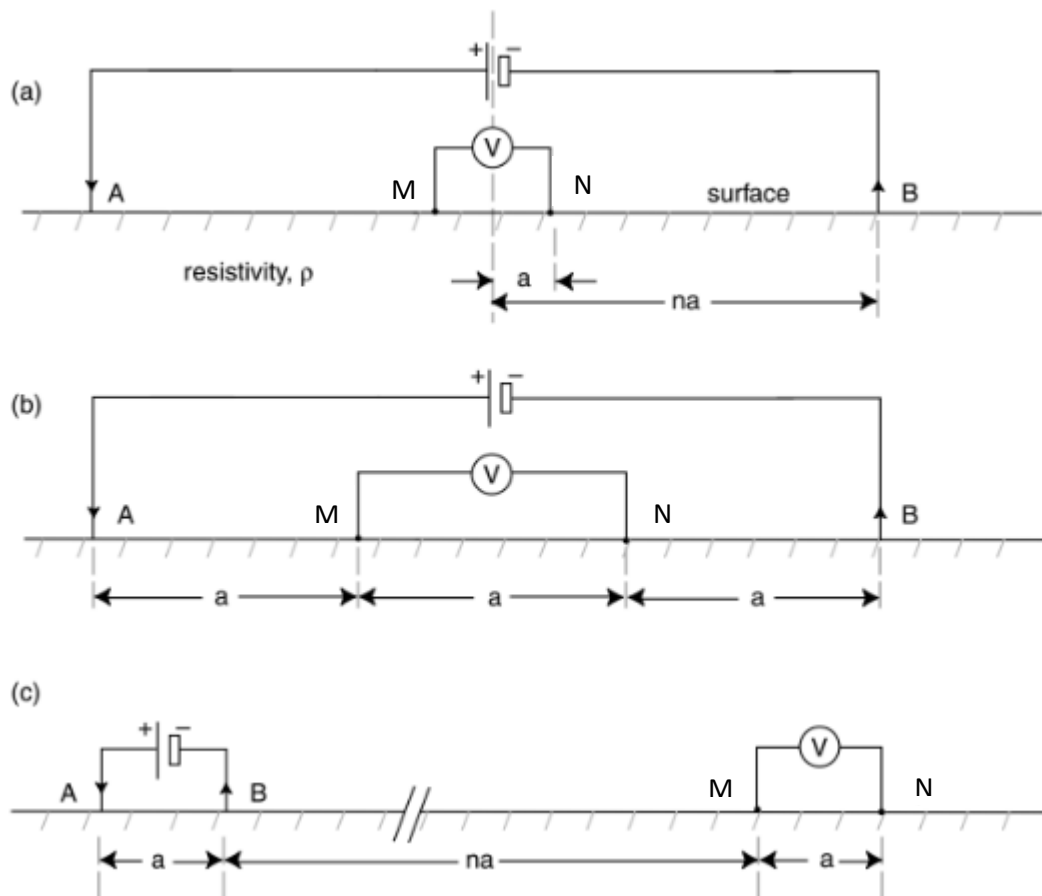


Figura 11. Configuraciones electrónicas tradicionales (a) Schlumberger, (b) Wenner, (c) Dipolo-dipolo. (Everett, 2013).

El arreglo que se empleó para el estudio fue el arreglo Wenner-alfa ($Wenner \sim \alpha$).

Este dispositivo abarca el sistema de electrodo lineal-simétrico en el punto O (estación cero), según la figura 12.

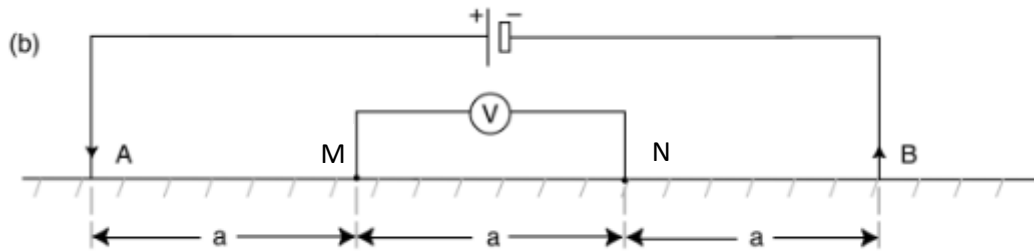


Figura 12. Configuración Wenner- alfa, donde M y N son los electrodos de potencial y A y B los electrodos de corriente, para una misma separación (a) (Everett, 2013).

La distancia de separación entre los electrodos A, B, M y N se considera igual, por eso se toma el parámetro (a) para representar la distancia entre los electrodos:

$$AM = MN = NB = a \quad (31)$$

En esto consiste el arreglo Wenner - alfa en general (Cantos, 1987, p. 398).

Ahora tomamos (a) como parámetro del dispositivo según la expresión 31, y la reemplazamos en la ecuación 30 y así tenemos el valor de la constante geométrica K para este arreglo:

$$K = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a}\right) - \left(\frac{1}{2a} - \frac{1}{a}\right)\right]} \quad (32)$$

$$k = 2\pi a \quad (33)$$

También es importante conocer que:

La figura 11 muestra las diferentes configuraciones tradicionales para cada arreglo específico, así también como la que corresponde al arreglo Wenner-alfa. Es importante resaltar que existirán siempre errores en el posicionamiento de los electrodos, porque no

son fuente puntual. Teóricamente desde que se insertan en el suelo, se considera como límite aceptable el 10 % de la profundidad de inserción de los electrodos (Grajales, 2012. p. 46).

2.5 Modelado

El modelado de datos geofísicos implica la resolución del problema directo y/o el problema inverso.

Al aplicar el método de resistividad eléctrica se obtiene la distribución de los valores de resistividad aparente del subsuelo. Esta información es procesada hasta obtener aproximaciones de la distribución de los valores de la resistividad del subsuelo. Este procesamiento de datos puede ser dividido en dos partes: el cálculo del modelo inicial de resistividades a partir de los datos obtenidos (método directo), y la solución del problema inverso.

2.5.1. Método directo

Empezaremos este punto enfatizando con el concepto del problema directo. Cada método posee características distintas al momento de tratar los datos del medio, generando parámetros de resistividades eléctricas del suelo, que luego serán comparados con otros modelos o aproximaciones a otros modelos.

El problema directo predice resultados cuando la geología y la física del medio son conocidas, donde a partir de la distribución de las resistividades del subsuelo se calcula la

resistividad aparente para un modelo particular. De esta forma es posible comparar los datos de campo con modelos conocidos y así verificar cuantitativamente si estos datos provienen de una distribución de resistividades similar a la del modelo propuesto.

Por su parte, el problema inverso construye un modelo razonable del subsuelo a partir de los datos obtenidos en el campo. Es decir, a partir de los valores de resistividad aparente medidos en superficie, se obtiene una aproximación de la distribución de resistividades del subsuelo (Solana, 2014).

Como es de esperarse, en la mayoría de los estudios geofísicos, el subsuelo puede tener una distribución de resistividad arbitraria y variable, por ser un medio no homogéneo, por lo que resulta eficiente el método de diferencias finitas y elementos finitos para obtener el modelo directo, ya que permite discretizar el subsuelo en bloques bidimensionales, a los cuales hay que calcular el valor de su resistividad eléctrica (Vences, 2013).

A continuación, presentaremos el método de diferencias finitas y elementos finitos, que fue empleado en el presente trabajo, para el modelado directo.

Modelo de diferencias finitas y elementos finitos 3D

Para modelar una imagen en 3D de resistividad eléctrica del suelo, que representa una aproximación de la distribución de la resistividad real, en términos de su profundidad, se divide el subsuelo en bloques tridimensionales, para así calcular el valor de la resistividad

eléctrica y luego correlacionarla con los valores de resistividad eléctrica aparente obtenidas de la inversión. Para este problema se verifican las ecuaciones que relaciona la intensidad de corriente eléctrica, la geometría de los arreglos electródicos y de los potenciales eléctricos calculados, que son proporcionales a los valores de la resistividad eléctrica (calculada) de los bloques en el modelo 3D, de acuerdo con Pérez (2014).

Aplicando el principio de conservación de la carga bajo un volumen dado, se obtiene la ecuación de continuidad:

$$\nabla \cdot \vec{j} = \frac{\partial \vartheta}{\partial t} \delta(x) \delta(y) \delta(z) \quad (34)$$

Donde ϑ representa la densidad de carga en un punto del espacio cartesiano x-y-z mediante una función Delta de Dirac (δ). Al combinarse con las ecuaciones 5, 13 y 34, obtenemos:

$$\vec{j} = -\frac{1}{\rho} \nabla V \quad (35)$$

Luego basándonos en esta ecuación se tiene una estructura matemática en el espacio de manera tridimensional de la forma:

$$\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \nabla \phi(x, y, z)] = -\frac{\partial \vartheta}{\partial t} \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad (36)$$

Donde (x_s, y_s, z_s) indican las coordenadas de la fuente puntual de una determinada carga inyectada en el espacio x-y-z. La densidad de carga ϑ se encuentra especificada en un punto

del plano x, y, z por la función delta de Dirac. Por lo que su $\int \vartheta dv$ corresponde a la carga en un volumen dv determinado. Como sabemos las cargas son puntuales y por ende la densidad de carga es nula en todas partes menos en aquellos puntos donde se encuentren las cargas, entonces la integral $\int \vartheta dv$ debe ser igual a la suma de las cargas que se hallan en un volumen determinado. (Landau y Leifshitz, 1971). Es por ello, que la densidad de carga ϑ se escribe mediante la función delta de Dirac ya que:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx = 1 \quad (37)$$

Los valores de $(x_s)\delta(y_s)\delta(z_s)$ determinados en la ecuación 31 corresponden a las coordenadas del punto donde se inyecta la carga. En un determinado volumen ∇v alrededor del punto donde se inyecta la carga, la parte derecha de la ecuación puede ser expresada así:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} (x - x_s)\delta(y - y_s)\delta(z - z_s) = \frac{i}{\nabla v} (x - x_s)\delta(y - y_s)\delta(z - z_s) \quad (38)$$

Reemplazando la ecuación 38 en la ecuación 36 se obtiene:

$$\nabla \cdot [\sigma(x, y, z)\nabla\phi(x, y, z)] = -\frac{i}{\nabla v} (x - x_s)\delta(y - y_s)\delta(z - z_s) \quad (39)$$

Podemos entonces considerar 2 condiciones de frontera:

1. Que la función $\phi(x, y, z)$ a través de cada límite de una determinada distribución de la propiedad física $\sigma(x, y, z)$, puede ser continua.

2. Que la componente normal de \vec{j} que se representa mediante $\sigma \frac{\partial \phi}{\partial \eta}$, donde η es la dirección normal a la superficie del volumen es continua en cada frontera (Grajales, 2012).

Entonces la $\phi(x, y, z)$ se obtiene derivando las ecuaciones diferenciales partiendo de la ecuación 39. Mediante una discretización propia del espacio (x, y, z) bajo el cual se resuelve el problema Dey y Morrison, (1979). Siguiendo a estos autores se resuelve de manera numérica la discretización por diferencia finita, para una cierta malla prismática rectangular. Se tiene entonces:

$$L\phi(x, y, z) = -\nabla \cdot [\sigma(x, y, z)\nabla\phi(x, y, z)] \quad (40)$$

$$L\phi(x, y, z) = -\frac{i}{\nabla v} (x - x_s)\delta(y - y_s)\delta(z - z_s)$$

Donde L representa el operador positivo ligado a que $\sigma(x, y, z) > 0$.

Según Dey y Morrison (1979), la distribución de la propiedad física $\sigma_{k,l,m}$ en diferentes nodos (k, l, m) de una malla prismática, se discretiza de forma que $\sigma_{k,l,m}$ resulta la conductividad eléctrica de un cierto volumen dado bajo ciertos nodos: $(k, l, m); (k + 1, l, m); (k, l + 1, m); (k, l, m + 1); (k + 1, l, m + 1); (k, l + 1, m + 1); (k + 1, l + 1, m); (k + 1, l + 1, m + 1)$. Se puede entonces dar una solución numérica para el conjunto discretizado $\phi_{k,l,m}$ para cada nodo. Donde se conoce que cada nodo (k, l, m) representa una región en la malla cerrada en un determinado volumen, $\Delta v_{k,l,m}$, tal que cada punto nodal de la malla se expresa de la manera siguiente:

$$\Delta v_{k,l,m} = \frac{(\Delta x_k + \Delta x_{k-1})(\Delta y_l + \Delta y_{l-1})(\Delta z_m + \Delta z_{m-1})}{8} \quad (41)$$

Como cada nodo (k, l, m) es desconocido es posible integrar la ecuación (39) bajo el volumen $\Delta v_{k,l,m}$, obteniéndose así la siguiente expresión:

$$\iiint \nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \nabla \phi(x, y, z)] dx_k dy_l dz_m = \iiint \frac{i}{\Delta v_{k,l,m}} (x_k - x_s) \delta(y_l - y_s) \delta(z_m - z_s) dx_k dy_l dz_m = i(x_s, y_s, z_s) \quad (42)$$

Basándonos en el teorema de Green, la integral de volumen puede expresarse de la siguiente forma:

$$\iiint_{\Delta v_{k,l,m}} \nabla \cdot [\sigma \nabla \phi] dv = \iint_{S_{k,l,m}} \sigma \frac{\partial \phi}{\partial \eta} ds \quad (43)$$

Entonces la ecuación 42 puede representarse de forma tal que:

$$\iint_{S_{k,l,m}} \sigma(x, y, z) \frac{\partial \phi(x, y, z)}{\partial \eta} ds_{k,l,m} = -i(x_s, y_s, z_s) \quad (44)$$

Partiendo de la ecuaciones 43 y 44, el factor $S_{(k,l,m)}$ corresponde a la superficie que encierra el volumen $\Delta v_{k,l,m}$. Es así que la integral de superficie de la ecuación 43 se subdivide en 6 sub-superficies, según Dey y Morrison (1979). Se puede observar mejor la distribución del modelo de subdivisiones en la figura 13.

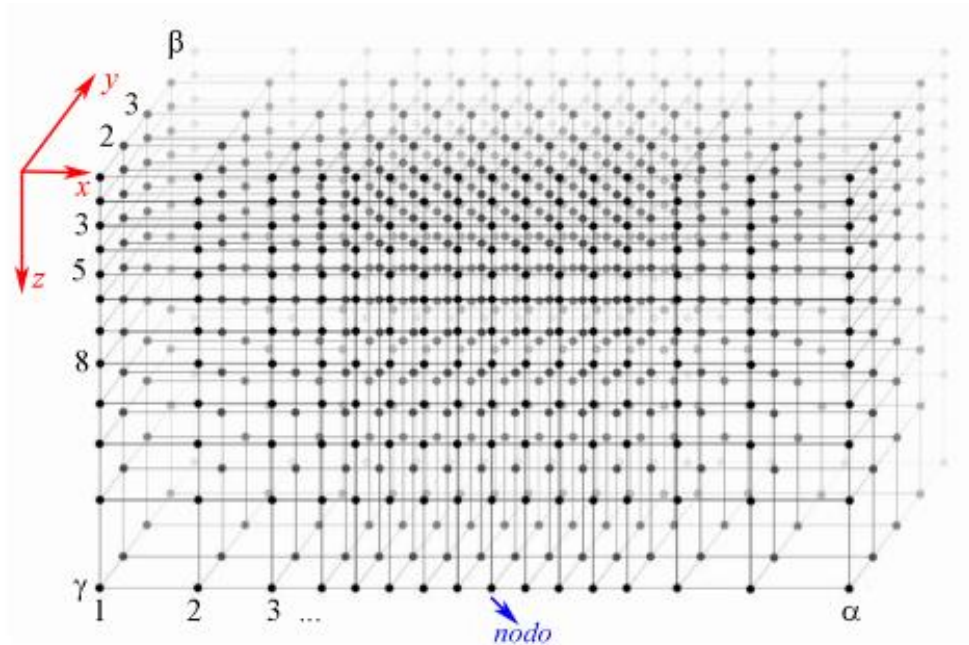


Figura 13. Esquema de malla tridimensional empleado por el método de diferencias finitas para la resolución del problema directo (Grajales, 2012).

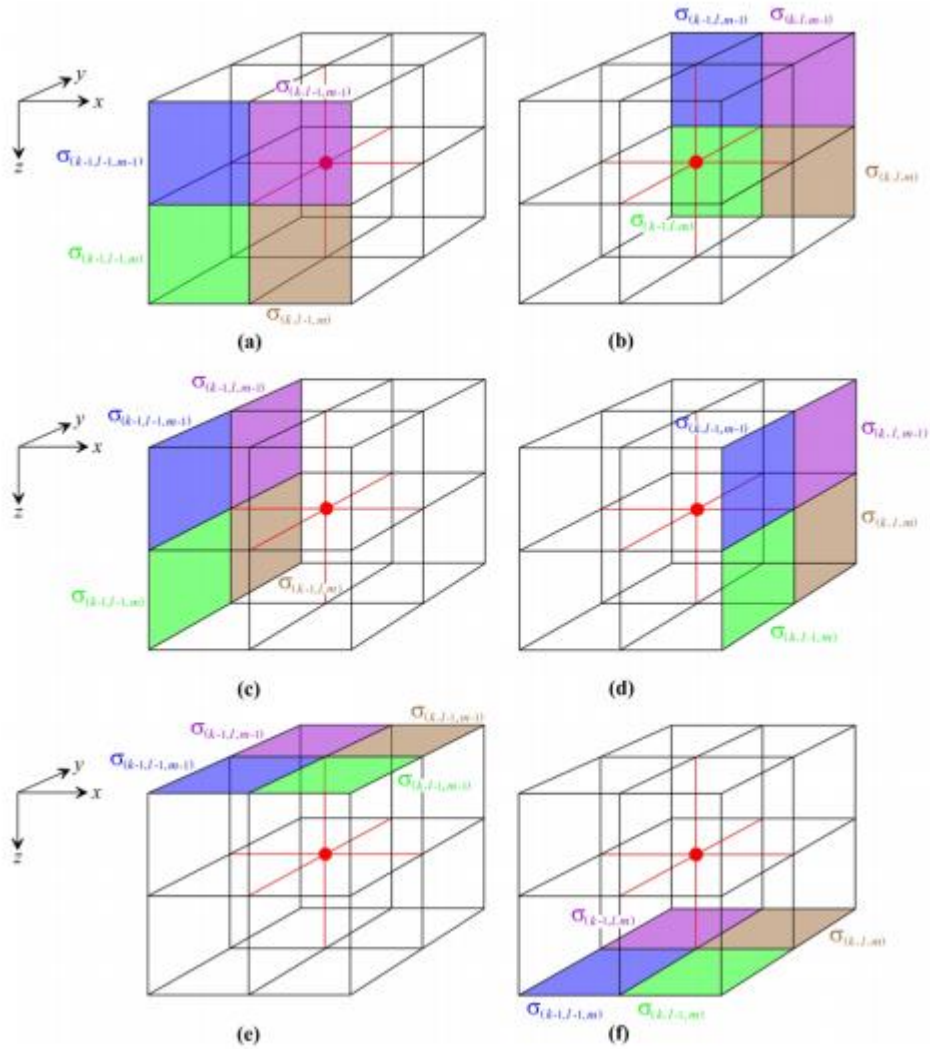


Figura 14. Distribución de la conductividad eléctrica en las superficies de las caras (a) frontal, (b) posterior, (c) izquierda, (d) derecha, (e) superior e (f) inferior del bloque cuyo nodo central corresponde a la coordenada (k, l, m) (Grajales, 2012).

De acuerdo con Dey y Morrison (1979), la aproximación de $\frac{\partial \phi}{\partial \eta}$, para un nodo de la malla discretizada (figura 14), basándonos en la diferencia central y en la integración de los límites de cada cara en el volumen elemental $\Delta v_{k,l,m}$, se expresa de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
\iint_{S_{k,l,m}} \sigma_{k,l,m} \frac{\partial \phi_{k,l,m}}{\partial \eta} dS_{k,l,m} &= C_{frontal}^{k,l,m} \phi_{k,l-1,m} + C_{post}^{k,l,m} \phi_{k,l+1,m} + \\
C_{izq}^{k,l,m} \phi_{k-1,l,m} + C_{der}^{k,l,m} \phi_{k+1,l,m} + C_{sup}^{k,l,m} \phi_{k,l,m-1} + C_{inf}^{k,l,m} \phi_{k,l,m+1} + \\
C_P^{k,l,m} \phi_{k,l,m} &= -i\delta(x_k - x_s)\delta(y_l - y_s)\delta(z_m - z_s) \quad (45)
\end{aligned}$$

Donde C representa el término de acoplamiento dado en función de la geometría del sistema y del valor que toma la conductividad eléctrica. La ecuación diferencial 45 nos facilita los coeficientes o términos de acoplamientos para cada nodo derivado a partir de la cada condición de frontera. Estos nodos según cada ecuación diferencial los podemos agrupar en una forma matricial de capacitancia. Es por ello, que de acuerdo a Dey y Morrison (1979), estas ecuaciones simultáneas pueden expresarse de la forma siguiente para cada malla:

$$C\phi = \zeta \quad (46)$$

Donde ahora C es la matriz de capacitancia y solo se expresa en términos de la función de su geometría y de la conductividad eléctrica en la malla. Los vectores ζ y ϕ para (46) contienen los términos de la fuente de inyección de la corriente eléctrica y (2) corresponde a la soluciones desconocidas del potencial total de los nodos. Con base a lo propuesto por Dey y Morrison (1979) para varias localizaciones de la fuente de corriente, la matriz C de capacitancia puede ser inalterada y cualquier descomposición simple nos facilita cantidades de soluciones de vectores de ζ .

2.5.2. Solución del problema inverso

Como se había señalado anteriormente, contrario al problema directo, en el que se propone un modelo (que contenga información característica del subsuelo) y se calcula la respuesta de ese modelo y de los parámetros que lo caracterizan y se comparan con los datos (valores de campo), en el problema inverso se parte de un modelo inicial, que contiene los datos e información de campo y se intenta llegar al modelo que mejor ajuste a los datos o valores de campo.

El problema inverso construye un modelo razonable del subsuelo a partir de las pseudosecciones de resistividades aparentes obtenidos del terreno. Es decir, a partir de los valores de resistividad aparente medidos en superficie, se obtiene una aproximación de la distribución de resistividades del subsuelo (Solana, 2014).

Esto es necesario debido a que las estructuras que conforman la tierra en realidad resultan ser muy complejas. Un solo estrato contiene tanta heterogeneidad, que si se obtuviera una imagen en 2D ó 3D, se podrían observar claros contrastes de resistividades en una sola capa. Estos contrastes pueden variar desde valores muy pequeños a muy grandes, ya que, en algunos casos, estas estructuras pueden poseer fracturas, porosidad variable, laminaciones o saturación de fluidos (Vences, 2013).

Una vez que se genere la imagen ya sea en 2D ó 3D, partiendo de las resistividades aparentes, también se hace necesario calcular las resistividades verdaderas de las capas que

posea el suelo, por esta sencilla razón es necesario encontrar una relación entre las resistividades aparente y las resistividades verdaderas, situación que es muy complicada. Para encontrar dicha relación debemos tratar un problema de inversión. La teoría de la inversión es un conjunto de técnicas matemáticas que permiten encontrar una solución útil del mundo físico a partir de inferencias logradas de las observaciones (Menke, 1989). En el ámbito de la prospección geofísica, estas observaciones representan los datos obtenidos a partir de las mediciones de campo. La solución del problema inverso consiste en que partiendo de este conjunto de datos se busca un modelo que dé una respuesta similar a la de los valores medidos. Este modelo es una forma idealizada matemáticamente de una porción del subsuelo. En el estudio para generar una tomografía eléctrica, el conjunto de las resistividades aparentes va a representar los datos, y las resistividades verdaderas serán los parámetros (Vences, 2013).

Las técnicas de inversión que existen hoy día se pueden clasificar en dos grandes grupos: Block inversión method y Smoothness- constrained inversión method.

La técnica de inversión robusta ofrece buenos resultados para situaciones donde el terreno presente grandes contrastes de resistividades, es decir que tengamos regiones en donde la resistividad sea homogénea, y a su vez muy diferenciada con respecto a las regiones adyacentes. Por el contrario, el método de inversión suave es en realidad el método de inversión óptimo para el análisis de problemas donde tengamos variaciones graduales de resistividades en el terreno. Esta última técnica fue la que se empleó en este trabajo para el

análisis de los datos obtenidos en el campo; este modelo está basado en el de “Gauss-Newton least-squares method”.

Contexto teórico del problema inverso en 3D

La inversión no tiene una solución única (no unicidad), en otras palabras, puede optar por múltiples soluciones que satisfacen las mismas medidas obtenidas dentro de un rango prescrito (Lines y Treital, 1984). Como ya hemos mencionado anteriormente, el objetivo es extraer los parámetros del modelo calculado partiendo de la respuesta del modelo de los datos medidos en el campo (Grajales, 2012, p.67).

Partimos de un conjunto l de medidas de resistividades eléctricas aparente, que podemos expresar en forma de un vector columna:

$$\mathfrak{d} = (d_1, d_2, d_3, \dots, d_l)^T \quad (47)$$

De acuerdo a (Loke, 2002) también se puede escribir como:

$$\mathfrak{f} = (f_1, f_2, f_3, \dots, f_l)^T \quad (48)$$

A partir de estos dos modelos en forma de vectores columna, se puede asociar con la función de los parámetros (\mathcal{P}) que representan los elementos del vector (m):

$$m = (m_1, m_2, m_3, \dots, m_{\mathcal{P}})^T \quad (49)$$

Donde T es la traspuesta de la matriz (m) . Partiendo del modelo inicial dado por m_j^{in} , donde $j = 1, 2, 3, \dots, \mathcal{P}$ y la respuesta de ese modelo inicial será f^{in} . Si dicha respuesta representa una función lineal de los parámetros del modelo, se podría representar como una expansión de Taylor de primer orden, a la perturbación de la respuesta del modelo sobre m_j^{in} descrita como:

$$\bar{f} = f^{in} + \sum_{j=1}^{\mathcal{P}} \frac{\partial f}{\partial m_j} \Big|_{m=m^{in}(m_j-m_j^{in})}$$

En forma de matriz se puede expresar de la siguiente manera:

$$\bar{f} = f^{in} + J\Delta m \quad (50)$$

Donde J representa una matriz Jacobiana $l \times \mathcal{P}$ de las derivadas parciales que provienen de los siguientes elementos:

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial m_j} \quad (51)$$

El término Δm con elementos Δm_j en la ecuación 50 representa el vector de cambio de parámetros. Este pequeño cambio en los parámetros m_j representa una estructura matemática importante, por ello el cambio que se lleva a cabo en \mathbf{m} se realiza para minimizar los errores en la suma de los cuadrados entre la respuesta del modelo y los datos

obtenidos de campo. Es evidente que es necesario definir el vector error como ($\vec{\epsilon}$) que corresponde la diferencia vectorial escrita de la siguiente forma: (Grajales, 2012, p. 68)

$$\vec{\epsilon} = \vec{f} - \vec{d} \quad (52)$$

Luego combinamos las ecuaciones 50 y 52 para obtener:

$$\vec{d} - \vec{f}^{in} = J\Delta m + \epsilon \quad (53)$$

Donde el vector que representa la diferencia entre la solución del modelo inicial y los datos de campo estará en el miembro izquierdo de la ecuación 55, el cual se conoce como *vector de discrepancia*. Dicho vector estará representado por la letra \vec{g} , de la forma:

$$\vec{g} = \vec{J}\Delta m + \vec{\epsilon} \quad (54)$$

Esta ecuación por aproximación de mínimos cuadrados de Gauss-Newton intenta que el vector cambio de parámetros Δm y el error cuadrado acumulativo $\epsilon^T \epsilon$ sean mínimos. Esto queda demostrado en la siguiente ecuación: (Grajales, 2012, p. 69)

$$\begin{aligned} \epsilon^T \epsilon &= (g - J\Delta m)^T (g - J\Delta m) \\ &= g^T g - g^T J\Delta m - J^T \Delta m^T g - J^T \Delta m^T J\Delta m \end{aligned} \quad (55)$$

Al realizar la diferencia de esta ecuación en base al Δm se encuentran de forma matricial sus ecuaciones normales, expresadas a continuación:

$$J^T J\Delta m = J^T g \quad (56)$$

$$\Delta m = \frac{J^T g}{J^T J} \quad (57)$$

Esta ecuación, de acuerdo con Lines y Treitel (1984), representa la solución de Gauss-Newton. Sin embargo, esta ecuación es muy poco usada para resolver problemas de inversión. En la búsqueda por encontrar otras posibles soluciones desde los años 70 se han desarrollado diferentes técnicas a problemas de inversión, como lo son el gradiente conjugado, entropía máxima, recocido simulado, entre otras, y una muy importante es el método de optimización por mínimos cuadrados regularizado. Esto lo expresa muy bien Loke *et al.* (2013):

Este método de optimización se basa en dos versiones, de restricciones diferentes:

- (1) El mínimo cuadrado de suavizado forzado o smoothness-constraint least-square method, de Groot-Hedlin y Cosntable (1990). Este método hace que la suma de los cuadrados que se enfocan en los cambios espaciales que se encuentran en el modelo de resistividad y en los datos desajustados, sea mínima. Entonces la ecuación de optimización de esta versión en especial estará dada por:

$$(J_i^T J_i + \chi_i \mathfrak{M}^T \mathfrak{M}) \Delta m_i = J_i^T g_i - \chi_i \mathfrak{M}^T \mathfrak{M} m_{i-1} \quad (58)$$

Donde m_{i-1} es el logaritmo de los valores de resistividades del modelo relacionado con el vector de parámetros dentro del modelo de la iteración obtenida previamente. La X es el factor de amortiguamiento y la \mathfrak{M} es un filtro de asperezas, en el que se basa esta versión para que dichas asperezas sean mínimas.

- (2) La segunda versión de optimización es el método de inversión robusta. Esto no es más que una distribución exponencial del error de los datos y trata que las sumas de los valores absolutos de los datos desajustados sean mínimos, de acuerdo con Claerbout y Muir (1973). Este método es poco sensible a los datos atípicos en los valores medidos correspondientes, según Loke *et al* (2013) y Leroux y Dahlin (2006). Esta evidencia lleva a que el mismo modelo produzca límites definidos que dividan las zonas donde existe resistividad constante, hecho que no es evidente en el método de inversión suave. El modelo matemático para la inversión robusta se expresa de la siguiente forma:

$$(J_i^T \mathcal{R}_a J_i + \chi_i \mathfrak{M}^T \mathcal{R}_b \mathfrak{M}) \Delta m_i = J_i^T \mathcal{R}_a g_i - \chi_i \mathfrak{M}^T \mathcal{R}_b \mathfrak{M} m_{i-1} \quad (59)$$

Donde, \mathcal{R}_a y \mathcal{R}_b son las matrices de ponderación agregadas, de tal forma que cada elemento diferente de los valores desajustados y de los vectores asperezas de ese modelo sea casi igual a la ponderación del proceso de inversión. En este estudio se empleó el primer modelo de optimización, el modelo de inversión suave para aplicar la distribución de los valores de resistividad eléctrica calculados y compararlos con las tomografías realizadas en el lugar de estudio.

Capítulo 3

Metodología

3.1 Delimitación del área de estudio

El lugar donde se realizó este trabajo de prospección eléctrica fue en el patio principal del Convento de los Jesuitas, ubicado en el Conjunto Monumental Histórico de Panamá Viejo. El área principal de estudio donde se realizaron las mediciones eléctricas está ubicada en la parte lateral de la estructura principal en una pequeña sección que comunicaba con los diferentes anexos dentro del convento, como se indica en la figura 15.



Figura 15. Muestra el patio principal del Convento de la Compañía de Jesús.

Empleando el arreglo electródico Wenner-alfa, los electrodos fueron colocados lateralmente uno a lado del otro, empezando desde el borde de la grava que se encuentra en

el lugar de estudio hasta completar todos los 48 electrodos enterrados en el suelo (ver figuras 16 y 17).



Figura 16. Muestra cómo se colocaron los electrodos en el suelo, para la toma de datos.



Figura 17. Muestra parte de los límites del área de estudio.

3.2 Ubicación de las tomografías eléctricas

Para las tomografías de prospección eléctrica se seleccionó un área en el interior del Convento de los Jesuitas. Luego, para trazar los perfiles se cuadrículó el área de estudio y se logró así una malla fina donde se observa claramente las tomografías. Para la inyección de la corriente eléctrica se usó una batería de 12 voltios y se colocaron 48 electrodos, separados 50,0 cm entre sí y 1,0 m de separación entre cada tomografía. Los datos obtenidos fueron extraídos inmediatamente en el campo para ser analizados in situ, y así conocer la calidad de los mismos y si fuese necesario, repetir las mediciones.

3.3 Dispositivo y toma de datos

3.3.1 Generalidades del equipo Syscal R1 + Switch 48 empleado

La línea de medidores de resistividad Syscal comprende una gama de instrumentos especializados que se diferencian en la cantidad de poder que transmiten. El dispositivo empleado para el estudio fue el Syscal R1 + Switch 48 (figura 18); es un dispositivo para la prospección eléctrica totalmente automático creado por Iris Instruments. Está diseñado para la exploración del suelo utilizando corriente eléctrica directa. Se puede emplear tanto para el estudio de sondeos verticales (a profundidad) como en tomografías de resistividad eléctrica a lo largo de un determinado perfil y en la determinación de la polarización inducida del suelo. Es importante resaltar que utiliza una fuente externa de 12 V que alimenta el circuito y que se emplea como corriente eléctrica de inyección (Grajales, 2012, p. 49).

La medición es automática, controlada por un microprocesador que comprende la corrección de auto potencial y de rango automáticamente. Esto permite un mayor control en el almacenamiento digital de datos por su calidad en la señal, y además nos muestra la visualización de error en caso de problemas de procedimiento. La memoria interna puede almacenar información completa sobre parámetros de corriente, voltaje, resistividad, la configuración de los electrodos y número de estaciones empleadas. Un enlace en serie permite la transferencia de datos a una computadora para analizar e interpretar los datos de estudio.

Este dispositivo es muy versátil por su capacidad de incorporar 48 multielectrodos de 5,0 a 10,0 metros de espaciado, con 2 canales enumerados 1 a 24 y de 25 a 48, donde se conectan todos los electrodos que se requieran para el estudio. Este transmisor genera pseudo-secciones de resistividades eléctricas aparentes. Además, posee otras especificaciones técnicas, como su peso 10-12,5 kg con baterías interna, sus dimensiones de 31cmx21cmx21 cm de largo-ancho-altura; posee una carcasa de fibra de vidrio, resistente a la intemperie. Tiene un voltaje máximo de salida de 600 V, con una potencia máxima de 200 W. Además, incluye una corriente eléctrica máxima de salida de 2 500 mA . Este dispositivo también rechaza el ruido en la línea de potencia, corrige la deriva lineal SP. Utiliza un enlace serial que permite determinar cada punto medido almacenado en la memoria (Grajales, 2012, p. 49).



Figura 18. Dispositivo Syscal R1 + Switch 48 empleado en este estudio.

La figura 18 nos muestra el modelo del dispositivo Syscal R1 + Switch 48, que se utilizó para realizar la toma de datos y generar las diferentes tomografías del área del claustro. Cabe destacar que este dispositivo también puede usarse de manera remota, de tal forma que se pueden controlar todas sus funciones sin necesidad de estar cerca del equipo.

La confiabilidad y la precisión de este medidor de resistividad Syscal representa una ventaja para la evaluación, detección y análisis de diferentes problemas de aplicación en determinadas áreas de estudio, por ejemplo, en recursos de agua (evaluar características del nivel freático, caracterizar la extensión de la cuña de agua salada en aguas subterráneas...), en el medio ambiente (detectar fugas y monitorear la degradación en la eliminación de desechos, ubicar imágenes de estructuras enterradas); además de aplicarse en ingeniería civil para resolver problemas sobre la determinación de la profundidad de los lechos rocosos

y las diferentes resistividades en las capas del suelo que lo componen (Grajales, 2012, p. 50).

3.3.2 Toma de datos: generación de pseudo-secciones de resistividades aparentes

Realizamos tomografías 2D paralelas empleando el arreglo Wenner-Alfa, que consiste en un conjunto de electrodos que se disponen en forma de cuadripolo. Esta configuración electrónica garantiza mayor precisión en los datos al momento de levantar los perfiles.

Se desarrollaron 23 tomografías paralelas de resistividad eléctrica 2D, de 23,5 m de longitud, separadas 1,0 m entre sí, con separación entre electrodos de 0,50 m, empleando el arreglo electrónico Wenner-Alfa. El mismo se caracteriza por presentar una buena resolución y una profundidad de investigación intermedia, además, la misma garantiza mayor precisión en los datos. El sistema fue configurado de tal forma que se garantizara la calidad de los datos mediante ensayos repetitivos y un tiempo de ciclo de 500,0 ms.

Es decir, la resistividad aparente medida asociada a un par de electrodos de corriente AB y a un par de electrodos de potencial MN, se representa en la intersección de dos líneas, cada una de ellas formando un ángulo de 45° con la superficie del terreno y pasando a través del centro de los pares de electrodos. Este procedimiento se repite cada par de electrodos actuales y potenciales (Everett, 2013).

Es decir, el electrodo de corriente A_1 es desplazado a la segunda posición, el segundo electrodo de potencial (M_1) a la tercera posición, el tercer electrodo de potencial (N_1) a la

cuarta posición y el cuarto electrodo de corriente (B_1) a la quinta posición. En esta nueva posición se empieza un nuevo proceso de inyección y al cálculo de la resistividad eléctrica aparente del subsuelo. Esta mecánica se repite hasta que el último electrodo de corriente (B_1) ocupe la última posición del perfil que se está estudiando. De esta manera se obtiene la información del primer nivel de profundidad ($n = 1$). Para el segundo nivel ($n = 2$) se repiten los pasos mencionados con anterioridad, pero con una separación mayor entre los electrodos que forman el cuadrupolo representado en la figura 19 (Grajales, 2012, p. 52).

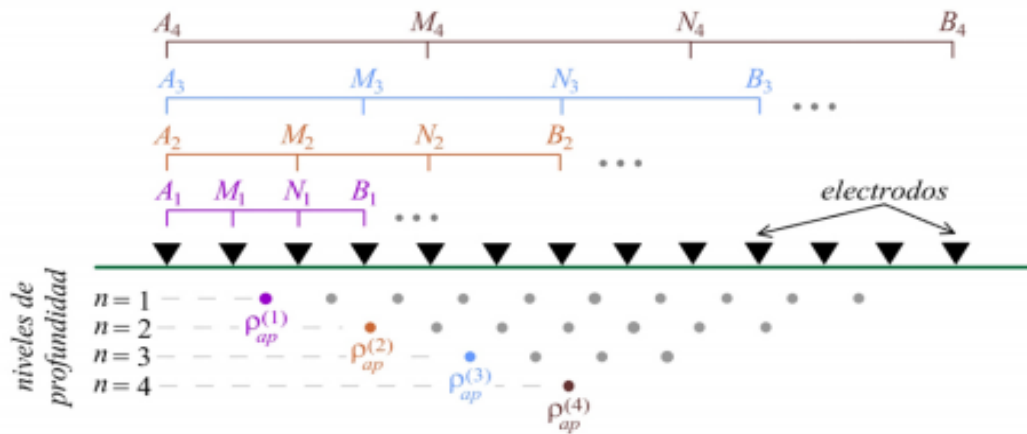


Figura 19. Secuencia de mediciones para la construcción de pseudo-secciones de resistividades eléctricas aparentes (Grajales, 2012).

La pseudo sección resultante proporciona una indicación aproximada de la verdadera resistividad del subsuelo, ya que la sensibilidad máxima a la estructura del suelo de una medición de voltaje dada se produce cerca del punto medio de la configuración de cuatro

electrodos, a una profundidad de aproximadamente la mitad de la separación del par de electrodos de potencial actual (Everett, 2013).

Los datos de campo fueron extraídos y posteriormente tratados mediante programas especiales. Se analizaron las pseudo-secciones o representación gráfica de los datos de campo en términos de una pseudo-profundidad, para cada perfil, y se realizaron las correcciones necesarias. Posteriormente fueron tratados, procesados y finalmente modelados.

Capítulo 4

Resultados, Análisis e Interpretación

4.1. Los programas **EarthImager 3D** y **Res3Dinv**

El software de inversión de pseudo-secciones de resistividad eléctrica aparente **EarthImager 3D** de *AGI Advanced*, realiza un complejo proceso de inversión de los datos adquiridos en superficie, presentando al final un volumen 3D de datos de resistividad eléctrica calculados o en mapas horizontales y/o verticales de la distribución espacial de este parámetro.

El programa **Res3Dinv**, de *Geotomo Software*, emplea un conjunto de códigos capaces de realizar la inversión tridimensional de una cantidad considerable de datos. Este programa utiliza el método de mínimos cuadrados regularizado con el fin de invertir la data disponible, sin embargo, si se dispone de la información geológica y otros datos geomorfológicos de la zona de interés, se podrían utilizar dos restricciones de este método: el de mínimos cuadrados con restricción suave y el robusto. En este trabajo se utilizó la inversión por mínimos cuadrados suaves, con ambos softwares y los datos invertidos fueron desplegados en mapas horizontales, producto de un proceso de interpolación (x , y) a diferentes profundidades, con el objetivo de visualizar la distribución espacial de aquellas anomalías de resistividad eléctrica calculada (parámetros del modelo) que podrían estar asociadas a los límites del claustro del convento bajo estudio.

4.2 Resultados de la inversión suave mediante EarthImager 3D

Los 7 161 valores de resistividad eléctrica aparente medidos en campo fueron sometidos al proceso de inversión suave empleando el programa EarthImager 3D, obteniéndose un error RMS de 22,6 % para un total de 2 iteraciones. De este proceso se obtuvo un total de 28 952 valores de resistividad eléctrica calculada (parámetros del modelo). La figura 20 presenta un gráfico doblemente logarítmico de los valores de resistividad eléctrica aparente calculada (respuesta del modelo) en función de los valores de resistividad eléctrica aparente medida (datos de campo).

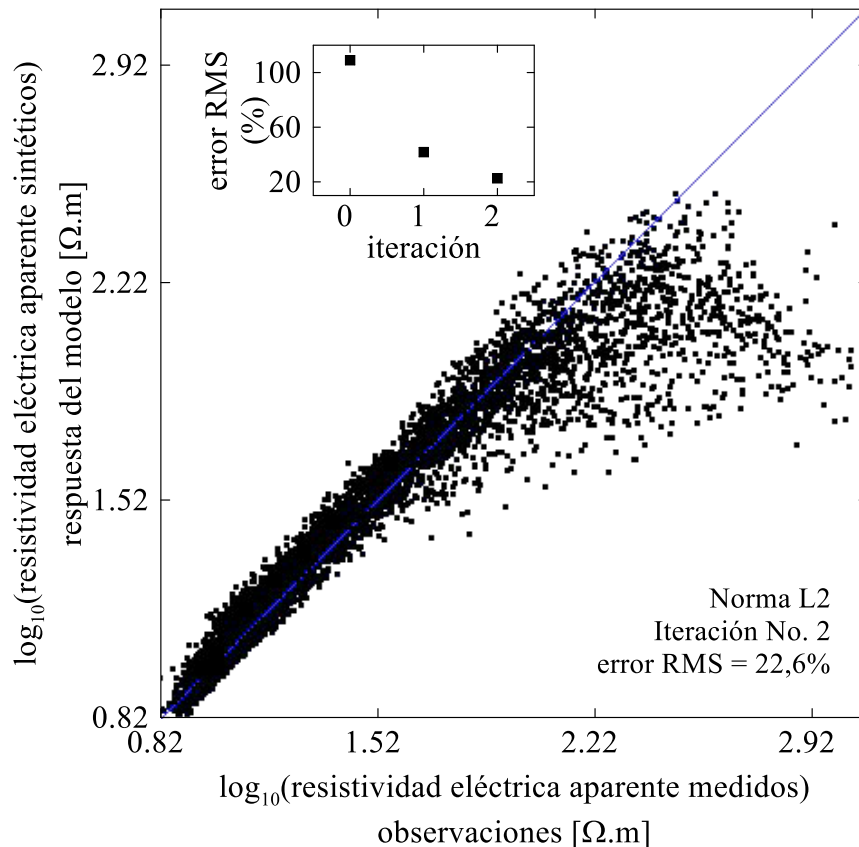


Figura 20. Gráfico doblemente logarítmico de los valores de resistividad eléctrica aparente sintéticos en función de los valores de resistividad eléctrica aparente medidos.

A pesar de existir un porcentaje alto de valores de resistividad eléctrica aparente que se concentran a lo largo de la línea azul, el código 3D parece presentar una alta sensibilidad a los valores elevados de resistividad eléctrica que se concentran en el horizonte superficial del sitio, de ahí la distribución un tanto aleatoria que logra observarse para valores elevados de resistividad eléctrica aparente medidos.

Los valores de resistividad eléctrica calculada o parámetros del modelo (valores reales de resistividad eléctrica del subsuelo) son presentados en un arreglo numérico de columnas (x , y , z , ρ) para todo el espacio prospectado. Hemos utilizado el programa Voxler (de Golden Software) para llevar a cabo la interpolación 3D y realizar varias representaciones de esta importante data (ver figura 21). A continuación, las interpretaciones:

- El primer mapa horizontal (figura 21), ubicado a una profundidad de 0,18 m, muestra un total de 4 conjuntos de fuertes anomalías eléctricas, cuyos valores se extienden desde los 129,0 Ω .m hasta 509,0 Ω .m y con tonalidades en verde, rojo y café. Si dividimos la zona de prospección en dos ejes perpendiculares (a modo de plano cartesiano con el centro de coordenadas en la parte central del área), podremos ver que cada conjunto se concentra casi de forma simétrica en cada cuadrante, separados por dos anomalías casi lineales y perpendiculares en tonalidades azul y violeta ubicadas a lo largo de cada eje y con un rango de valores de resistividad eléctrica calculada que oscila entre 3,0 Ω .m y 129,0 Ω .m. Este par de anomalías eléctricas perpendiculares corresponden a unos alineamientos de grava que fue

colocada sobre la superficie del terreno con el objetivo de ofrecer una mejor vista al área; en resumen, el suelo expuesto (sin grava) correspondiente a los cuadrantes se encontraba más seco y por ende, su resistividad eléctrica calculada era elevada. Por el contrario, el suelo que se encontraba por debajo de la grava se caracterizó por presentar un rango de valores intermedios de resistividad calculada, posiblemente por presentar un menor nivel de evaporación. Las anomalías de alta resistividad eléctrica calculada (representadas en tonalidad roja y café) podrían estar asociadas a rasgos arqueológicos del convento. Llama fuertemente la atención la anomalía circular que aparece entre las posiciones $x = 5,0$ m y $10,0$ m, $y = 12,0$ m y $16,0$ m. Esta anomalía parece extenderse hasta los $0,88$ m de profundidad.

- Para el segundo mapa (figura 21), ubicado a una profundidad de $0,32$ m los patrones de alta resistividad eléctrica ($> 383,0 \Omega.m$) se repiten, pero en menor intensidad. A pesar del patrón repetitivo que presenta este mapa horizontal, la anomalía existente en el extremo Oeste del área prospectada no presenta interrupciones, por lo que es posible que el mismo se encuentre asociado a los límites del claustro que caracteriza al convento.
- En el tercer mapa (ubicado a $0,45$ m de profundidad, figura 21), las anomalías de resistividad eléctrica identificadas en los mapas anteriores presentan una menor intensidad, sin embargo, las anomalías puntuales ubicadas en los extremos del mapa se mantienen y los alineamientos en tonalidad verde parecen definirse mejor.
- A la profundidad de $0,60$ m continúa disminuyendo la intensidad de las anomalías eléctricas contenidas en los cuadrantes dados, pero la geometría se conserva al igual

que las mostradas en el mapa ubicado a la profundidad de 0,74 m. Un dato importante es que hasta estas profundidades, las anomalías perpendiculares tienden a mantenerse.

- Finalmente, los mapas ubicados a las profundidades de 0,88 m; 1,05 m; 1,27 m y 1,47 m (figura 21) no muestran anomalías de interés; la resistividad eléctrica tiende a disminuir hasta llegar a los 3,0 Ω .m, probablemente debido a la presencia de humedad.

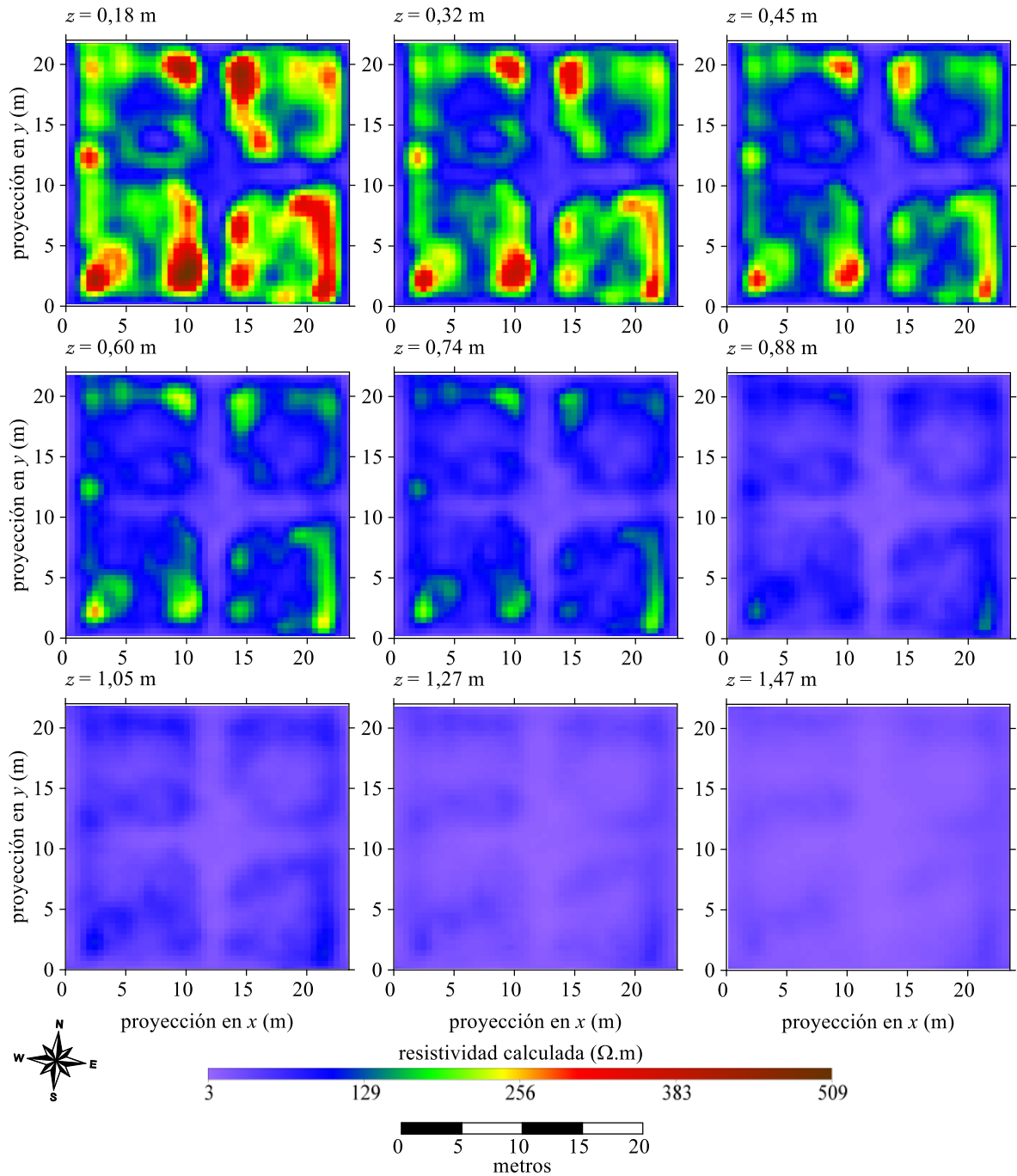


Figura 21. Mapas horizontales de valores de resistividad eléctrica calculada como resultado de la resolución del problema inverso utilizando la inversión suave del programa EarthImager 3D, para un total de 2 iteraciones y un error RMS de 22,6 %.

El efecto de la presencia de humedad a profundidades superiores a los 0,74 m puede visualizarse mejor a través de un conjunto de perfiles de resistividad eléctrica calculada, distribuidos perpendicularmente, tal como lo muestra la figura 22.

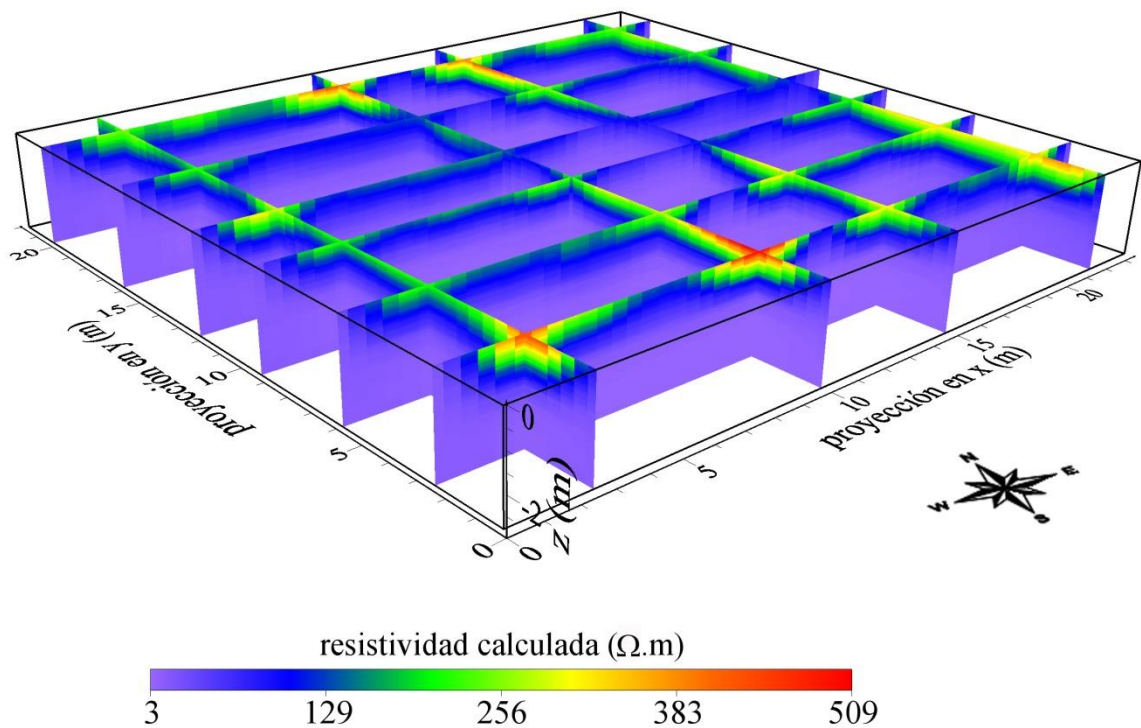


Figura 22. Distribución perpendicular de varios perfiles de resistividad eléctrica calculada en el área de interés, con el objetivo de visualizar las zonas de baja resistividad (en tonalidad violeta) con valores de $3,0 \Omega.m$.

Como puede observarse en este resultado, todas las anomalías eléctricas de alta resistividad se concentran a nivel superficial.

Por su parte, las anomalías superficiales se pueden visualizar con mayor detalle en la figura 23, ya que es posible con Voxler hacer transparentes aquellas anomalías que no son de interés, y como en la figura 21, los cuadrantes (a nivel superficial) logran exponer

alineamientos que son paralelos a los muros y por ende, muy probablemente ligados a los límites del claustro.

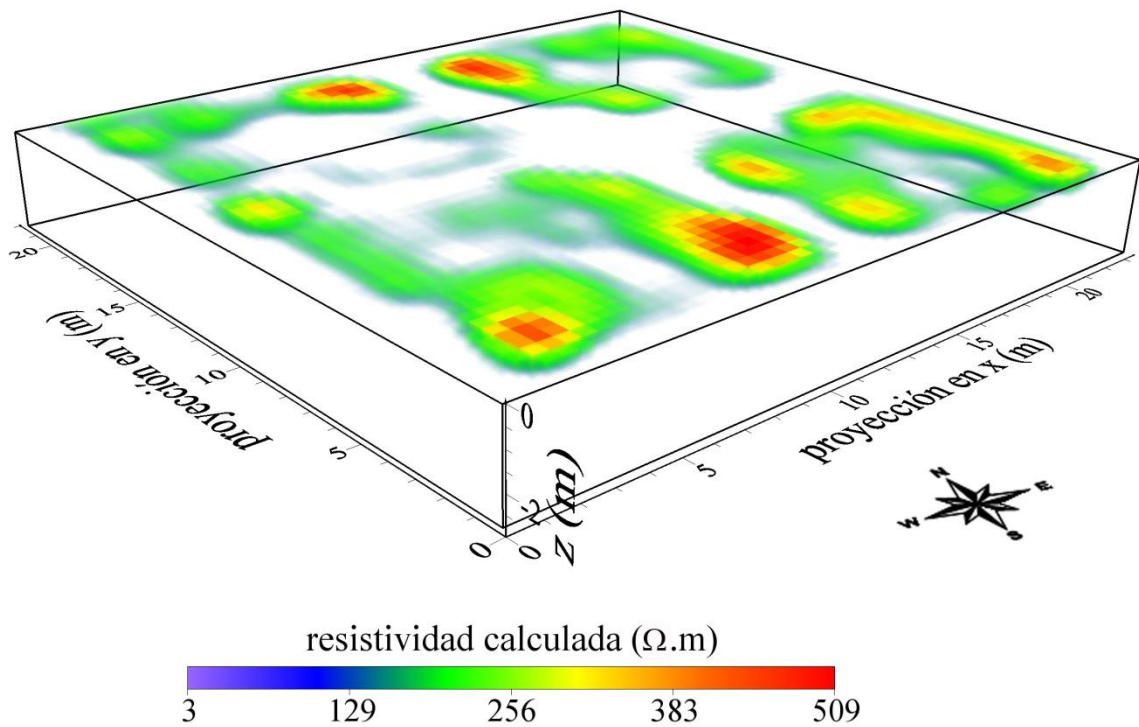


Figura 23. Distribución de las fuertes anomalías eléctricas ($> 383,0 \Omega.m$) identificadas en el área de estudio.

Con el objetivo de obtener una mejor representación de estos resultados experimentales, la figura 24 presenta los mapas horizontales en perspectiva. Para efectos de profundidad, de esta forma es más claro tener una mejor visualización de las principales anomalías eléctricas que podrían estar asociadas a rasgos arqueológicos enterrados.

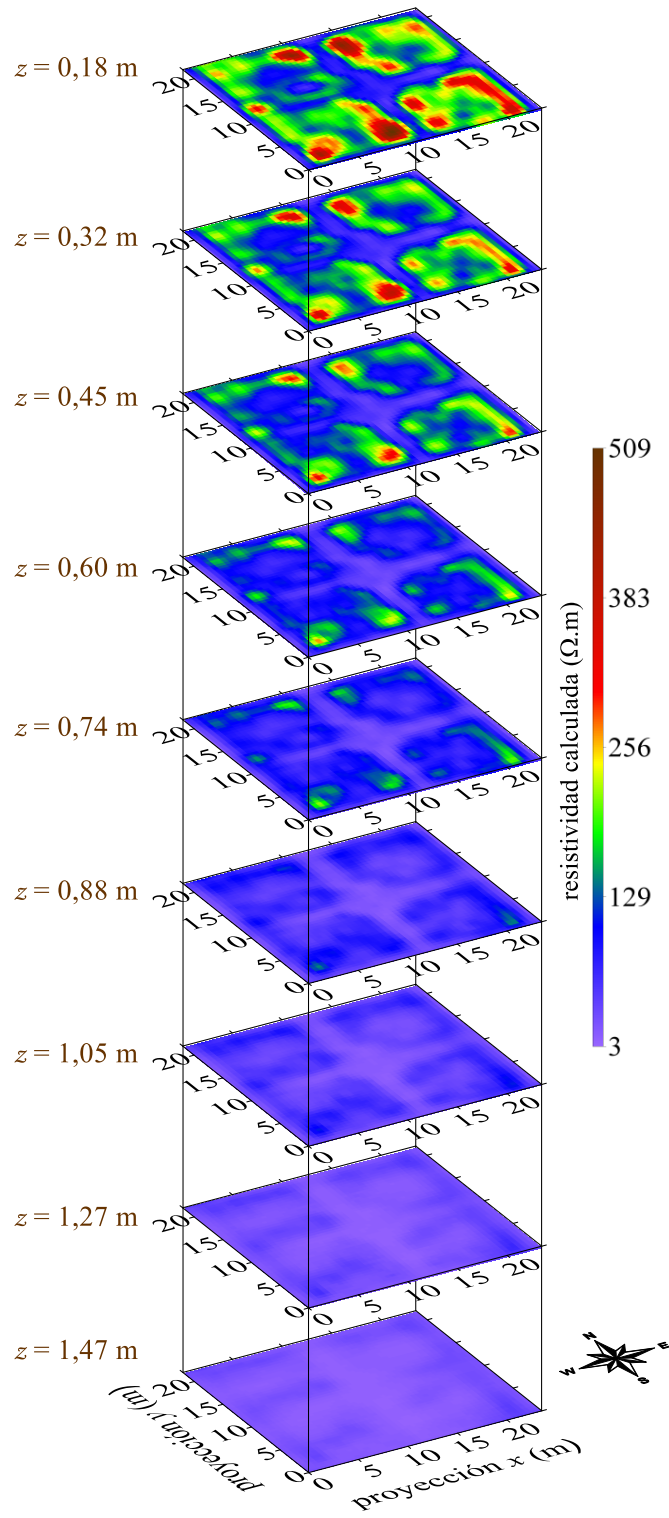


Figura 24. Representación en perspectiva de los mapas horizontales de la figura 21 obtenidos a través de la inversión suave del programa EarthImager 3D.

4.3 Resultados de la inversión suave mediante Re3Dinv

De igual forma que en el proceso anterior, el conjunto de 7 161 valores de resistividad eléctrica aparente medidos en campo fueron sometidos al proceso de inversión suave, empleando ahora el programa Res3Dinv teniendo en cuenta la reversión del eje y cuando se emplea el mismo. La resolución del problema inverso para este conjunto de datos mostró un error absoluto de 6,65 % para un total de 6 iteraciones. El resultado de este complejo proceso se presenta en la figura 25. A continuación, las interpretaciones:

- En el primer mapa horizontal (figura 25), ubicado a una profundidad de 0,25 m, se presenta un conjunto de fuertes anomalías eléctricas puntuales, cuyos valores de resistividad eléctrica oscilan entre 2 691 Ω .m y 13 000 Ω .m, con tonalidades en rojo y café. Este conjunto no se extiende sobre toda el área prospectada, más bien en las zonas Noroeste y Suroeste del sitio. Como en el resultado anterior, también se pueden identificar dos anomalías rectilíneas perpendiculares en tonalidad verde, con un rango de valores de resistividad eléctrica calculada que varía entre 40,0 Ω .m y 115,0 Ω .m. Las mismas inician en la parte central del área y se extienden hacia el Este y Sur, a diferencia del resultado anterior, donde sí se extendían a toda la zona. Como se mencionó anteriormente, dicho par de anomalías eléctricas perpendiculares se encuentran relacionadas a los alineamientos de grava que fueron colocados sobre la superficie del terreno. Es posible que las anomalías puntuales de alta resistividad eléctrica se encuentren asociadas a piedras y escombros depositados en el sitio de forma aleatoria. El suelo expuesto (sin grava) se caracteriza por

presentar valores elevados de resistividad eléctrica, mientras que el suelo ubicado por debajo de la grava, presentó valores intermedios de resistividad calculada.

- En el segundo mapa (figura 25), ubicado a 0,54 m de profundidad, existe menos presencia de anomalías eléctricas en tonalidades rojizas; sin embargo, las anomalías identificadas en el mapa superficial descrito anteriormente, siguen persistiendo en el mismo patrón, aún se mantiene en el sector central del área de interés, donde comienzan a aparecer anomalías eléctricas menos intensas, con resistividades eléctricas calculadas entre 24,0 Ω .m y 195,0 Ω .m. El mismo patrón se repite y prueba de ello es que en la parte Norte del mapa observamos una especie de anomalía rectilínea en tonalidad roja, que no se interrumpe por una anomalía que en el mapa anterior si aparece, sin embargo, se observa que la forma rectilínea se mantiene en la parte Norte del mapa. El mismo evento parece darse en la parte Este del mapa. Estas anomalías pueden estar asociadas a los límites del claustro.

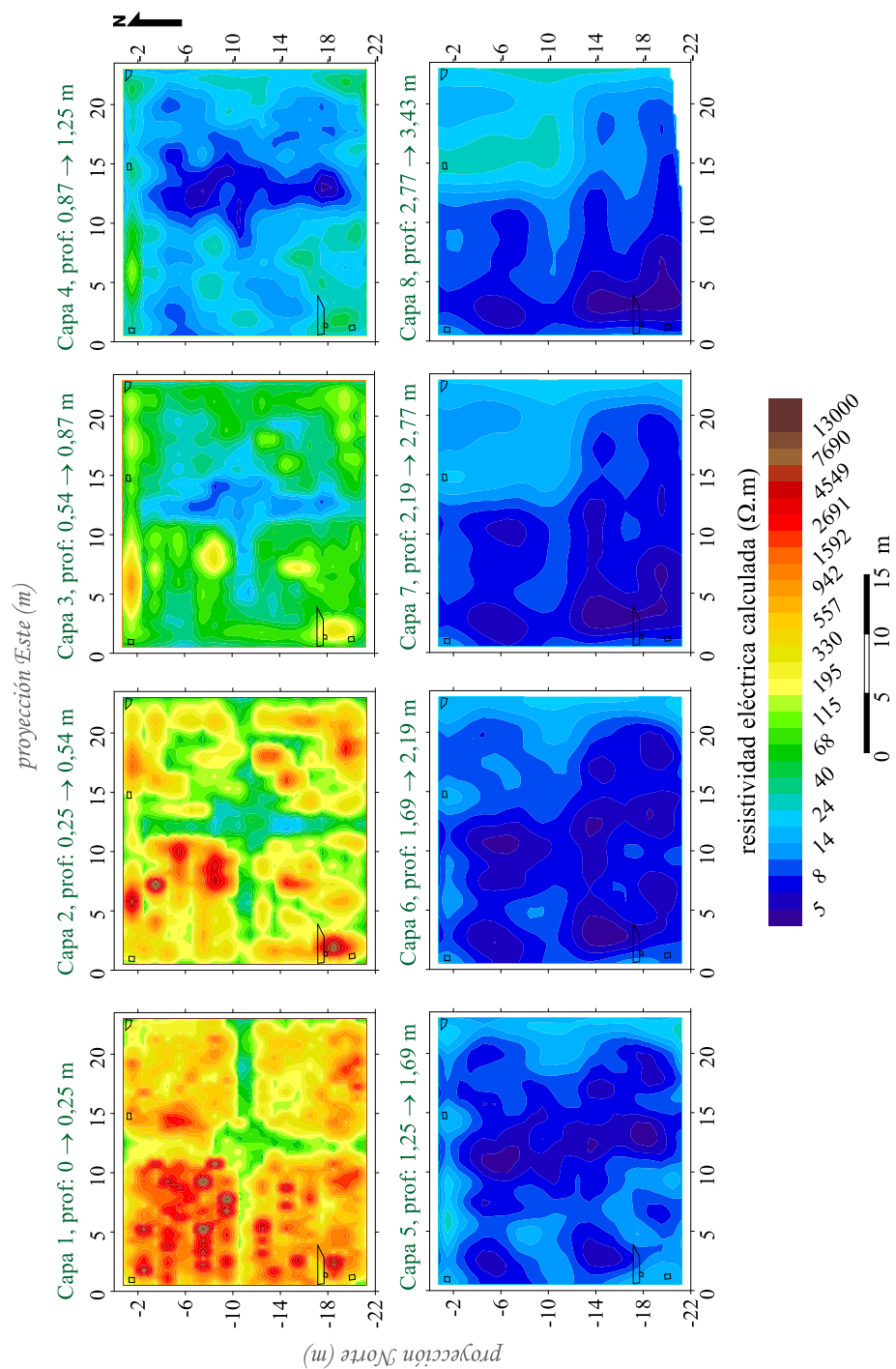


Figura 25. Mapas horizontales de valores de resistividad eléctrica calculada, como resultado de la resolución del problema inverso utilizando la inversión suave del programa Res3Dinv, para un total de 6 iteraciones y un error RMS de 6,65 %.

- En el tercer mapa que se encuentra 0,87 m de profundidad (figura 25), podemos visualizar que el conjunto de anomalías eléctricas lineales se sigue manteniendo, pero con resistividades eléctricas calculadas menos intensas, que van desde 195,0 Ω .m a 942,0 Ω .m. El patrón que observamos en la parte Norte de la zona que hemos descrito anteriormente, se mantiene linealmente con mayor claridad y no se interrumpe con la anomalía eléctrica que se forma en la parte central del mapa en tonalidades de resistividades eléctricas calculadas entre 8,0 Ω .m y 115,0 Ω .m, sigue siendo bastante consistente y claro con la profundidad anterior (mapa de la figura 21). Lo mismo ocurre en la parte Este; en la parte Sur no se identifica un alineamiento específico, ni tampoco en el Oeste. Sin embargo, el conjunto de anomalías eléctricas de la parte Sur y Oeste parecen relacionarse con el muro que aflora en el sitio.
- En el cuarto mapa (figura 25), ubicado a una profundidad de 1,25 m, las anomalías lineales que aparecen en el mapa anterior (figura 21) no se aprecian tan significativamente; sus valores de resistividades eléctricas calculadas están entre 40,0 Ω .m y 115,0 Ω .m, bien bajos. La mayor parte de este conjunto de anomalías que aparecen desde el primer mapa horizontal, a pesar de que ya no se aprecian con claridad en valores de resistividades calculadas entre tonalidades celestes y azules que más o menos están entre 5,0 Ω .m y 24,0 Ω .m, parecen asociarse a los límites del claustro tal y como se había descrito anteriormente.

- Por su parte, en los mapas que se encuentran a las profundidades de 1,69 m; 2,19 m; 2,77 m y 3,43 m, no se presentan patrones simétricos de anomalías eléctricas que se asocien a estructuras arqueológicas. El rango de resistividad eléctrica calculada es bajo, oscilando entre 5,0 Ω .m y 24,0 Ω .m, donde apreciamos que por la cercanía del sitio al mar probablemente presenta humedad a esas profundidades.

Cabe destacar que en este caso no se utilizaron las herramientas de interpolación de Voxler, debido a los elevados valores de resistividad eléctrica obtenidos en los horizontes superficiales; algunos de los algoritmos de interpolación 3D utilizados dieron por resultado valores negativos de resistividad eléctrica calculada, hecho que no es acorde con la realidad geológica del área bajo estudio. En esta fase del trabajo se emplearon entonces las herramientas de Surfer 12 (de Golden Software) con escala de contornos logarítmicos para realizar una mejor interpretación de los resultados.

Finalmente, y con el objetivo de obtener una imagen en perspectiva de estos resultados, la figura 26 ilustra los mismos mapas horizontales en una proyección 3D.

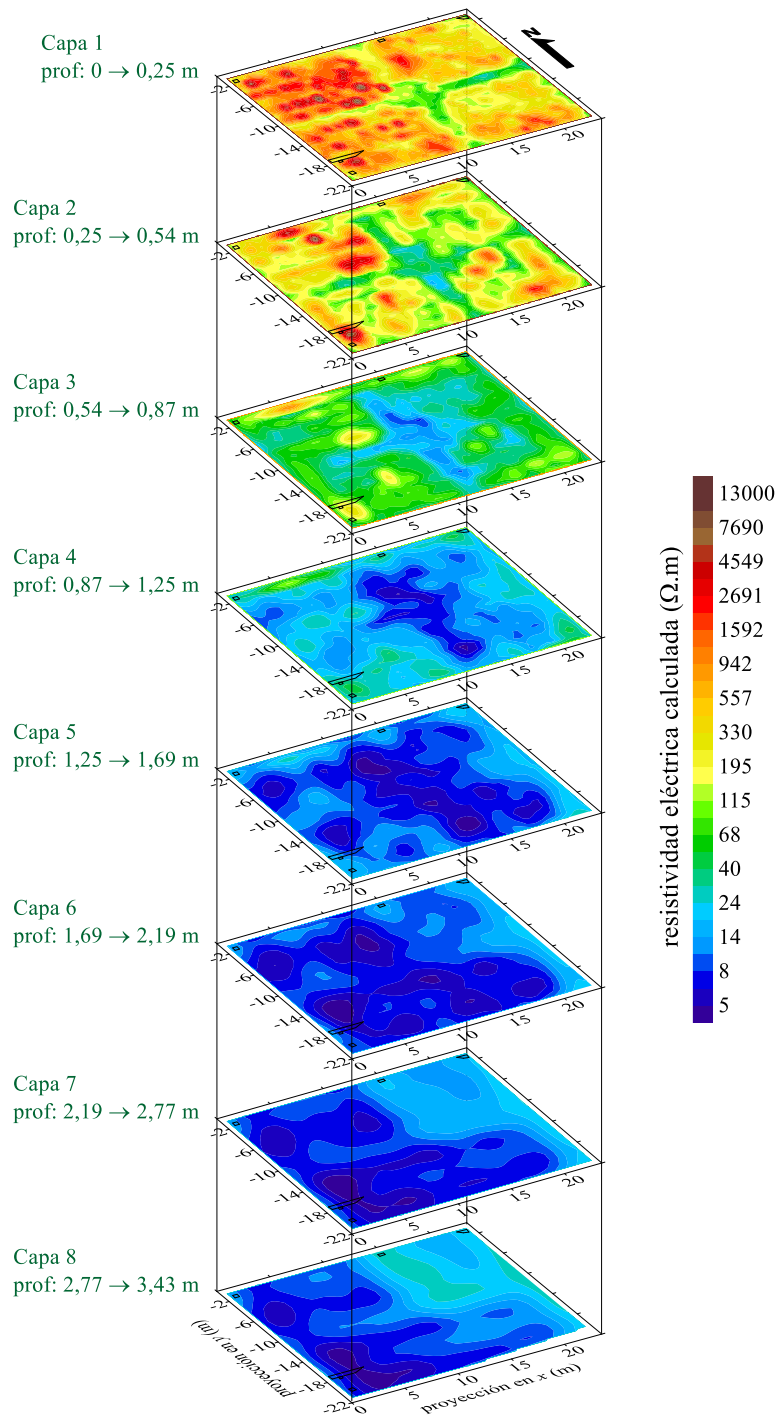


Figura 26. Representación en perspectiva de los mapas horizontales de la figura 25 obtenidos a través de la inversión suave del programa Res3Dinv.

CONCLUSIONES

1. Los resultados de la inversión 3D, mayormente los obtenidos empleando el programa Res3Dinv que los obtenidos mediante EarthImager 3D, revelaron detalles acerca de un conjunto de anomalías eléctricas de valores altos e intermedios de resistividad eléctrica calculada, paralelas a los restos de muros, cuyos alineamientos parecen estar asociados a los límites del claustro del convento de la Compañía de Jesús, logrando uno de los objetivos de este estudio.
2. El resultado de la inversión de los datos mediante el programa EarthImager 3D mostró una anomalía circular en el segundo cuadrante del área de estudio, que podría estar relacionada con los restos de un árbol que estuvo en ese lugar.
3. Con el programa EarthImager 3D se pudo identificar un conjunto de fuertes anomalías eléctricas, que podrían estar asociadas a las bases de las columnas que sostenían el techo del claustro, y que no fueron identificadas por el programa Res3Dinv.
4. Las fuertes anomalías superficiales identificadas con el programa Res3Dinv, revelaron la existencia de un posible piso de cantos rodados, el cual se tiene idea que cubría gran parte del área abierta del convento. Estas anomalías no fueron identificadas por el programa EarthImager 3D.

5. En los resultados obtenidos con ambos programas, Res3Dinv y EarthImager 3D, se pudo identificar una disminución gradual en los valores de resistividad eléctrica debido a la presencia de altos niveles de humedad en los materiales sedimentarios que caracteriza el área de interés.
6. La calidad de los datos de campo fue buena, ya que el factor de calidad Q para cada dato obtenido fue inferior a 1,0 %, parámetro éste que corresponde a la razón entre la diferencia de potencial medida y la intensidad de la corriente eléctrica que circula a través del par de electrodos empleados en el sistema de medición.
7. La geología característica del sitio de Panamá Viejo es adecuada para la aplicación del método de resistividad eléctrica, tal como la tomografía de resistividad eléctrica 3D empleada en este trabajo, herramienta de rápido uso y de elevada versatilidad en el estudio de rasgos arqueológicos de tipo hispánico, que permitió contribuir con este trabajo a ampliar el conocimiento y rescate del patrimonio histórico de Panamá.

RECOMENDACIONES

1. Es importante ampliar las prospecciones arqueológicas en el área estudiada, a fin de comparar la presencia de posibles estructuras arqueológicas con los resultados de la tomografía de resistividad eléctrica 3D.
2. En cuanto al procesamiento de los datos, sería de gran interés la utilización de otras restricciones propias del método de mínimos cuadrados regularizados, como la Norma L1, a fin de comparar estos resultados y tratar de obtener la máxima información posible.
3. Sería muy recomendable aplicar otras técnicas de prospección geofísica en este sitio arqueológico, a fin de ampliar el conocimiento del mismo.

BIBLIOGRAFÍA

1. CANTO FIGUEROLA J. 1957-1970. *Tratado De Geofísica Aplicada*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Minas. P. 379-400
2. CASTILLERO CALVO, A. 2006. *Sociedad, Economía y Cultura Material*. Panamá- Historia Urbana De Panamá La Vieja, Patronato Panamá Viejo.
3. CLAERBOUT, J. F. Y MUIR, F. 1973. Robust Modeling with Erratic Data. *Geophysics*, 38, 826-844
4. DAY, A. Y MORRISON, H.F.1979. Resistivity Modeling For Arbitrarily Shaped Three- Dimensional Structures. *Geophysics*, 44, 753-780.
5. DEGROOT – HEDLIN, C. Y CONSTABLE, S. 1990. Ocaam'S Inversion to Generate Smooth, Two- Dimensional Models from Magnetotelluric Data. *Geophysics*, 55, 1613-1624
6. DOBRIN M. B. 1998. *Introducción A La Geofísica De Prospección*, 4 ta edición
7. GRAJALES J. 2012. *Aplicación De Los Procesos De Inversión 3D De Pseudo- Secciones De Resistividad Eléctrica Aparente En Los Suelos Del Interior Del Convento De Santo Domingo (Conjunto Monumental Histórico De Panamá Viejo), Estratigrafía De Los Suelos Perimetrales E Identificación Y Patología De Los Materiales Y Los Sistemas Estructurales De Sus Ruinas*. Tesis De Licenciatura De Ingeniería Civil De La Universidad Tecnológica De Panamá, p.60
8. LANDAU. L Y LIFSHITZ, E. 1971. *Curso Abreviado De Física Teórica*. Editorial MIR, 269 p.

9. LEROUX, V. Y DAHLINM T. 2006. *Time- Lapse Resistivity Investigations for Imaging Saltwater Transport in Glaciofluvial Deposit*. *Eviron. Geol.*, 49, 347-358
10. LOKE, M. H. 2002. *The Use of Constraints in 2D And 3 D Resistivity Modeling*, 8th *EEGS- ES Meeting*. Portugal.
11. MOJICA A., PASTOR L. Y CARABALLO M. 2004. *Características Geomagnéticas Del Subsuelo En El Sector Noreste Del Conjunto Monumental De Panamá Viejo*, *Tecno ciencia*, Vol. 6, N° 1
12. PÉREZ, T. 2014. *Utilización Del Método De Tomografía De Resistividad Eléctrica Para La Caracterización Del Ambiente Tectónico De La Falla De Limón, Sector Noroeste De La Cuenca Del Canal De Panamá*. Tesis De Licenciatura De Ingeniería Civil De La Universidad Tecnológica De Panamá.
13. TELFORD W.M., GELDART L.P. Y SHERRIFF R. E. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University. Second Edition. P. 522