



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad  
Morelia

Tomografía de Resistividad Eléctrica 3D en  
centro histórico de la ciudad de Morelia,  
México.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN GEOCIENCIAS

P R E S E N T A

Roberto Cabrer Torres.

DIRECTOR: M.C Gerardo Cifuentes Nava.

CO-DIRECTOR: Dr. Miguel Ángel Cervantes Solano.

Morelia, Michoacán.

Agosto 2017.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



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

**LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCES**

DIRECTORA

DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

**PRESENTE**

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 05** del **H. Consejo Técnico** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **03 de mayo del 2017**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para el Examen Profesional del alumno **Roberto Cabrer Torres** de la Licenciatura en **Geociencias**, con número de cuenta **413088967**, con la tesis titulada: "Tomografía de resistividad eléctrica 3D en centro histórico de la ciudad de Morelia" bajo la dirección como **tutor** del M. C. Gerardo Cifuentes Nava y como **co-tutor** al Dr. Miguel Ángel Cervantes Solano.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

**Presidente:** Dr. René Efraín Chávez Segura

**Vocal:** Dr. Miguel Ángel Cervantes Solano

**Secretario:** M.C. Gerardo Cifuentes Nava

**Suplente:** Dr. Avtandil Gogichaishvili

**Suplente:** Dr. Jasinto Robles Camacho

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Morelia, Michoacán a, 01 de agosto del 2017.



**DR. VÍCTOR HUGO ANAYA MUÑOZ**  
**SECRETARIO GENERAL**

---

**CAMPUS MORELIA**

Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta  
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)56.23.73.00, Extensión Red UNAM: 80614  
[www.enesmorelia.unam.mx](http://www.enesmorelia.unam.mx)

# Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a todo su personal académico y administrativo por haber hecho posibles mis estudios de licenciatura.

A la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia; por ser la casa de estudio en la que me he formado.

A mis tutores de tesis y sinodales; M.C. Gerardo Cifuentes Nava, Dr. Miguel Ángel Cervantes Solano, Dr. René Efraín Chávez Segura, Dr. Jasinto Robles Camacho, Dr. Avto Gogichaishvili; sin los cuales la conclusión de este trabajo de tesis no hubiese sido posible.

Al Instituto de Geofísica, por el apoyo como becario durante la elaboración del trabajo de tesis en el periodo agosto 2016 – mayo 2017 y por la atención y apoyo de sus académicos y administrativos.

Al Departamento de Geofísica de la División de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería, que aportó los recursos necesarios para que se realizase esta investigación a través de las prácticas profesionales de la Licenciatura en Ingeniería Geofísica del semestre 2017-1. En particular al Ing. Alejandro García Serrano, al M.C. David Escobedo Zenil y a la Ing. Sandra Esteves Robles

A la Gerencia del patrimonio cultural de la ciudad de Morelia, por el apoyo y facilidades prestadas.

A la asociación civil Morelia Patrimonio de la Humanidad, por toda la información y ayuda brindada durante este proyecto.

# Contenido

Resumen .....	i
Abstract.....	i
Introducción.....	ii
1. Antecedentes .....	1
Localización. ....	1
Descripción geológica general. ....	2
Estratigrafía.....	4
Contexto histórico. ....	9
2. Marco teórico .....	13
Fundamentos físicos.....	13
Fuente puntual en un semi-espacio.....	18
Resistividad aparente.....	20
Factor geométrico y configuraciones electródicas. ....	23
Arreglos no convencionales. ....	33
Tomografía de resistividad eléctrica. ....	36
Teoría de inversión. ....	36
Determinación de error.....	39
3. Metodología.....	41
Equipo.....	43
2009.....	44
2014.....	45

2016.....	46
2017.....	48
4. Resultados y análisis.....	53
2009.....	53
2014.....	56
2016.....	58
2014 y 2016.....	60
2017.....	62
5. Conclusiones.....	74
6. Referencias.....	76
Artículos.....	76
Libros.....	77

# Resumen

Tradición oral en la ciudad de Morelia ha llevado a la creencia de la existencia de túneles subterráneos en la zona centro, hecho respaldado por la presencia de posibles accesos en algunas edificaciones. Ya que la zona es denominada patrimonio cultural la excavación o perforación con la intención de sondear es poco factible; es necesaria la implementación de técnicas no invasivas, razón por la cual se llevaron a cabo diversos trabajos de prospección eléctrica en la zona centro de la ciudad de Morelia, específicamente en catedral. Realizados entre los meses de diciembre a marzo de los años 2009, 2014, 2016 y 2017, los resultados obtenidos a partir de la inversión y modelado de datos denotan la existencia de al menos 10 estructuras de interés, posibles cavidades o túneles por debajo de la superficie del edificio. Algunas de ellas sugieren conectividad más allá de los límites del edificio y de la zona de investigación.

# Abstract

Oral tradition in the city of Morelia has led to the belief of the existence of underground tunnels in the downtown area, myth backed by the presence of possible accesses in some buildings. Since the area is designated as cultural heritage, excavation or drilling with the intention of sounding is unfeasible; it is necessary to implement non-invasive techniques, which is why several electrical prospecting campaigns were carried out in the central area of the city of Morelia, specifically in the cathedral. These surveys were done between December and March of the years 2009, 2014, 2016 and 2017, the results obtained from the inversion and data modeling denote the existence of at least 10 structures of interest, possible cavities or tunnels below the surface of the building. Some of them suggest connectivity beyond the boundaries of the building and the research area.

# Introducción

En prospección geofísica, los métodos eléctricos han ganado bastante popularidad en aplicaciones relacionadas a investigaciones del patrimonio cultural. La mayor ventaja de estas metodologías es el hecho que son técnicas no invasivas, aspecto clave cuando se tiene la intención de resguardar la integridad de algún objeto o estructura de interés encontrado por debajo de la superficie.

La prospección eléctrica no es la única con una aplicación directa útil para la arqueología; métodos como los electromagnéticos, prospección magnética somera, microgravimetría e incluso sísmica de refracción son utilizados dependiendo de los objetivos específicos de cada campaña de exploración (Herz, 1998).

Otras condicionantes para la elección de un método adecuado de exploración son las características propias del subsuelo, geología local, en especial las propiedades físicas que permiten generar contrastes con el sustrato dependiendo de la naturaleza de los objetos enterrados; aunado a su tamaño, extensión y distribución.

La tomografía de resistividad eléctrica, es un método **que permite obtener “imágenes” del subsuelo** a través de su oposición al flujo de corriente eléctrica. Dependiendo de la configuración del estudio se pueden alcanzar diversas profundidades, así como delimitar dimensionalmente los cuerpos que podremos ver a través de esta técnica.

Esta técnica de prospección fue elegida por diversos motivos, uno de ellos es su sensibilidad al tipo de contrastes físicos que son objeto de este estudio.

Aunado a lo anterior está la versatilidad de la Tomografía de Resistividad Eléctrica, debido a que gran cantidad de secuencias de medición pueden llevarse a cabo con un solo arreglo electródico, facilitando el trabajo en campo puesto que no es necesario cambiar la disposición de electrodos en superficie para la obtención de datos con alguna otra secuencia de medición.



# 1. Antecedentes

Localización.

La zona de estudio se encuentra ubicada en 19°46'N y 101°11'O aproximadamente, dentro de la ciudad de Morelia, la cual posee una altura media de 1920 metros sobre el nivel del mar (Figura 1.1).

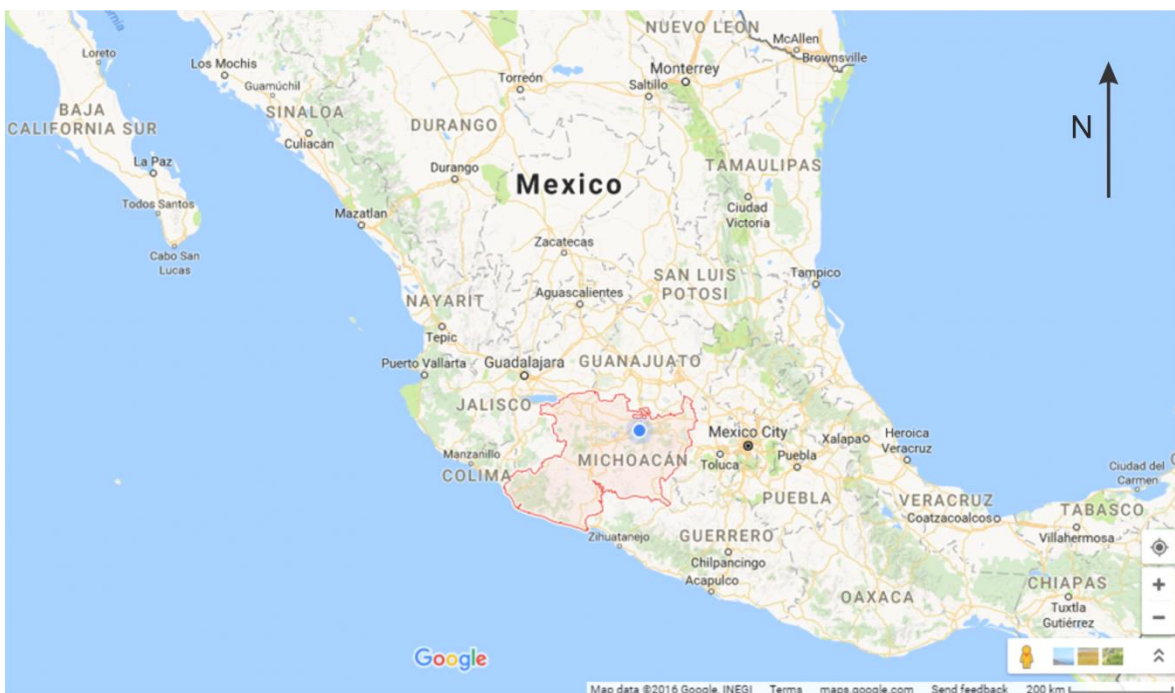


Figura 1.1 Localización geográfica del estado de Michoacán y su capital, la ciudad de Morelia; en la parte central o bajío de México. (Extraída y modificada de Google Maps).

## Descripción geológica general.

La ciudad presenta varias estructuras geológicas y características geomorfológicas de diversos orígenes que representan la historia geológica de la región (Figura 1.2).

Dos provincias geológicas interactúan delimitando la ciudad; hacia el Sur se encuentra la Sierra de Mil Cumbres (SMC), continuación de la Sierra Madre del Sur, caracterizada por volcanismo miocénico; al Norte de la ciudad se observa la provincia del vulcanismo cuaternario del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM), específicamente algunos de los volcanes monogénicos del campo volcánico Michoacán-Guanajuato.

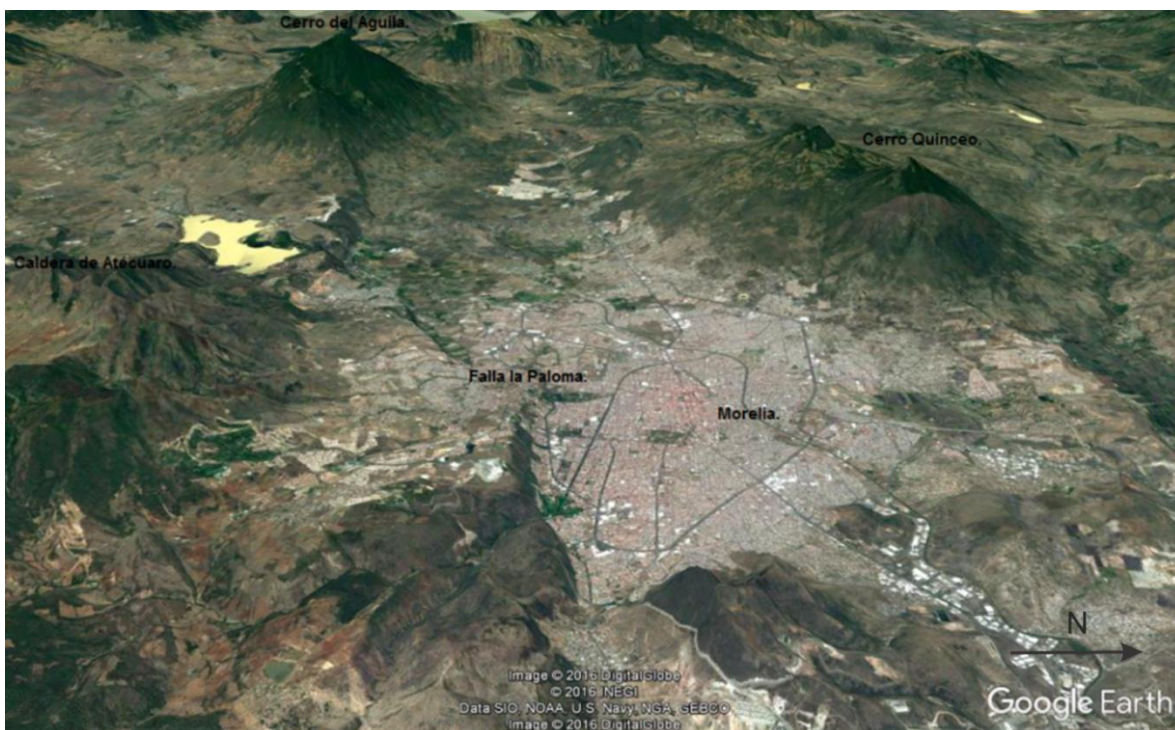


Figura 1.2 Imagen satelital de la ciudad de Morelia; nótese características estructurales importantes al Sur, falla la Paloma y Caldera de Atécuaro; Norte, Cerro Quinceo y Oeste, Cerro del Águila. Topografía aumentada al 300% (Extraída y modificada de Google Earth).

Tectónicamente la ciudad se emplaza en un semi-graben, delimitado al Sur por la falla La Paloma. Dicha falla forma parte del sistema de fallas Acambay-Morelia de orientación O-SO E-NE, producto de un régimen transtensional posiblemente relacionado a la subducción de la placa de Cocos por debajo de la placa de Norte América.

A gran escala, la Sierra Mil Cumbres constituye el alto estructural (horst) que separa hacia el Norte a las depresiones lacustres del CVTM y hacia el Sur a la depresión de Tierra Caliente.

La ciudad de Morelia ha crecido en una serie de lomeríos, sierras y valles que han sido labrados por las fallas y el vulcanismo de la CVTM. El semi-graben donde se ubica la ciudad de Morelia es caracterizado por un sistema de al menos 10 fallas, que cuentan con evidencias de actividad de subsidencia actual, tres de ellas con antecedentes de actividad sísmica actual o histórica. De los eventos caracterizados en esta zona, el más reciente ocurrió en el pleistoceno, hace más de 750 mil años.

Todas las fallas en la región de Morelia poseen un alineamiento preferencial que va desde los N85°E a algunas cuantas con orientación N55°E, en todas las fallas los planos inclinan hacia el Norte. La mayor estructura presente, conocida como la falla La Paloma, posee una longitud de 13 kilómetros y muestra una forma escarpada con un desnivel máximo de 180 metros.

Aunado a las características estructurales, Morelia posee diferentes centros volcánicos cuyos productos forman o delimitan el basamento donde se emplaza la ciudad. Los más importantes o remarcables son los cerros del Águila, Tetillas y Quinceo, así como la caldera de Atécuaro, principal responsable de la llamada Cantera Morelia (Israde-Alcántara, 2004).

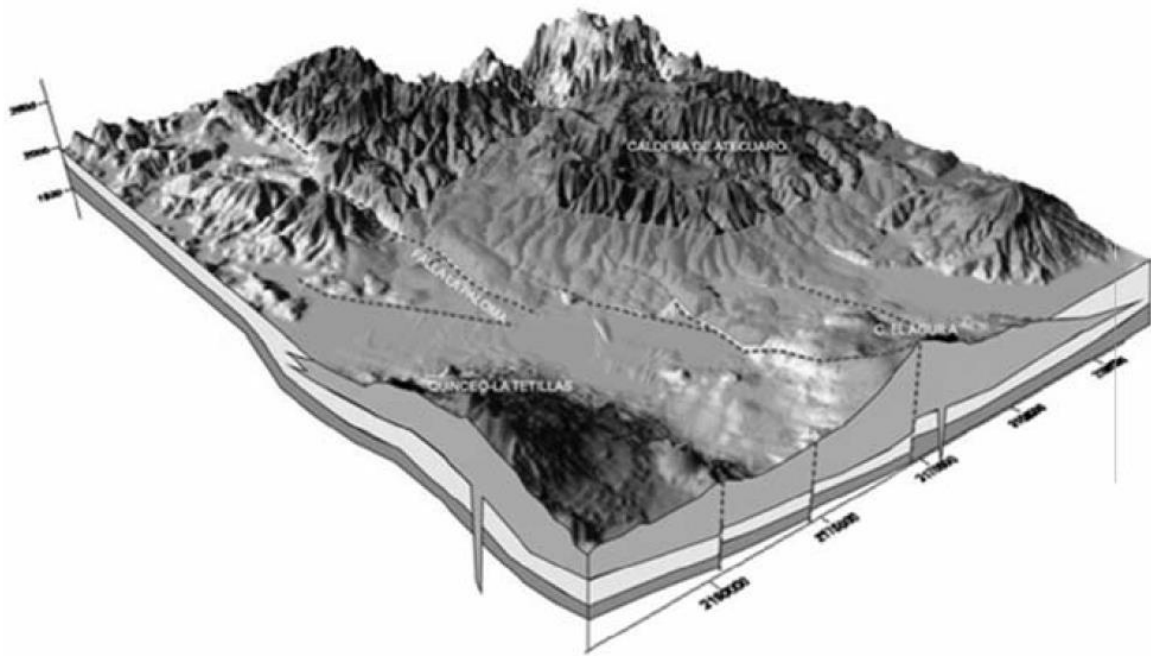


Figura 1.3 Esquema morfológico de Morelia. Nótese fallas principales y geometría en semigraben con bloques basculados hacia el sur y volcanes monogenéticos (C. El Águila, Quinceo-Las Tetillas). También se observa la caldera de Atécuaro y sus productos de flujos piroclásticos (Cantera de Morelia), que conforman parte de la sierra de Mil Cumbres.

(Extraída de Garduño-Monroy et al. 2014).

## Estratigrafía.

Utilizando la información disponible en recopilaciones bibliográficas, cartas y mapas geológicos aunados a información obtenida en pozos Israde-Alcántara y Garduño-Monroy (2004) proponen la división de la estratigrafía de Morelia en las siguientes unidades:

### Andesitas Mil Cumbres del Mioceno medio-superior (>12 Ma)

Unidad caracterizada por paquete de lavas andesíticas masivas de color gris-verdosas intensamente alteradas y fracturadas con presencia de vetillas de calcita o calcedonia con texturas que pasan desde porfidicas, afiricas, hasta vítreas.

El espesor de esta es desconocido, puesto que nunca ha sido registrada por la perforación de pozos profundos. Se cree que su espesor puede llegar a sobrepasar los 200 metros.

Estas andesitas conforman el edificio volcánico en que se ha emplazado la caldera Atécuaro (Sur de la ciudad) al igual que la zona en la cual se encuentra otro cuerpo calderico denominado La Escalera (Sureste de Morelia).

Se proponen edades de hasta 33 millones de años para el inicio de la actividad, con un posible cese de la misma hace cerca de 8 millones de años. Gómez-Vasconcelos (2015) dató una muestra de estas lavas andesíticas que arrojaron una edad de  $19.4 \pm 0.39$  Ma.

### Flujos piroclásticos ignimbríticos de edad Miocénica ( $\pm 16.5$ Ma)

Horizonte mejor conocido como Cantera de Morelia, estos productos piroclásticos de composición riolítica generalmente de color rosa ricos en líticos de andesitas y pómez forman una roca denominada ignimbrita. Esta secuencia es de las más importantes presentes en la ciudad de Morelia y es posible subdividir esta unidad en varios horizontes debido a su espesor medio de 200 metros. Israde-Alcántara y Garduño-Monroy (2004) proponen al menos 10 subdivisiones distintas del afloramiento de la cantera Morelia, descritas a continuación:

- 1) En la base, brecha de rezago, lavas vítreas oscuras y flujos piroclásticos juveniles altamente fracturados y alterados, de un espesor de más de 10 metros.
- 2) Ignimbrita basal altamente consolidada de color rojo vino, aflorante al Sureste de la ciudad con un espesor medio de 1.5 metros. Gómez-Vasconcelos (2015) propone esta unidad en conjunto con la descrita a continuación, de igual forma fechó esta porción de la secuencia en  $16.7 \pm 0.22$  Ma.
- 3) Fiammes oscuros y líticos.

4) Ignimbrita de color blanco con presencia de pómez de grandes dimensiones, mal soldada y que aflora a lo largo del escarpe de la falla La Paloma.

5) Una capa delgada de un flujo cuya matriz arenosa posee pómez de color amarillo claro con granos de algunos milímetros de diámetro.

6) Flujo piroclástico color rosa de líticos de andesita e ignimbritas en una matriz rica en pómez amarillo claro o blanca. Dicho flujo tiene un espesor de más de 40 metros y actualmente es la ignimbrita de mayor explotación para construcción.

7) Junto a la capa basal, la capa más espesa de la unidad, compuesta por flujos piroclásticos blancos o grises con grandes fragmentos de pómez.

8) En la zona de La Paloma se observa un nivel de flujos piroclásticos de matriz arenosa, pómez milimétrica de color claro, mezclado con clastos muy bien redondeados de tipo fluvial, donde se distinguen clastos de andesitas, dacitas e ignimbritas, con diámetros que van de 1 a 20 centímetros.

9) Ignimbrita color rojo o vino, altamente consolidada, con presencia de fiammes y líticos más oscuros. Esta roca, conocida como cantera en la región, fue la utilizada para las construcciones civiles durante la época de la colonia desde el siglo XVI. Se estima para este horizonte una edad de 12 millones de años.

10) Ignimbrita blanca con presencia de mica, líticos de composición andesítica y fragmentos de pómez. Esta capa, resistente a la erosión, de 40 metros de espesor se observa en la cima de la loma de Santa María y zonas altas cercanas. Esta capa junto con la inferior, son las que controlan la morfología del área donde se emplaza la ciudad de Morelia. Una muestra de esta roca proporcionó una edad de  $16.3 \pm 0.14$  Ma (Gómez-Vasconcelos, 2015).

Gómez-Vasconcelos (2015) propone solo 4 unidades distintas, fechando algunos horizontes. Para la cantera utilizada en construcción, que forma el sustrato de la ciudad de Morelia, de aproximadamente 30 metros de espesor se ha obtenido una edad de  $16.4 \pm 0.3$  Ma.

En resumen, la ignimbrita Atécuaro cubre un área de aproximadamente 230 km<sup>2</sup> con un espesor medio de 80 metros, con lo cual se infiere un volumen de roca cercano a los 18

km<sup>3</sup>. El volumen total de la ignimbrita no coincide con el volumen faltante de la caldera debido al colapso. Dicho volumen pudo perderse debido a erosión, alteración hidrotermal, alteración de las ignimbritas intra-caldera y una posible resurgencia (Gómez-Vasconcelos, 2015).

#### Complejo volcánico miocénico del Cerro Punhuato

Al Sureste de la ciudad se encuentra esta secuencia de rocas constituida por derrames de lava y brechas andesíticas y dacíticas, a veces soldadas, que por su estructura y morfología se asocia a un complejo de domos que continúan en dirección noreste.

Este complejo presenta una estructura de herradura abierta hacia el Oeste, evidenciando una gran explosión lateral, aunada a los productos asociados, considerados como el material acumulado después de la destrucción del cono formando un abanico al oriente de la ciudad. A esta unidad se le asigna una edad ubicada adentro del Mioceno, considerando que subyace a los sedimentos lacustres del Mioceno superior-Plioceno. Cortes en las zonas residenciales del Oeste de Morelia presentan lavas andesíticas altamente fracturadas, brechas de colapso de domos de tipo dacítica o andesítica, intercaladas a ellas flujos piroclástico. Afectando a estas unidades y a suelos recientes se observan fallas de dirección E-O con planos subverticales.

#### Secuencia fluvio-lacustre del Mioceno-Plioceno

Aflorante en la parte Sur y oriente de Morelia, caracterizada por limos y arcillas; según los registros obtenidos a partir de perforaciones profundas para explotación de acuíferos, posee un espesor de hasta de 60 metros con un basculamiento de 5° hacia el Sur.

En la parte Suroeste de la ciudad la secuencia se compone de cenizas volcánicas con matriz arcillosa alternadas con niveles arcillo-limosos. Todo esto está coronado por un depósito piroclástico de caída aérea y de color amarillo, que puso fin a la antigua zona lacustre de Morelia. En la porción Norte de la ciudad se observan conglomerados y niveles de arenas y limos, afectados por uno de los más importantes fallamientos de Morelia.

Considerando fechamientos radiométricos en los productos volcánicos subyacentes y los restos de un elefante *Rhincoterium* y un molar de un proboscideo es posible asignar una edad Pleistoceno-Holocénica. Hacia el Norte de Morelia fragmentos de cerámica de la

cultura pirinda fueron encontrados en los flujos piroclásticos de pómez. Estos últimos flujos podrían provenir del centro volcánico de Las Tetillas y Quinceo.

#### Secuencia volcánica pleistocénica-holocénica del Corredor Tarasco

Unidad más reciente que corresponde a los productos del volcanismo monogenético del CVTM. Son lavas andesíticas y eventualmente andesítico-basálticas que provienen de los volcanes Quinceo, Las Tetillas o del Cerro El Águila que, además, delimitan morfológicamente la cima más importante de la ciudad de Morelia. El aparato de estos volcanes tiene una base de 10 kilómetros de diámetro y más de 800 metros de altura; la punta del volcán El Quinceo se encuentra a 2720 metros sobre el nivel del mar.

Se asigna una temporalidad de 500 mil años para el volcán Quinceo, con reactivaciones en el Holoceno (últimos 10 mil años); impresiones de mazorcas de maíz encontradas son una prueba de dichas reactivaciones.

El volcán Las Tetillas, por las evidencias cartográficas, morfológicas y estructurales, es más joven que el volcán El Quinceo, ambos de tipo escudo. Tetillas presenta una colada que cubre el sector Norte del Quinceo. En el sector de Tarímbaro, tanto las lavas del Quinceo como las de Las Tetillas están afectadas por fallas (falla Tarímbaro especialmente) con dirección E-O y ENE-OSO. Dentro de este vulcanismo se encuentra el cerro El Águila, que también es un volcán tipo semiescudo, también desplazado por fallas E-O.



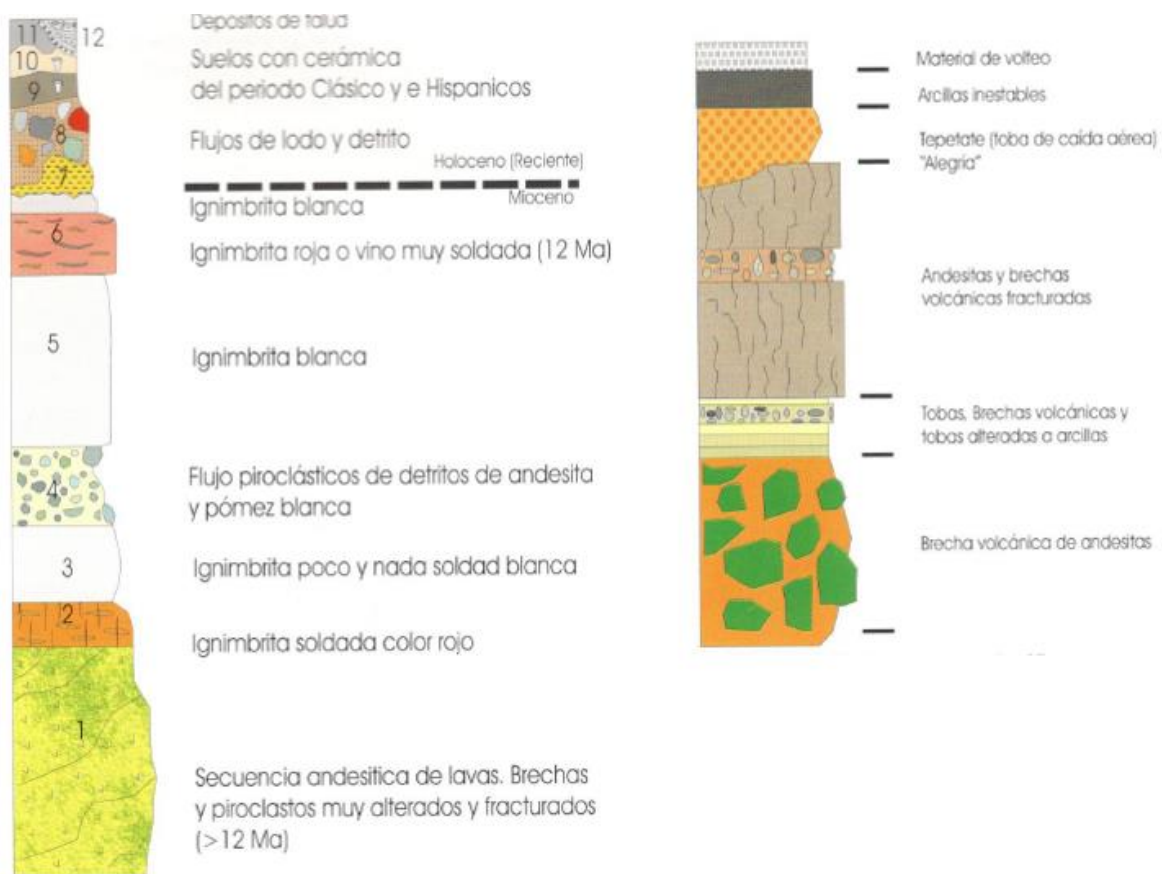


Figura 1.4 Columna estratigráfica generalizada de la zona de Morelia. Nótese subdivisiones de la Cantera Morelia al lado derecho. (Extraída de Israde-Alcántara, 2004).

### Contexto histórico.

Morelia, centro poblacional establecido en el siglo XVI durante la época de la colonia en México, es una ciudad emplazada al noreste del estado de Michoacán que actualmente funge como capital del estado.

Asentada en lo que se conocía como Valle de Guayangareo, el 18 de mayo de 1541 es fundada bajo el nombre de Valladolid.

En 1543 el alarife Juan Ponce, encargado del diseño del núcleo urbano, propone al centro de la ciudad la plaza mayor con una medida aproximada de 298 x 129 metros; dando partida al primer cuadro de la ciudad

Tras la muerte del primer obispo de Michoacán en 1565, comienza la gestión para mudar la sede del obispado de Pátzcuaro a Morelia; misma que será otorgada en el año de 1580.

Al cambiar de sede, el clero secular no poseía lugar adecuado; otras órdenes religiosas presentes en la ciudad desde principios del siglo XVI ya tenían templos a punto de terminar por lo cual en 1577 se ordena la construcción de una catedral provisional.

Esta catedral provisional tendría 180 pies de largo, 3 naves de adobe y techo de vigas, una sola torre viendo al oriente y acceso al poniente. La construcción duró año y medio, a diferencia de los 84 años que le tomaría a la catedral definitiva su construcción (Ramírez, 1995).

No existen datos que indiquen la localización de este edificio, ningún acta del cabildo habla al respecto. A través de un análisis literario, Mazín (1991) sugiere que la catedral primitiva se encontraba a espaldas del edificio actual, extendiéndose hasta el margen oriente de la plaza mayor.

Para finales de 1584 un incendio en la recién establecida catedral consume la mayoría de la información que contenía, por lo cual los registros más antiguos que se poseen al respecto son del año 1586.

Para el año de 1605 el edificio primitivo comienza a tener desperfectos, en ese año es necesaria la reparación de la torre y campanario; para 1616 es necesaria la reparación de la capilla mayor (Mazín, 1991).

Un acta capitular emitida en 1621 indica que el edificio de la catedral estaba a punto del colapso. En esta misma acta se hace el requerimiento de un nuevo edificio

Por orden real, el 6 de marzo de 1655, es expedida el acta para la construcción de la nueva catedral. En ella se especificaba que el edificio debía tener una medida de 80 varas (66.88 m) y su proporción de "buena arquitectura" (Silva, 1984).

Se asigna a Vicente Barroso de la Escayola, arquitecto con experiencia en la catedral de la Ciudad de México, como maestro mayor de la nueva obra. Dos años después de serle asignado el puesto, es aceptado su plano el 26 de febrero.

En su plano, Barroso de Escayola, ubicó la catedral de Norte a Sur y no de Oeste a Este como se realizaba en todas las construcciones religiosas de la época; esto para respetar la proporción asignada y de igual forma no tener que desplazar el edificio al extremo oriente de la plaza mayor. La nueva catedral constaría de 3 naves cubiertas por 8 tramos de bóveda (Ramírez, 1995).

La construcción se hizo a partir del mismo material que donde la obra se asentaría. La cantera se seleccionaba dependiendo de su uso. Roca ordinaria "de marca" utilizada para mampostería; "de más de marca" para pilares y acabados (Ramírez, 1994).

El viernes 6 de agosto 1660 se coloca la primera piedra, a la par de la celebración de la que se convertiría en la fiesta titular de esa iglesia: La transfiguración de Cristo.

Diez años después del comienzo de la construcción, el proyecto cesa por falta de recursos. No se sabe con exactitud cuánto duró esta suspensión.

El 7 de julio de 1671 es mandada a realizarse una verificación del estado de la obra por parte de la corona. En ese entonces la obra llevaba 1/16 de la altura correspondiente; 3 años más tarde la catedral poseía la mitad de su altura, esto sin contar la construcción de las torres que no había comenzado.

Aunque hubo gran avance durante la década descrita, en 1679 se tiene la segunda suspensión temporal que, aunque fue menor a un año, seguía reflejando los problemas contables que la corona y el clero aun no eran capaces de superar.

Tras la muerte de Barroso de Escayola el 10 de enero de 1692 y después de al menos 4 años de cese de actividades, el 2 de octubre de 1696 se designa a Juan de Silva y Carrillo nuevo maestro mayor quien retomaría la construcción de edificio. (Silva, 1984).

Un acta capitular de 1704 hace constar el traslado de bienes del edificio provisional a la catedral inconclusa "por el grande peligro de las vidas y de los bienes costosos de esta iglesia" (Mazín, 1991).

Para 1705 el cuerpo y cimborrio ya estaban terminados, pero la catedral aún se ostentaba sin torres ni fachadas. Es en este año que el clero cambia de sede dejando la catedral provisional que estaba a punto del colapso.

Es hasta 1710 que se dispone la demolición de la catedral primitiva, tras más de un intento de rescatarle, pero su mal estado llevó a que en 1713 la edificación desapareciera de la plaza principal.

A principios del siglo XVIII el proceso constructivo cesó en diversas ocasiones, el primer cese duró casi 35 años. Este cese se debió a la construcción de necesidades más apremiantes, en este caso el acueducto de la ciudad, y del estado de la corona en España puesto que se encontraban en la Guerra de sucesión bajo reinado de Felipe V (Silva, 1984).

En el año de 1742 se retoma la obra de forma incesante; para agosto del año siguiente ambas torres estaban a punto de ser concluidas. La construcción de catedral concluye en 1744, fecha señalada en fachada principal, y el 9 de mayo de 1745 se hace la consagración definitiva del edificio.

A mediados del siglo XIX, durante la guerra de reforma, el General Epitafio Huerta ordena motines y saqueos en catedral, hecho que hizo necesaria la remodelación del interior del edificio; cambiando casi por completo su apariencia. El altar principal al centro del edificio fue movido a la parte trasera y el coro perdió su presencia en la parte central (Silva, 1984).

En ninguno de los textos revisados se encontró información sobre túneles o estructuras subterráneas objeto del presente estudio. Existen menciones sobre lugares designados a sepulturas, en la parte Norte del edificio cerca de la entrada principal, que tuvieron que ser clausurados debido a los problemas de salubridad que causaban puesto que los restos habían sido dejados muy cerca de la superficie.

## 2. Marco teórico

Los métodos resistivos deben entenderse bajo el contexto del flujo de corriente eléctrica a través de un medio constituido de capas o estratos, cada uno de ellos con resistividades distintas (Herman, 2001).

A grandes rasgos, la resistencia puede definirse como la oposición que presenta un cuerpo al paso de corriente eléctrica a través de sí mismo. Así la resistividad se vuelve el valor de resistencia de cierto volumen de material, normalizado con la longitud y área transversal de la trayectoria de la corriente eléctrica.

En un contexto geológico, suponiendo el flujo de corriente eléctrica a través del subsuelo, dicha propiedad dependerá de diversos factores tales como la porosidad, permeabilidad, temperatura, química y saturación del fluido almacenado en los poros y, en algunos casos, la mineralogía de la matriz litológica. (Butler, 2005)

Ya que los métodos resistivos emplean una fuente artificial de corriente eléctrica, introducida al suelo a través de electrodos en contacto de forma puntual, este método de prospección puede describirse a partir de la ley de Ohm y los estipulados de las ecuaciones de Maxwell, precisamente las leyes de Faraday y Ampere para el campo eléctrico (Telford, 1990).

Fundamentos físicos.

La ley de Ohm, en su forma elemental, establece que la diferencia de potencial entre dos caras de un conductor es proporcional a la magnitud de corriente eléctrica que le atraviesa y la resistencia del material del que está constituido.

$$V = IR \quad (2.1)$$

Donde  $V$  es el voltaje o diferencia de potencial, medido en volts;  $I$ , es el flujo de corriente eléctrica a través del medio medido en amperes; y  $R$  es la resistencia del material, expresada en ohms.

La resistencia de un material es proporcional a su longitud,  $L$ , e inversamente proporcional a su área transversal,  $A$ , por lo que podemos expresarla de la siguiente forma:

$$R \propto L/A \quad (2.2)$$

Si buscamos la igualdad, es necesario añadir una constante de proporcionalidad.

Estipulado lo anterior podemos reescribir la ecuación 2.2 como:

$$R = \rho(L/A) \quad (2.3)$$

Esta constante de proporcionalidad,  $\rho$ , es lo que conocemos como resistividad y es la propiedad física que indica la oposición que tendrá un material al flujo de corriente eléctrica a través de él y posee unidades de volts por metro (V/m).

Despejando la resistencia de la ley fundamental de ohm, podemos igualar la ecuación 2.3 con el cociente de voltaje y flujo de corriente, obteniendo:

$$(V/I) = \rho(L/A) \quad (2.4)$$

Reordenando los cocientes, tenemos lo siguiente:

$$(V/L) = \rho(I/A) \quad (2.5)$$

Existe una razón para el reordenamiento de estos cocientes pues cada uno de ellos representa alguna cantidad de interés.

Analizando primeramente el cociente de corriente entre área,  $I/A$ , del lado derecho de la ecuación se puede deducir que esta es una medida del flujo de corriente eléctrica que pasa a través de un área determinada. Esta razón es conocida como densidad de flujo de corriente eléctrica, simbolizada por la letra  $J$ .

El cociente entre voltaje y longitud, presentado a la izquierda de la igualdad, es análogo a una expresión aplicable para la determinación de la intensidad de campo eléctrico:

$$\mathbf{E} = -dU/dr = V/L \quad (2.6)$$

La intensidad de campo eléctrico,  $E$ , es la diferencia de potencial en una región causada por una carga en el espacio, que disminuye al incrementar la distancia entre dicha carga y el punto de observación.

Después del reordenamiento, nuestra expresión inicial ha cambiado teniendo entonces que:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.7)$$

Donde  $J$  es la densidad de flujo de corriente eléctrica y se mide en amperes por metro cuadrado ( $A/m^2$ );  $E$ , es la intensidad de campo eléctrico, medido en volts por metro ( $V/m$ ) y  $\sigma$  es la conductividad del medio, inverso de la resistividad ( $\sigma=1/\rho$ ), que tiene unidades de siemens por metro ( $S/m$ ). En el caso de un medio homogéneo e isotrópico,  $J$  posee la misma dirección y sentido que el campo eléctrico  $E$ . (Iskander, 1992)

La ecuación anterior es la forma vectorial de la ley de Ohm, auxiliar en la descripción de fenómenos tridimensionales y en condiciones no homogéneas.

Como fue mencionado al principio de este capítulo, las ecuaciones de Maxwell son utilizadas análogamente a la ley de Ohm para describir el fenómeno; específicamente las leyes de Faraday y Ampere en forma puntual, que tienen la forma:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \quad (2.8)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{J} + \partial \mathbf{E} / \partial t \quad (2.9)$$

La primera de estas ecuaciones, correspondiente a la Ley de Faraday, indica que la circulación de campo eléctrico en cualquier punto es igual a la tasa temporal de decaimiento de la densidad de flujo de campo magnético,  $B$ , en ese mismo punto. Describe la inhomogeneidad del campo que, en este caso, por tratarse de corriente estacionaria toma el valor de cero.

Por otra parte, la ley de Ampere, explica que el rotacional de la densidad de flujo de campo magnético en un punto es igual a la densidad de corriente total en ese mismo punto. Dicha densidad de corriente total consta de dos partes, una proveniente de flujo de cargas real,  $J$ , y la otra es la densidad de corriente de desplazamiento, que es la derivada temporal de la densidad de flujo de campo eléctrico,  $E$ . (Iskander, 1992)

Estas ecuaciones son aplicables al flujo continuo de corriente directa; aun así, pueden ser utilizadas para representar los efectos de corrientes alternas a bajas frecuencias tales que las corrientes de desplazamiento y los efectos de inducción sean despreciables. (Azeiboikhai, 2010)

Puesto que en las tomografías de resistividad es utilizada corriente directa o de muy baja frecuencia el campo eléctrico se considera estático, donde no existen variaciones respecto al tiempo, por lo cual los términos diferenciales serán iguales a cero

Tomando en cuenta lo anterior, las leyes de Faraday y Ampere toman la forma:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (2.10)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{J} \quad (2.11)$$

Demostrando así que la corriente estacionaria creará un campo eléctrico,  $E$ , conservativo por lo cual es proveniente de un potencial escalar.

En campo, lo que es medido directamente es el potencial escalar mencionado anteriormente. La relación existente entre la intensidad de campo eléctrico y el potencial eléctrico está dada por la siguiente ecuación:

$$\mathbf{E} = -\nabla U \quad (2.12)$$

Donde  $U$  es el potencial eléctrico escalar en volts. Esta ecuación combinada con la forma vectorial de la ley de Ohm nos da:

$$\mathbf{J} = -\sigma \nabla U \quad (2.13)$$



Que nos permite observar que la densidad de corriente eléctrica,  $J$ , es función de la conductividad y el potencial escalar únicamente.

Aplicando la ecuación de continuidad que establece que la divergencia de la densidad de corriente eléctrica es igual al negativo de la derivada de la densidad de carga respecto del tiempo. En otras palabras, la ecuación de continuidad indica que sólo podrá haber un flujo de corriente si la cantidad de carga varía con el paso del tiempo, ya que la corriente disminuye o aumenta en proporción a la carga utilizada para generarla.

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot \sigma \mathbf{E} = -\frac{\partial q}{\partial t} \delta(x) \delta(y) \delta(z) \quad (2.14)$$

Donde  $q$  es la densidad de carga en un punto en el espacio de coordenadas  $x, y, z$  especificada por la función delta de Dirac.

La ecuación anterior puede reescribirse para un espacio tridimensional generalizado de la forma (Dey, 1979):

$$\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \nabla U(x, y, z)] = -\frac{\partial q}{\partial t} \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad (2.15)$$

Donde  $x_s, y_s$  y  $z_s$  son las coordenadas de la fuente puntual de inyección de corriente. Si consideramos un volumen elemental,  $\Delta V$ , sobre el punto de inyección de corriente, el término de fuente de la ecuación anterior puede escribirse de la forma:

$$\frac{\partial q}{\partial t} \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) = \frac{I}{\Delta V} \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad (2.16)$$

Por lo cual la ecuación 2.15 toma la forma:

$$\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \nabla U(x, y, z)] = \frac{I}{\Delta V} \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad (2.17)$$

Así tenemos una expresión dependiente de términos como la corriente, geometría y diferencia de potencial, ecuación a partir de la cual se puede determinar la resistividad en cualquier punto de las superficies equipotenciales en el subsuelo.

## Fuente puntual en un semi-espacio.

Supongamos la inyección de corriente directa al subsuelo por medio de un electrodo, el circuito se completa con otro electrodo de corriente a una distancia infinita o muy lejana del primero de ellos. Encontraremos el caso de la existencia de dos semi-espacios que se encuentran en contacto y poseen características distintas, siendo estos la atmosfera y la superficie.

Bajo condiciones ideales, la atmosfera se caracteriza por oponerse completamente al flujo eléctrico, por lo cual puede decirse que su resistividad tiende a ser infinita; mientras que el subsuelo posee una resistividad aparente, finita y distinta de cero, cuyo valor depende de sus propiedades eléctricas.

Si nos encontrásemos en un medio homogéneo e isótropo la corriente eléctrica tendera a fluir de forma radial en todas las direcciones alejándose del electrodo, formando así, superficies equipotenciales donde la distribución de corriente eléctrica será uniforme (Figura 2.1). Dichas superficies equipotenciales presentarán la forma de semiesferas concéntricas por debajo de la superficie, cuyo centro coincidirá con la base del electrodo (Kearey, Brooks, & Hill, 2002).

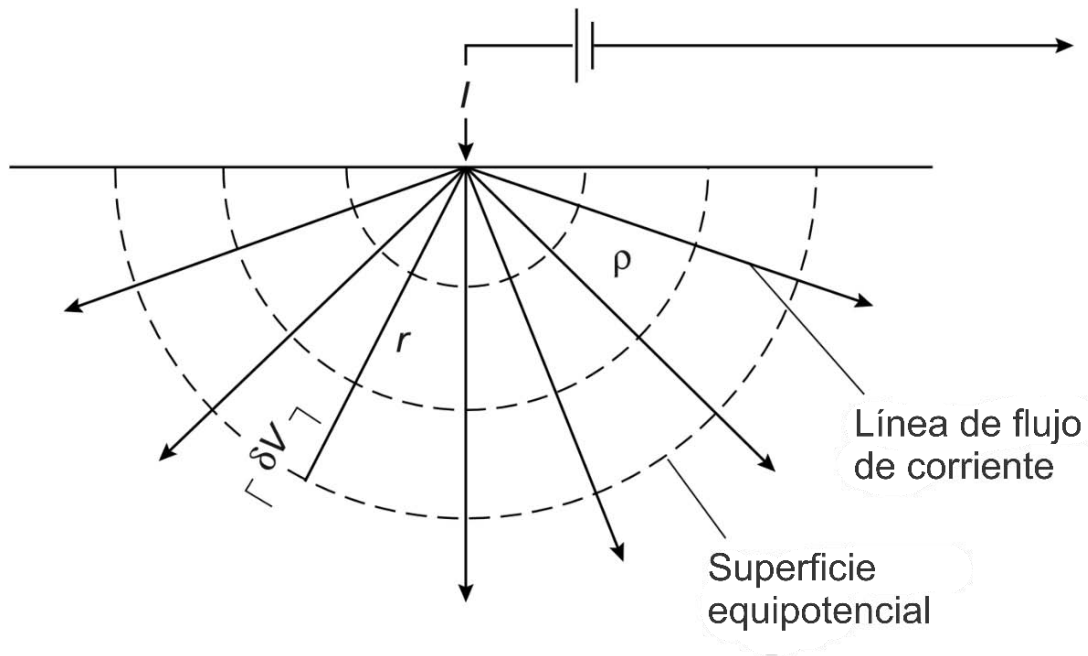


Figura 2.1 Flujo de corriente con electrodo simple. (Extraída y modificada de Kearey, 2002).

A cualquier distancia  $r$  del electrodo, la superficie equipotencial posee un área equivalente a  $2\pi r^2$  por lo cual, la densidad de corriente  $J$  está dada por:

$$J = I/2\pi r^2 \quad (2.18)$$

Partiendo de la ecuación 2.6, el gradiente del potencial asociado con la densidad de corriente eléctrica es:

$$-E = \partial U/\partial r = -\rho J = -\rho I/2\pi r^2 \quad (2.19)$$

El potencial,  $V$ , a la distancia  $r$  se obtiene a partir de la integración:

$$V = \int \partial U = - \int \rho I \partial r / 2\pi r^2 = \rho I / 2\pi r \quad (2.20)$$

En este caso la constante de integración es igual a cero puesto que  $V=0$  cuando  $r=\infty$ .

La ecuación anterior permite el cálculo del potencial en cualquier punto, en o por debajo, de la superficie de un semi-espacio homogéneo.

Resistividad aparente.

Consideremos ahora el caso donde ambos electrodos de corriente se encuentran a una distancia finita (Figura 2.2).

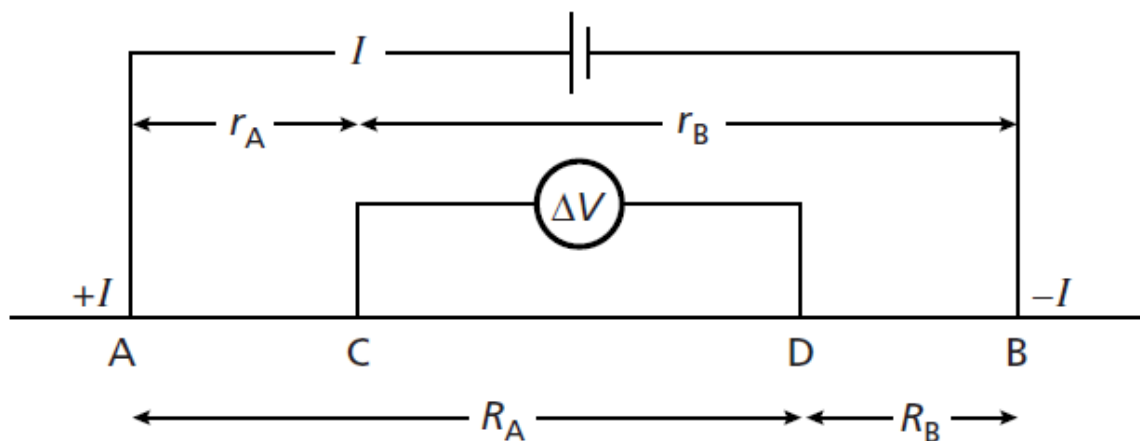


Figura 2.2 Forma generalizada de la configuración de electrodos utilizada en mediciones de resistividad (Extraída de Kearey, 2002).

El potencial,  $V_C$ , en el electrodo interno C será la suma de las contribuciones de potencial  $V_A$  y  $V_B$  provenientes de los electrodos de corriente A y B.

$$V_C = V_A + V_B \quad (2.21)$$

Partiendo de la ecuación 2.20 sabemos que:

$$V_C = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \quad (2.22)$$

Análogamente:

$$V_D = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \quad (2.23)$$

Potenciales absolutos son difíciles de monitorear, por lo cual la diferencia de potencial,  $\Delta V$ , entre los electrodos interiores C y D es medida:

$$\Delta V = V_C - V_D = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) - \left( \frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \right] \quad (2.24)$$

Así la resistividad,  $\rho$ , toma el valor:

$$\rho = \frac{2\pi \Delta V}{I \left[ \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) - \left( \frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \right]} \quad (2.25)$$

En una superficie homogénea e uniforme, la resistividad calculada a partir de la ecuación 25 debe ser constante e independiente de la localización y separación de los electrodos en superficie.

Al existir inhomogeneidades en el subsuelo la resistividad variara de acuerdo a la posición relativa de los electrodos. Cada valor calculado es entonces conocido como resistividad aparente,  $\rho_A$ , que estará dada en función de la forma de la inhomogeneidad. La ecuación 2.25 es la ecuación básica para el cálculo de resistividad aparente en cualquier configuración electródicas. (Kearey, Brooks, & Hill, 2002)

En la realidad, difícilmente se podrá encontrar el caso de un medio homogéneo e isotrópico. Las inhomogeneidades mismas en el subsuelo son el interés de estudio de la prospección, pues son aquellas regiones donde existen contrastes de propiedades resistivas que pueden indicar zonas o materiales de interés.

Características específicas de las formaciones donde se realizan las prospecciones, como porosidad o saturación de líquidos, aunado al tipo de roca, hacen que los materiales

terrestres presenten grandes rangos de resistividad; factor de importancia pues el traslape entre rangos puede generar ambigüedades en la caracterización litológica (Figura 2.3).

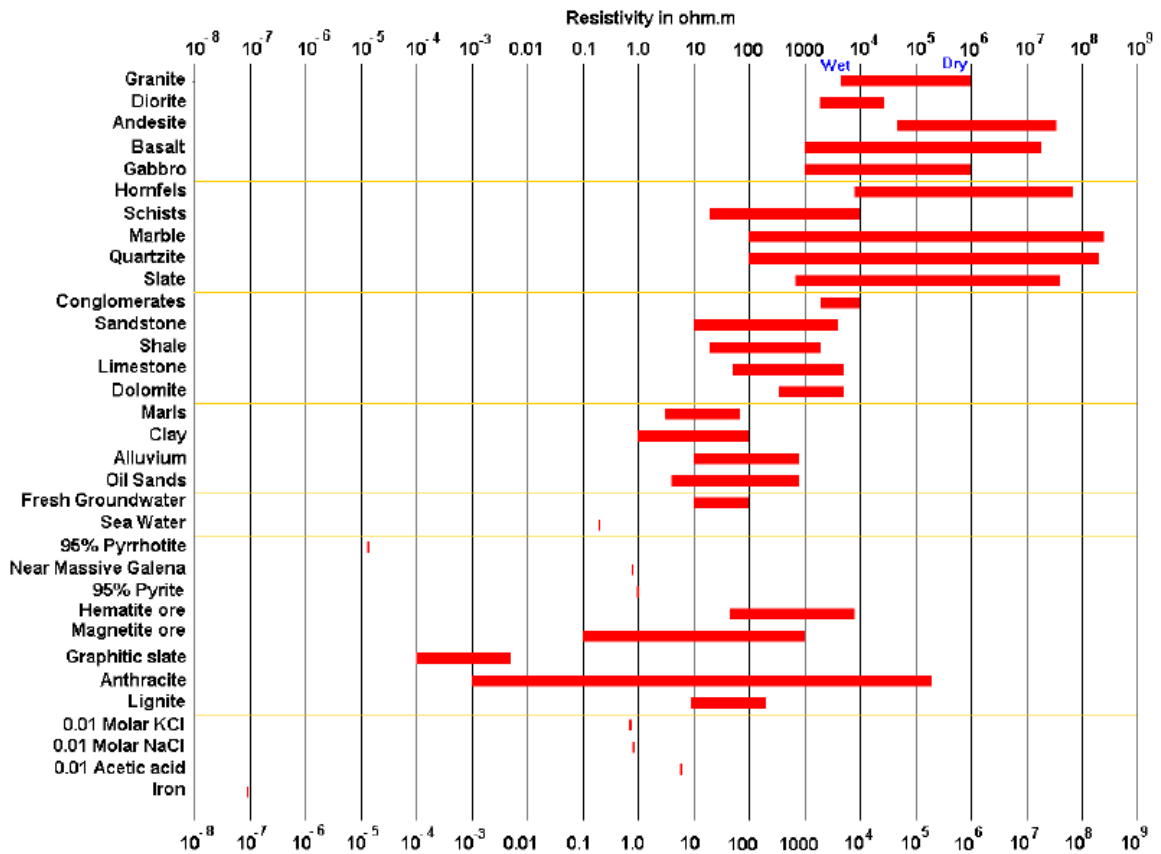


Figura 2.3 Rangos de valores de resistividad de algunos materiales terrestres dependiente de la saturación de líquidos y porosidad. (Extraída de Loke, 2010).

## Factor geométrico y configuraciones electródicas.

Una forma comúnmente utilizada para simplificar la ecuación general de resistividad es agrupar los elementos dependientes de la posición en una variable de proporcionalidad,  $K$ ; por lo cual la ecuación 2.25 toma la forma:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (2.26)$$

Donde  $K$  es conocida como factor geométrico, variable dependiente de la disposición y configuración electródicas. De forma general  $K$  posee el valor:

$$K = 2\pi \left[ \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) - \left( \frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \right]^{-1} \quad (2.27)$$

Cada una de las disposiciones electródicas, utilizadas normalmente en prospección, poseen factores geométricos distintos, siendo esta una de las características que las diferencia entre sí.

A continuación, se presenta un resumen de algunas de las configuraciones electródicas comúnmente utilizadas para prospección eléctrica en superficie.

### Wenner.

En esta configuración los pares de electrodos de corriente y potencial poseen un punto medio común; de igual forma las distancias entre electrodos adyacentes son iguales, tales que  $r_A=R_B=a$ , y  $r_B=R_A=2a$  (Figura 2.4).

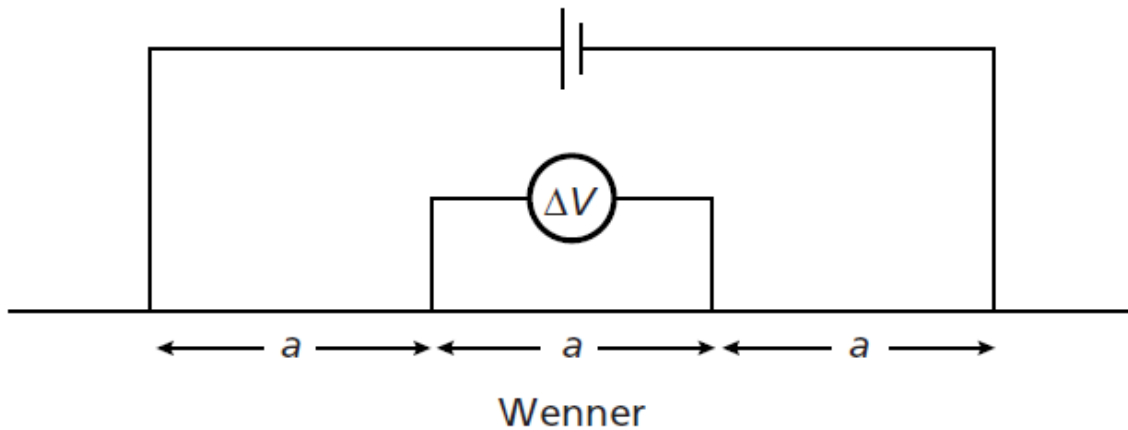


Figura 2.4 Esquema de la disposición electródicas tipo Wenner (Extraída de Kearey, 2002).

Tomando en cuenta lo anterior y sustituyendo en la ecuación 2.27 tenemos lo siguiente:

$$K = 2\pi \left[ \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{2a} \right) - \left( \frac{1}{2a} - \frac{1}{a} \right) \right]^{-1} \quad (2.28)$$

Por lo cual el cálculo de la resistividad aparente,  $\rho$ , toma la forma:

$$\rho = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (2.29)$$

### Schlumberger.

Para el caso de configuración Schlumberger (Figura 2.5) los pares de electrodos de corriente y potencial regularmente poseen puntos medios comunes pero la distancia entre electrodos adyacentes es distinta.



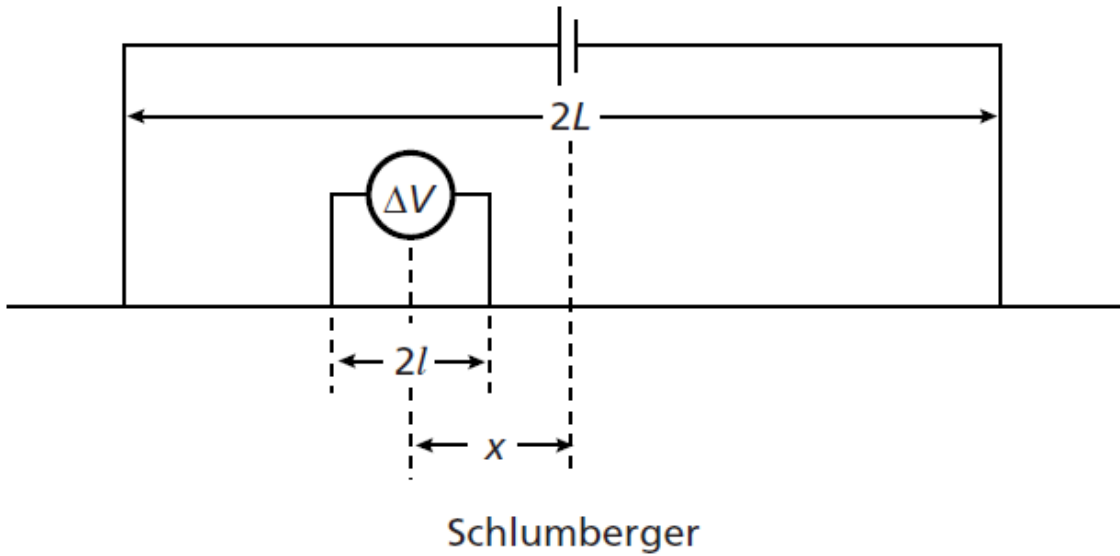


Figura 2.5 Esquema de la configuración Schlumberger (Extraída de Kearey, 2002).

Supongamos que la separación entre electrodos de corriente y potencial toma el valor  $L$  y  $a$  respectivamente. Entonces  $r_A=r_B=(L-a)/2$  y  $R_A=r_B=(L+a)/2$ . Substituyendo en la formula general tenemos:

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \left[ \left( \frac{1}{L-a} - \frac{1}{L+a} \right) - \left( \frac{1}{L+a} - \frac{1}{L-a} \right) \right]^{-1} = \pi \frac{\Delta V (L^2 - a^2)}{I 4a} \quad (2.30)$$

#### Dipolo-Dipolo.

Para esta configuración ambos pares de electrodos se encuentran desacoplados, es decir, completamente separados tales que el espaciamento entre puntos medios,  $L$ , es mucho mayor que la separación entre electrodos del mismo tipo,  $a$ . En este caso tendríamos que  $r_A=r_B=L$ ,  $R_A=L+a$ , y  $r_B=L-a$  (Figura 2.6).

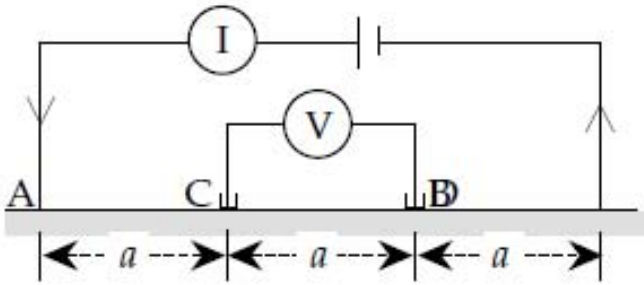
Desarrollando lo anterior, la fórmula para el cálculo de resistividad toma la forma:

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \left[ \left( \frac{1}{L} - \frac{1}{L-a} \right) - \left( \frac{1}{L+a} - \frac{1}{L} \right) \right]^{-1} = \pi \frac{\Delta V L(L^2 - a^2)}{I a^2} \quad (2.31)$$

Cada configuración posee diferentes características que potencializan su utilidad para diversos tipos de prospección. Por ejemplo, la configuración Wenner es utilizada para perfiles laterales; el ensamble de electrodos es trasladado a lo largo de un perfil, manteniendo constante su separación inter-electródicas (Figura 2.6).

Cuando el objetivo es determinar la variación de resistividad con la profundidad se utiliza la técnica conocida como Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs). En este caso lo que tenemos es una configuración Schlumberger cuyo punto medio se mantiene estático, mientras que los electrodos de corriente son distanciados progresivamente; causando así que las líneas de corriente penetren a grandes profundidades, dependiendo de la distribución de conductividad en el subsuelo. (Lowrie, 2007)

(a) Wenner

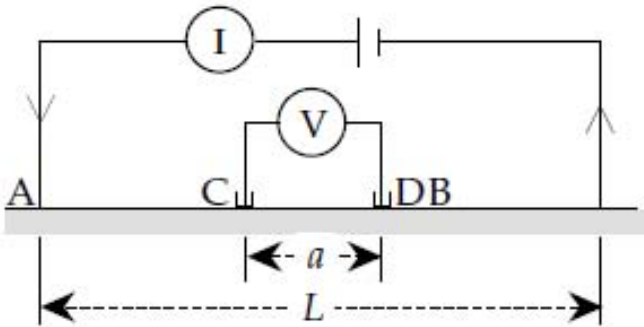


$$r_{AC} = a \quad r_{AD} = 2a$$

$$r_{CB} = 2a \quad r_{DB} = a$$

$$\rho_a = 2\pi \frac{V}{I} a$$

(b) Schlumberger

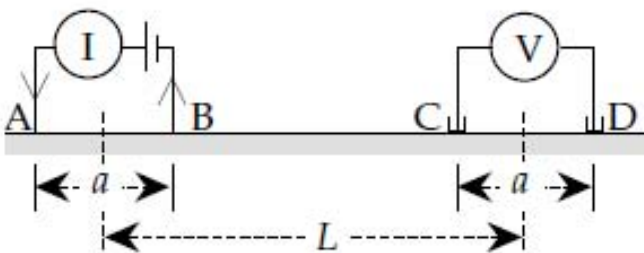


$$r_{AC} = (L - a)/2 \quad r_{AD} = r_{CB}$$

$$r_{CB} = (L + a)/2 \quad r_{DB} = r_{AC}$$

$$\rho_a = \frac{\pi}{4} \frac{V}{I} \frac{(L^2 - a^2)}{a}$$

(c) Double-dipole



$$r_{AC} = L \quad r_{AD} = L + a$$

$$r_{CB} = L - a \quad r_{DB} = L$$

$$\rho_a = \pi \frac{V}{I} \frac{L(L^2 - a^2)}{a^2}$$

Figura 2.6 Resumen de configuraciones electródicas con respecto factor geométrico

(Extraída de Lowrie, 2007).

A continuación, se presentan secuencias de medición utilizadas en prospección eléctrica, no explicadas anteriormente puesto que no son configuraciones per se. Estas secuencias están constituidas a partir de la conjunción de más de una de las configuraciones antes mencionadas.

#### Wenner-Schlumberger.

Como su nombre lo indica esta secuencia es un híbrido de las configuraciones Wenner y Schlumberger. En ella se toman las mediciones a lo largo de una línea de electrodos al estilo Wenner para después incrementar la separación entre los mismos para alcanzar así una mayor profundidad (Figura 2.7). Los puntos de atribución por debajo de la superficie forman una pseudo-sección de forma triangular puesto que cada nivel de adquisición a profundidad tiene una pérdida de 2 puntos de datos. (Loke, 2010)

Esta secuencia es una alternativa razonable si se desea una adquisición con buena resolución tanto vertical como horizontal.

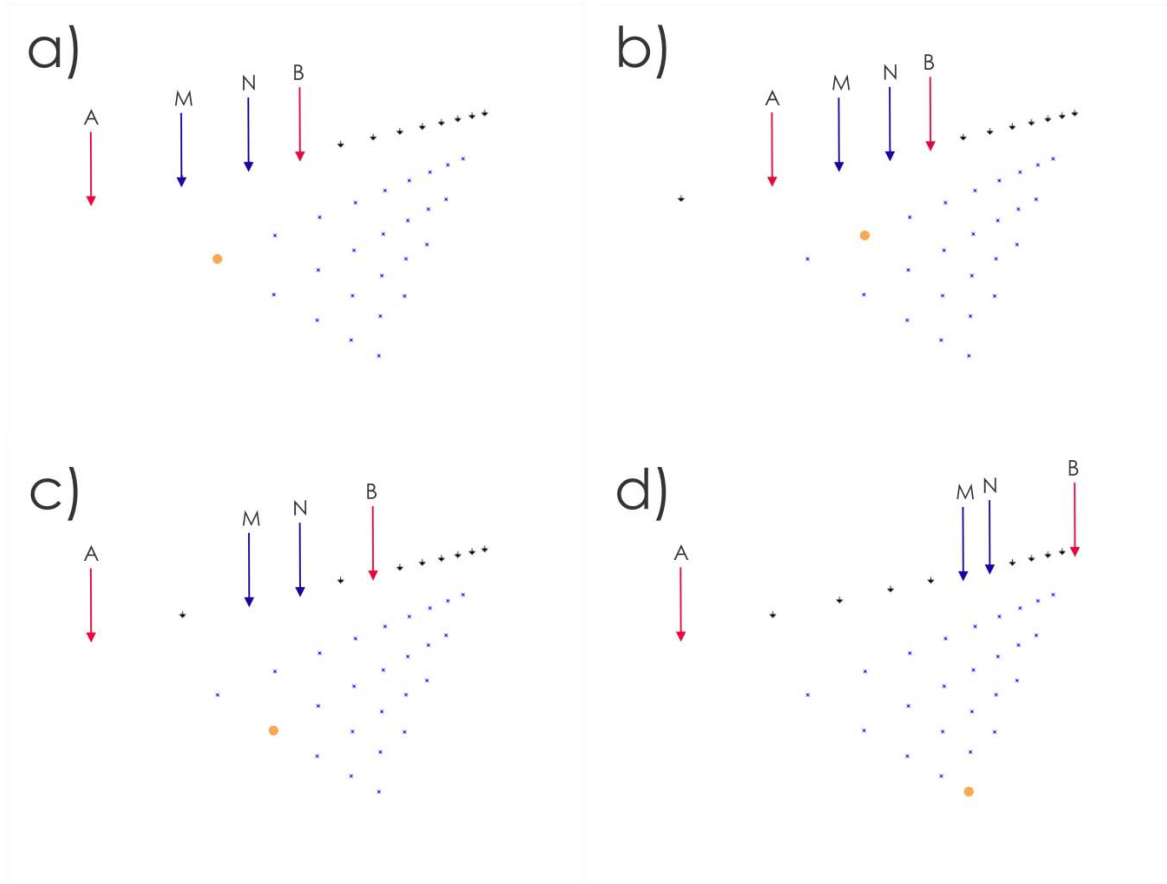


Figura 2.7 Esquema de la secuencia Wenner-Schlumberger. a) Inicio de la secuencia. b) Adquisición de puntos de atribución horizontales al mover el arreglo hacia el otro extremo. c) Adquisición de puntos de atribución a profundidad al separar electrodos de corriente. d) Final de la secuencia y obtención del último punto de atribución a profundidad.

### Ecuatorial.

Este tipo de secuencia puede pensarse como una variación de la configuración Wenner-Schlumberger, con la peculiaridad que los electrodos de corriente y potencial se encuentran en líneas distintas.

Para esto se disponen electrodos equidistantes en 2 líneas paralelas; los electrodos de corriente son colocados en una de las líneas y los electrodos de potencial en la línea restante. El primer electrodo de corriente, A, es colocado en uno de los extremos de la

línea; el segundo electrodo de corriente, B, es colocado de tal forma que entre A y B exista una separación adecuada para que sean colocados los electrodos de potencial (Figura 2.8).

El cuadrípolo avanzará hacia el otro extremo de las líneas para generar puntos de atribución horizontales. Al terminar la secuencia los electrodos de corriente son separados una posición para así poder generar los puntos de atribución a profundidad (Figura 2.8).

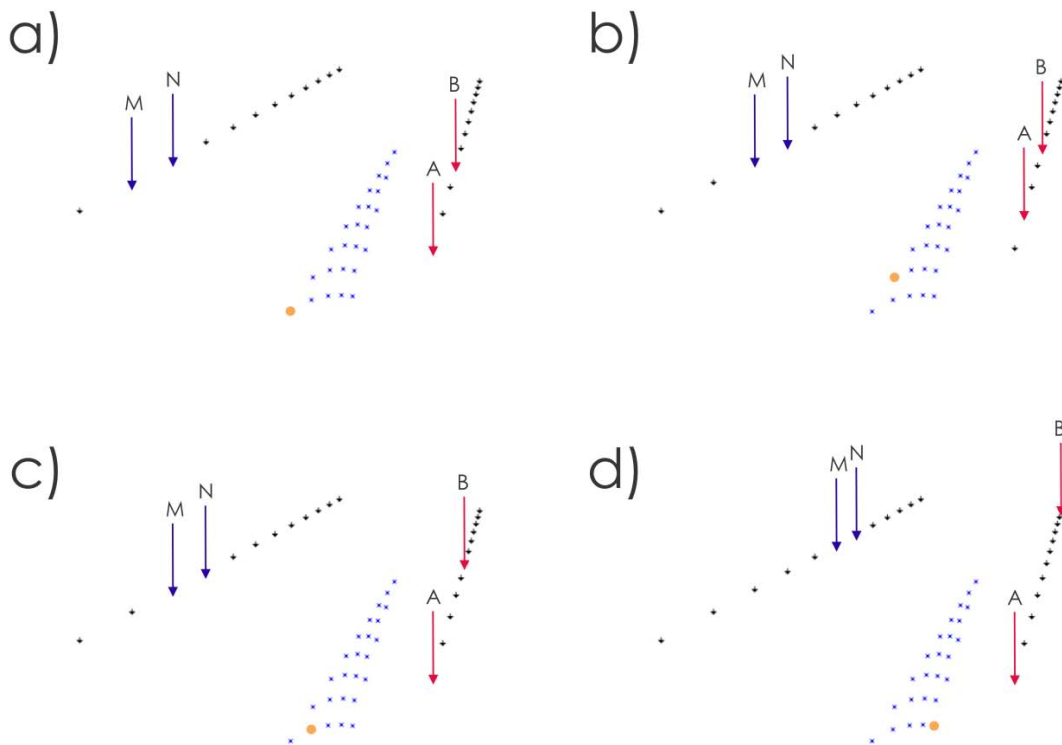


Figura 2.8 Esquema de la secuencia Ecuatorial. a) Inicio de secuencia. b) Adquisición de puntos de atribución horizontales al mover el arreglo hacia el otro extremo. c) Adquisición de puntos de atribución a profundidad al separar electrodos de corriente. d) Final de la secuencia y obtención del último punto de atribución a profundidad.

### Mínimo acoplamiento.

Para esta distribución debemos seguir la misma idea que en el arreglo ecuatorial, con la diferencia de que los electrodos de corriente serán colocados en los extremos de cada línea, uno frente al otro y los electrodos de potencial serán colocados juntos sobre una misma línea, después de alguno de los electrodos de corriente (Figura 2.9).

En otras palabras, M y N residirán juntos en la misma línea, de modo que en una línea tendremos los electrodos B, M y N de forma consecutiva y en la otra línea solo tendremos A. M y N se recorrerán al final de la línea generando los puntos de atribución a profundidad, al terminar su desplazamiento los electrodos de corriente A y B avanzarán a la posición siguiente para la obtención de datos de manera horizontal (Figura 2.9).

Una vez terminado el proceso los electrodos de potencial M y N cambian a la otra línea paralela, en este caso la línea que poseía el electrodo de corriente A, para así generar los puntos de atribución de la pseudo-sección faltante (Figura 2.9).

A diferencia del arreglo Ecuatorial el Mínimo Acoplamiento crea dos líneas de adquisición paralelas; cada sección se encontrará a un cuarto de la separación total entre líneas de electrodos, acercándose más a aquella línea que poseía los electrodos de potencial.

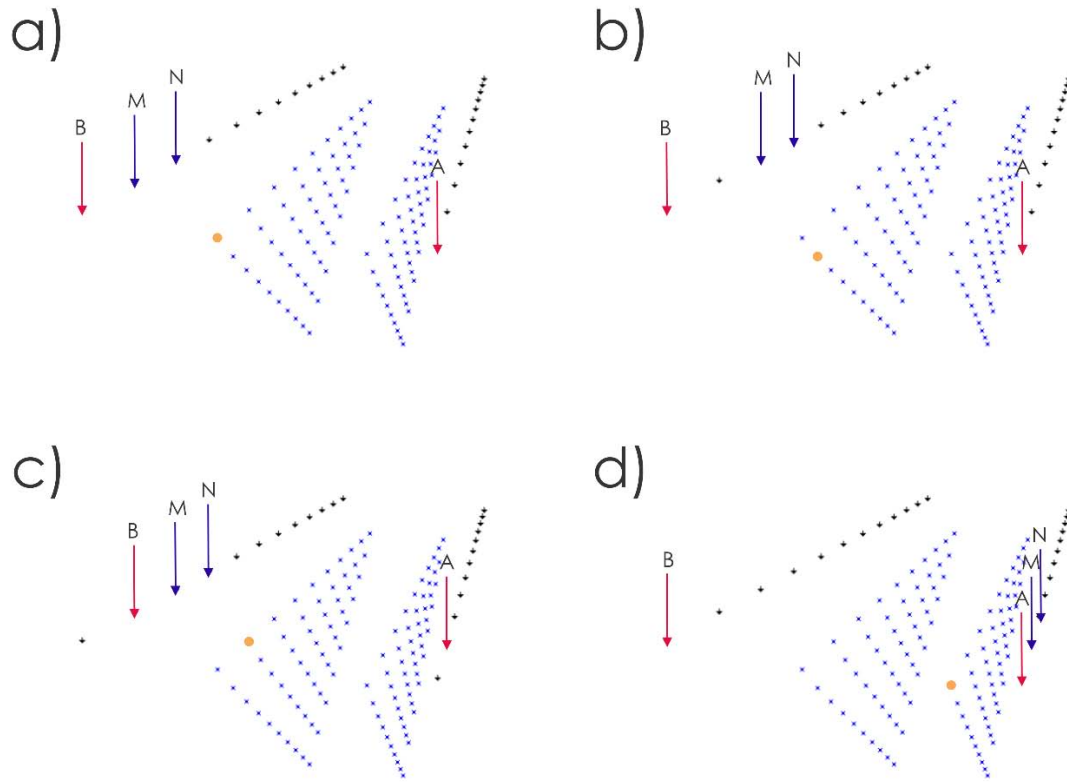


Figura 2.9 Esquema de la secuencia Mínimo acoplamiento. a) Inicio de la secuencia para la primera pseudo-sección. b) Adquisición de puntos de atribución a profundidad alejando electrodos de potencial de su posición inicial. c) Adquisición de puntos de atribución horizontales al desplazar todo el arreglo hacia el otro extremo. d) Inicio de la secuencia para la segunda pseudo-sección.



Arreglos no convencionales.

#### Arreglo L.

Propuesto por Tejero-Andrade et al. (2015) como solución para tomografías aplicadas en zonas altamente urbanizadas donde no existe la posibilidad de extender grandes perfiles paralelos para obtener información tridimensional. El arreglo en L es una secuencia Wenner-Schlumberger en geometría no lineal, con forma de L como su nombre lo indica (también puede utilizarse dipolo-dipolo, polo-polo, etcétera).

La complejidad de este arreglo yace en el cálculo de la distribución de puntos de atribución a profundidad; la localización en el plano XY será el punto medio de la línea que une la posición central de los electrodos de corriente y potencial; la coordenada Z es obtenida a partir de la función de sensibilidad (Tejero-Andrade et al. 2015).

La secuencia inicia en uno de los extremos, teniendo primero uno de los electrodos de corriente, A, seguido de ambos electrodos de potencial M y N, cerrando el circuito con el electrodo de corriente B en la posición inmediata después del electrodo M (Figura 2.10).

El arreglo se va desplazando hasta llegar al otro extremo del cual se empezó generando puntos de atribución horizontales. Terminado esto se regresa a la posición inicial, pero son separados los electrodos para incrementar la profundidad de penetración y que de esa forma sean generados los puntos de atribución faltantes (Figura 2.10).

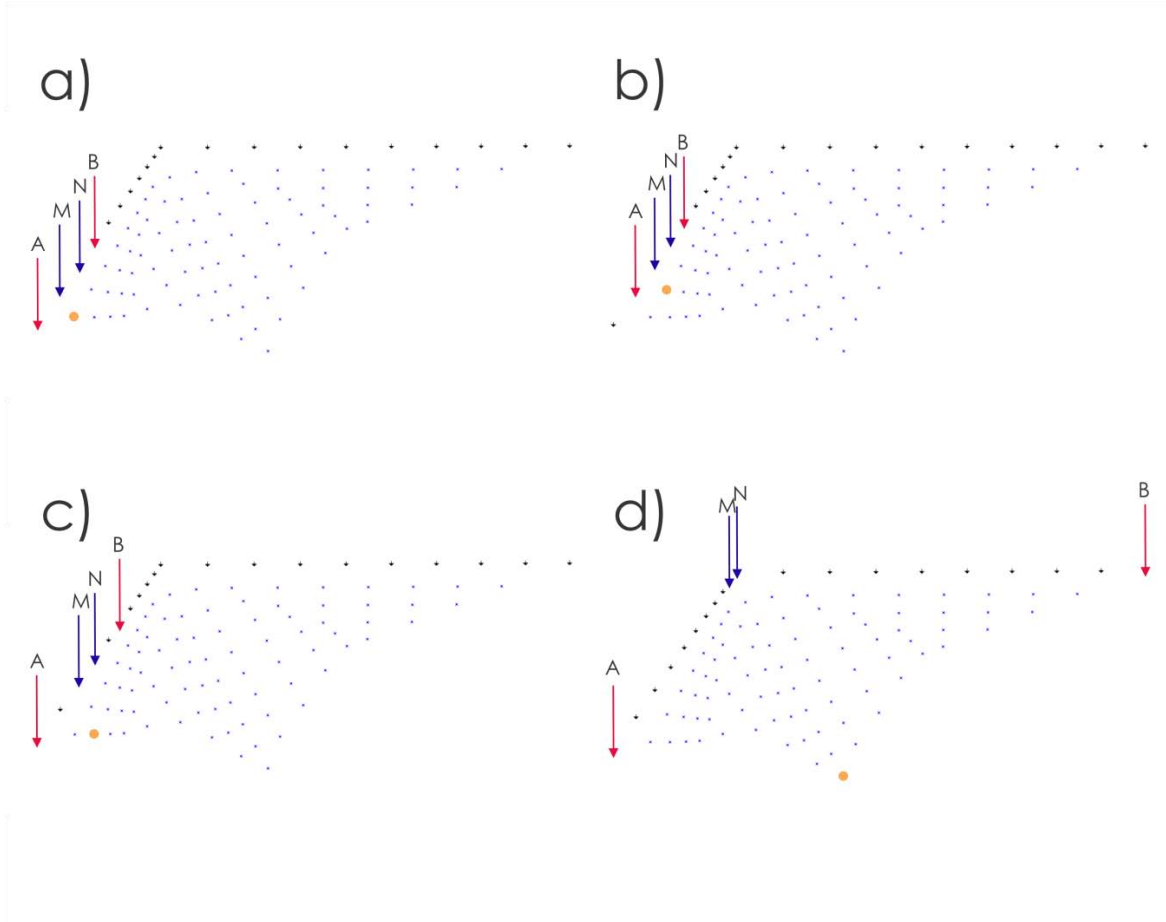


Figura 2.10 Esquema de la secuencia del Arreglo L. a) Inicio de la secuencia. b) Adquisición de puntos de atribución horizontales al mover el arreglo hacia el otro extremo. c) Adquisición de puntos de atribución a profundidad al separar electrodos de corriente. d) Final de la secuencia y obtención del último punto de atribución a profundidad.

### Centroide.

Para llevar a cabo esta secuencia es necesario contar con al menos tres líneas de electrodos que formen ángulos rectos entre sí, asemejando la forma de una herradura (Figura 2.11).

Los electrodos de corriente son colocados en el principio y fin de la herradura. En la línea frente a los electrodos de corriente se colocan los electrodos de potencial los cuales van recorriendo la línea de un extremo a otro. Terminadas las mediciones, los electrodos de corriente son desplazados una posición acercándose a los electrodos de potencial (Figura 2.11).

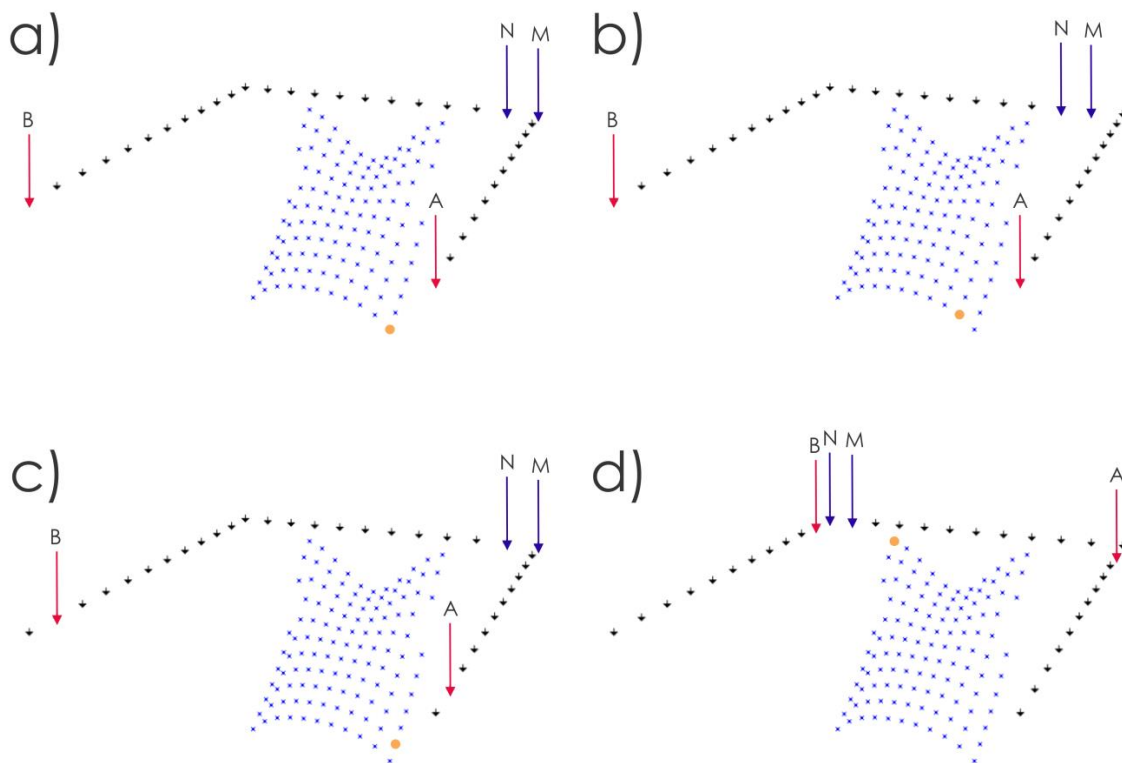


Figura 2.11 Esquema de la secuencia Centroide. a) Inicio de la secuencia. b) Adquisición de puntos de atribución al cambiar de posición electrodos de corriente. c) Adquisición de puntos de atribución al modificar la posición de los electrodos de potencial. d) Final de la secuencia y adquisición de la última medición al haber recorrido electrodos de corriente.

## Tomografía de resistividad eléctrica.

La tomografía de resistividad eléctrica tiene como objetivo determinar la distribución de la resistividad,  $\rho$ , en el subsuelo a partir de mediciones tomadas en superficie.

Cada dato obtenido en las mediciones depende de la distribución volumétrica de resistividad. Se tendera al error si se espera determinar la distribución tridimensional de resistividad cuando se tienen pocos datos o no están distribuidos de una manera adecuada; las dimensiones en que son adquiridos los datos deben coincidir con las dimensiones en que está distribuida la resistividad en el subsuelo.

La tomografía resistividad eléctrica surge como una solución al problema antes descrito puesto que las técnicas de prospección iniciales, sondeos eléctricos verticales, por ejemplo, carecen de las dimensiones espaciales necesarias si se quiere caracterizar el subsuelo de forma tridimensional.

Combinaciones de electrodos y secuencias de medición permiten una distribución compleja de puntos de atribución en todas las direcciones espaciales, lo que permite tener mayor cobertura y definición a la hora de la obtención de datos; acercándonos de forma más eficiente a la distribución de resistividad real.

## Teoría de inversión.

De forma general, un prospecto geofísico consiste de una fuente de energía (artificial o natural), un modelo del subsuelo y una respuesta. (Figura 2.12).

En el caso de la prospección eléctrica, el modelo del subsuelo está caracterizado por una distribución tridimensional de resistividad y la respuesta es el campo eléctrico o potencial medido en superficie.

La propagación de corriente eléctrica por el subsuelo dependerá de la distribución tridimensional de resistividad.

Puesto que cada punto de atribución es susceptible a lo que sucede en el volumen a su alrededor, una imagen de los datos no es capaz de proveer directamente información localizada acerca de la geología del subsuelo. Toda imagen de datos representa una imagen convolucionada de lo que realmente existe debajo de la superficie, por lo cual la interpretación directa suele ser altamente ambigua (Oldenburg, 2005).

Dicho lo anterior es necesario hacer interpretación basado en una representación más directa de la distribución de resistividad, por lo cual se sigue un proceso de inversión y modelado de datos para extraer esa información.

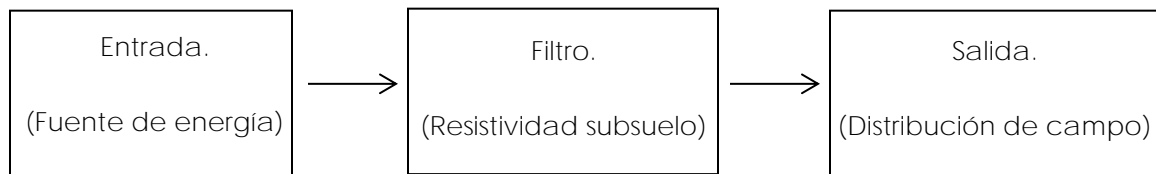


Figura 2.12 Componentes principales del prospecto geofísico. Entrada o fuente de energía; filtro terrestre, que es la distribución de resistividad y la salida que es el campo medido.

A grandes rasgos, los datos extraídos a partir de algún método de prospección geofísica pueden escribirse como:

$$F_j[m] = d_j + n_j \quad j = 1, \dots, N \quad (2.32)$$

Donde  $F$  es un operador del modelo directo que incorpora detalles del diseño de la prospección y las ecuaciones físicas relevantes,  $m$  es un símbolo genérico para la distribución de la propiedad física; el lado derecho de la ecuación representa el dato observado,  $d_{obs}$ , que consiste del dato verdadero,  $d$ , con la adición de ruido,  $n$ .

En un prospecto geofísico se obtienen  $N$  datos,  $d_{obs}$ , y algo de conocimiento acerca de sus incertidumbres. La meta del problema inverso es encontrar el modelo  $m$  que produjo las mediciones ruidosas,  $d_{obs}$ .

En la práctica no es posible obtener una cantidad infinita de datos perfectamente precisos, pero si existiese dicha posibilidad tendríamos una solución única.

Si existiese una respuesta única entonces adquiriendo datos suficientes e imponiendo ciertas condiciones de continuidad, la inversión puede ser capaz de recuperar características específicas de la Tierra, en este caso la distribución de resistividad.

### Modelado.

El modelado o problema directo implica el cálculo de la respuesta bajo la asunción que la fuente y el filtro (modelo de la Tierra) son conocidos. En otras palabras, el modelo es la ecuación diferencial parcial que gobierna la relación entre los datos y los parámetros del modelo.

Se define también como el proceso de predecir datos de resistividad a partir de la configuración electródica, el modelo y sus parámetros. Crea conjuntos de datos sintéticos a partir de los parámetros establecidos para el modelo y los datos observados.

Para el caso del modelado directo para la tomografía de resistividad eléctrica el problema a resolver se describe por la ecuación diferencial del potencial, que tiene la forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \sigma \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \sigma \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) = I(x, y, z) \quad (2.33)$$

Ecuación dependiente de la conductividad del medio,  $\sigma$ ; corriente eléctrica,  $I$ ; potencial eléctrico escalar,  $V$ ; y la geometría del arreglo y de la cual podemos obtener la información deseada.

### Inversión.

La inversión o problema inverso se define como el proceso de determinar los estimados del parámetro del modelo teniendo como base los datos medidos y el modelo directo.

Reconstruye la distribución de resistividad en el subsuelo a partir de datos de corriente y voltaje medidos. Se parte de los valores de resistividad aparente medidos para determinar la distribución de resistividad en el subsuelo que dio lugar a esas mediciones.

También se define como el proceso de determinar los parámetros que controlan el modelo a partir de los datos obtenidos en campo y el modelo directo. La inversión es un mapeo desde el espacio de datos al espacio del modelo y reconstruye la distribución de resistividad del subsuelo a partir de los datos de corriente y voltaje medidos.

Mencionado lo anterior y en teoría, existe una infinidad de modelos que pueden adaptarse a los datos por lo cual la inversión no posee solución única.

Determinación de error.

Uno de los objetivos de la inversión de datos en la tomografía de resistividad eléctrica es proporcionar el modelo que mejor ajuste a los datos reales. Para determinar este parámetro se utilizan normalmente dos estimadores de error; descritos a continuación:

Error cuadrático medio.

Conocido como RMS por sus siglas en inglés este estimador se utiliza para cuantificar las diferencias entre valores predichos por el modelo y los datos observados. Representa la desviación estándar muestral de las diferencias entre datos predichos y datos observados.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_{i_{calc}} - d_{i_{obs}})^2}{N}} \quad (2.34)$$

Se calcula como la raíz cuadrada de la media del cuadrado de las desviaciones entre datos calculados,  $d_{calc}$ , y datos observados,  $d_{obs}$ . La variable  $N$  representa el número de muestras o pares de datos y suele representarse en forma de porcentaje.

La utilidad del error RMS reside en representar las magnitudes de los errores de las predicciones de todos los datos en una medida única con poder predictivo. Siendo así una medida de la exactitud en que se ajustan el modelo a la secuencia de datos.

La problemática que enfrenta este estimador, y por lo cual se respalda con otra norma, es que cada error individual es proporcional al tamaño del error cuadrático, por lo cual errores muy grandes tienen un efecto desproporcional y muy grande haciendo al error RMS altamente sensible a valores anómalos.

#### Norma L<sup>2</sup>.

Esta norma se calcula como la sumatoria de los errores ponderados al cuadrado. Por ser ponderada este estimador no es susceptible a datos anómalos, siendo el caso en que la ponderación de los valores sea la adecuada.

$$L^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{d_{i_{calc}} - d_{i_{obs}}}{W_i} \right)^2 \quad (2.35)$$

Donde  $d_{calc}$  representa los datos calculados por el modelo y  $d_{obs}$  los datos observados, la variable  $N$  representa el número de muestras o pares de datos y  $W$  es el peso o ponderación de los datos. A diferencia del error cuadrático medio (RMS) la norma  $L^2$  se representa como una cantidad escalar igual o mayor a cero.



### 3. Metodología

Este trabajo consta del conjunto de datos obtenidos en diversas campañas de exploración en diferentes fechas. Todos los levantamientos fueron hechos entre los meses de diciembre a marzo en los años de 2009, 2014, 2016 y 2017 (Figura 3.1).

El objetivo de esta investigación es identificar y mapear estructuras de origen antropogénico que datan de la construcción del primer cuadro de la ciudad; específicamente túneles o estructuras por debajo del edificio de catedral que presumen tener conectividad con otras edificaciones de importancia durante la época de la colonia.

## Tomografía de Resistividad Eléctrica Catedral.

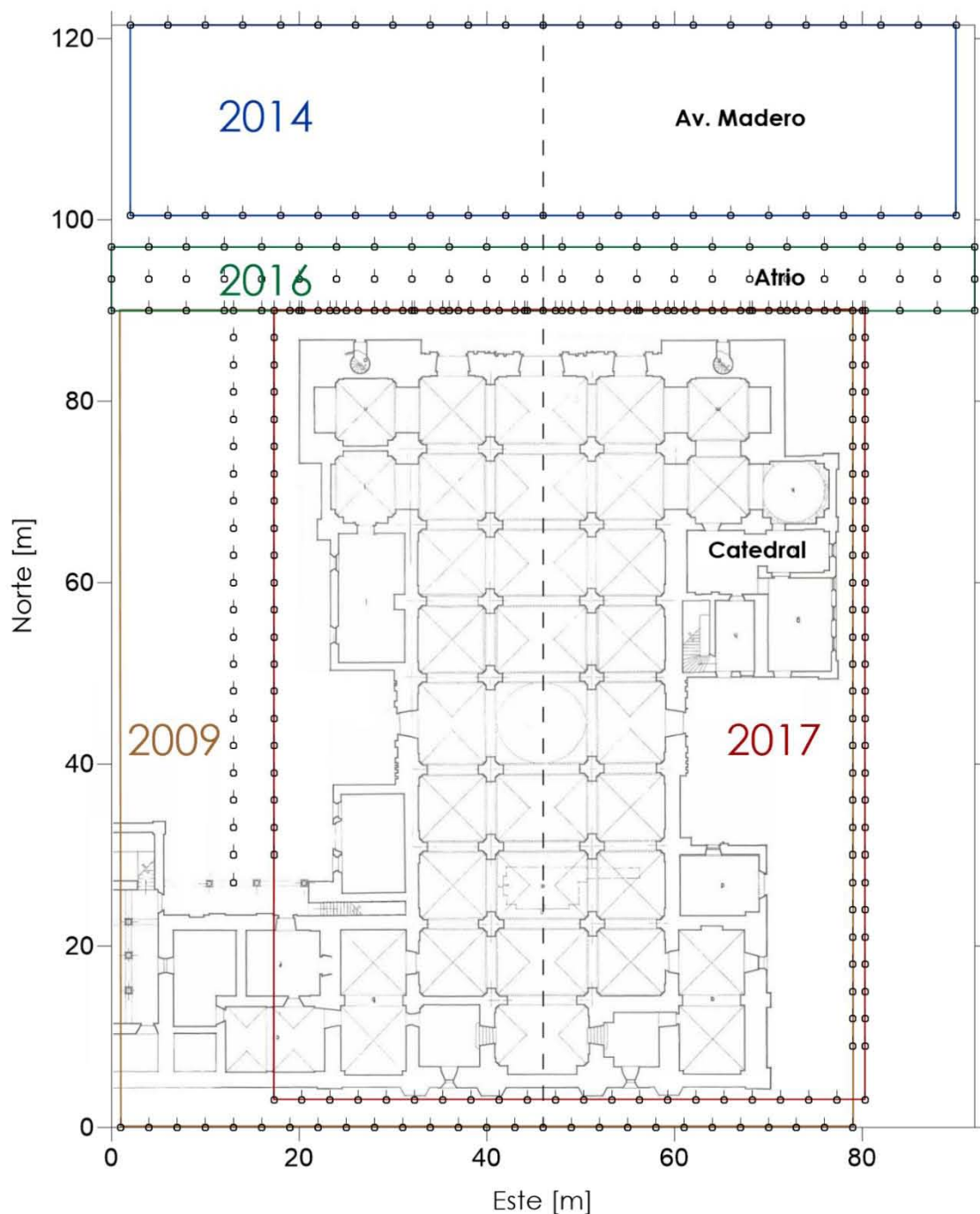


Figura 3.1 Esquema de localización de áreas de prospección para cada año, señaladas por rectángulos de colores, superpuestos al plano de catedral. Círculos pequeños indican posición de electrodos. Línea segmentada indica posición de entrada principal.

## Equipo.

Se utilizó un resistivímetro Syscal Pro, distribuido por IRIS instruments; el cual es un controlador multicanal de resistividades con capacidad para el manejo de 48 electrodos. El número de electrodos puede duplicarse, llegando a 96, si le es acoplada una caja de extensión denominada Syscal Switch Pro. Los electrodos son conectados a la consola y a la extensión por medio de cables multi-core (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Características técnicas del resistivímetro Syscal Pro.

Características	
Transmisor	
Voltaje	0-2000 Vpp
Corriente	0-2500 mA
Poder	Convertidor DC/DC interno de 250W auto controlado
Batería	Interna o externa de 12 V
Receptor	
Duración de pulso	250 ms, 500 ms, 1 s, 2 s, 4 s o 8 s
Canales	10 entradas diferentes
Impedancia de entrada	100 MOhms
Voltaje de entrada	15 V, ganancia automática, protección de entrada 1000V
Resolución/Exactitud	1 $\mu$ V/ 0.2 %
Reducción de ruido	Reducción de líneas de poder, corrección de deriva lineal para potencial espontaneo
Dimensiones	
L x A x A	31 x 23 x 31 cm, cobertura de fibra de carbono resistente al clima
Temperatura de operación	-20 a 70 °C

2009.

Fueron utilizados 98 electrodos dispuestos alrededor del edificio de catedral. El espaciamiento entre electrodos fue de 3 metros y cada punto de atribución fue medido a partir de una secuencia dipolo-dipolo; en total este trabajo de prospección constó de 2439 mediciones independientes (Figura 3.2).

Este levantamiento posee dimensiones de 78 metros en dirección Este y 90 metros en dirección Norte, cubriendo un área total de 7020 metros cuadrados (Figura 3.2).

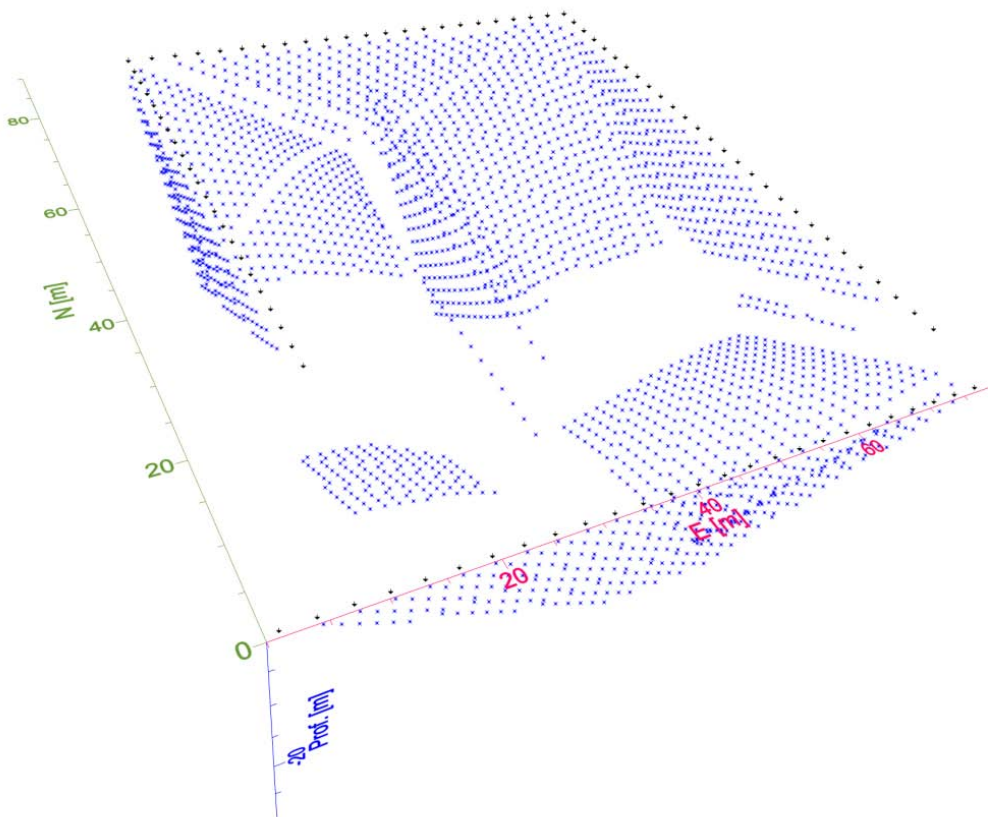


Figura 3.2 Puntos de atribución, señalados con pequeños círculos azules, para el levantamiento del año 2009. Posición de electrodos señalizada con triángulos negros en superficie.

2014.

Fueron utilizadas 46 placas de cobre a manera de electrodos; acopladas con la ayuda de gel conductor utilizado en algunas aplicaciones médicas. Se colocaron en dos líneas paralelas espaciadas 21 metros; cada línea poseía 23 electrodos con separación de 4 metros entre sí (Figura 3.3).

La elección de esta metodología es debido a la versatilidad de arreglos que se puede tener al colocar líneas paralelas, puesto que podemos crear perfiles justo por debajo de las líneas de electrodos utilizando la secuencia Wenner-Schlumberger y también se pueden crear puntos de atribución en el espacio entre estas líneas utilizando las configuraciones Ecuatorial y Mínimo acoplamiento.

El arreglo poseía una longitud de 21 metros en dirección Norte y 88 metros en dirección Este; con lo cual se cubrió un área de 1848 metros cuadrados. En total fueron tomadas 1087 mediciones independientes a partir de las tres secuencias de medición antes mencionadas (Figura 3.3).

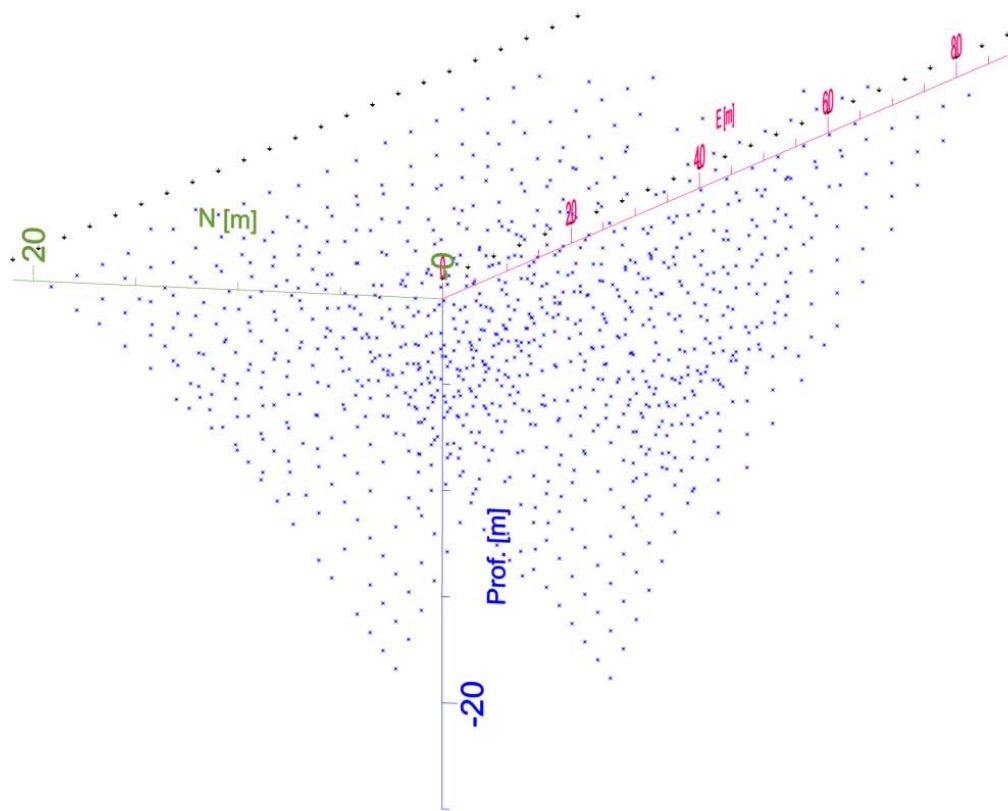


Figura 3.3 Puntos de atribución para el levantamiento de diciembre de 2014. Cada punto azul hace referencia a una medición. Posición de electrodos señalizada con triángulos negros en superficie.

2016.

En esta ocasión se siguió la metodología implementada en 2014 solo con algunas particularidades.

Los electrodos fueron colocados en líneas paralelas de 24 electrodos con separación de 4 metros entre sí; el espaciamiento entre líneas fue de 3.5 metros y se hizo un roll along con la línea central en dirección Norte, manteniendo la misma distancia entre líneas; con lo cual se cubrió un área total de 644 metros cuadrados en el atrio de la catedral (Figura 3.4).

En esta ocasión solo fueron utilizadas las secuencias Wenner-Schlumberger y Ecuatorial por lo cual se obtuvo un total de 484 puntos de atribución.

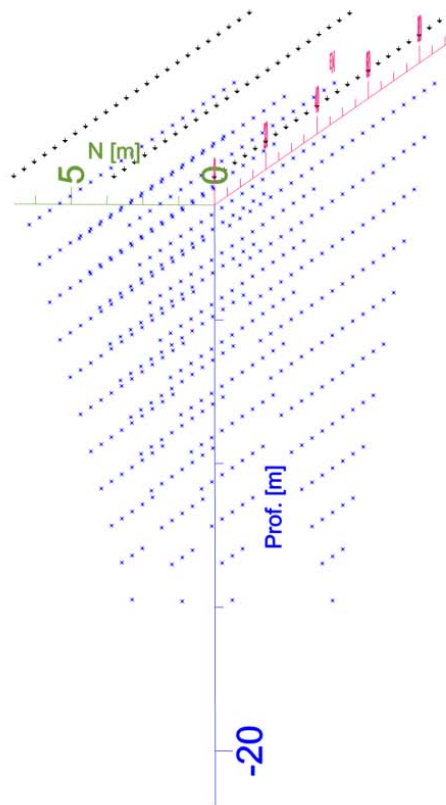


Figura 3.4 Puntos de atribución para el levantamiento de febrero de 2016; señalizados por puntos azules. Posición de electrodos señalizada con triángulos negros en superficie.

2017.

Para la prospección de este año fueron utilizados 92 electrodos con una separación de 3 metros entre sí, en un arreglo mixto o no convencional; los electrodos fueron colocados alrededor del edificio de catedral con una separación de 4.3 metros del muro Norte, 2.3 metros del muro Sur, 3.2 metros del muro Este y 2.9 metros del muro Oeste.

Lo que diferencia este estudio de los anteriores es la utilización de todas las secuencias descritas, con lo cual se obtuvo gran densidad de datos que permitirán la obtención de resultados más certeros.

Ejemplo de lo anterior es la secuencia Wenner-Schlumberger utilizada en 2017, por la cantidad de electrodos fue posible la obtención de 2112 puntos de atribución (Figura 3.5).



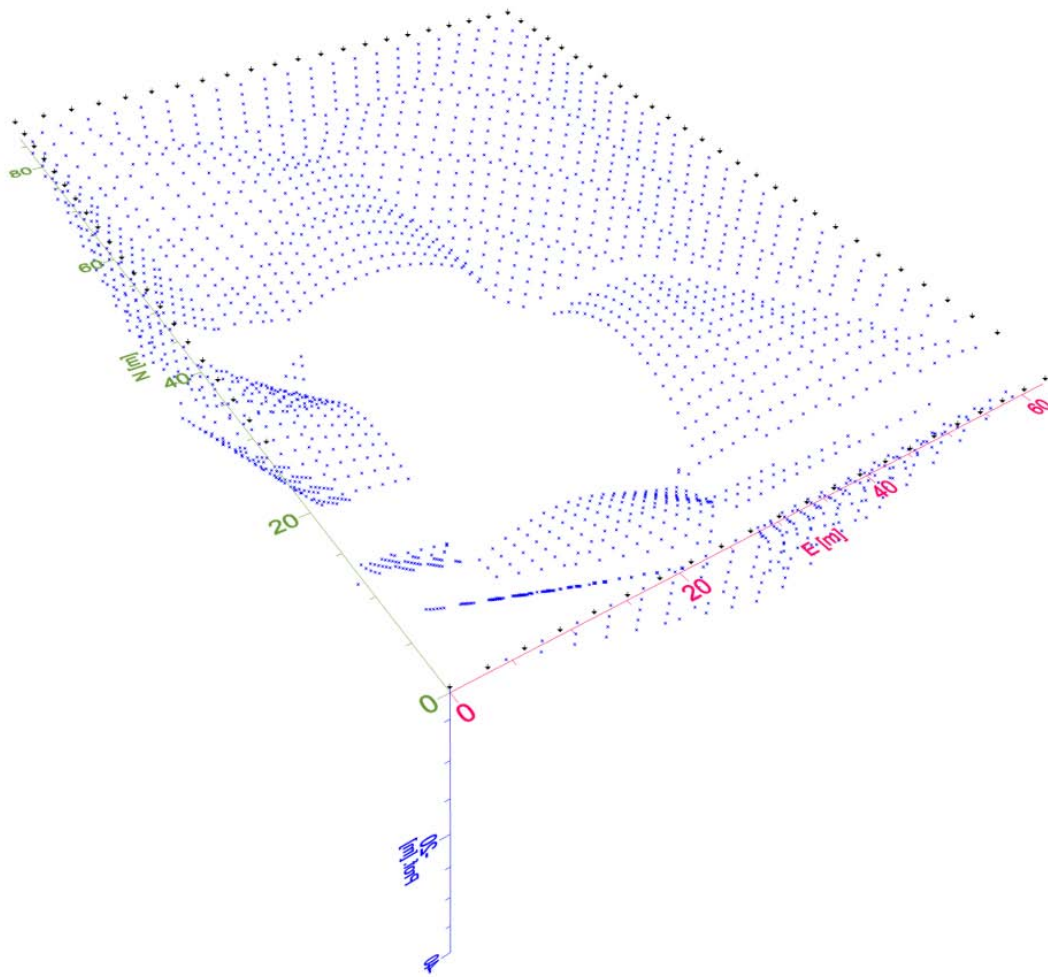


Figura 3.5 Puntos de atribución para el levantamiento de enero de 2017 con la secuencia Wenner-Schlumberger. Posición de electrodos señalizada con triángulos negros en superficie.

Las secuencias Ecuatorial y Mínimo acoplamiento utilizadas en el año descrito son presentadas en conjunto por ser las de menor número de cuadripolos medidos. Con el arreglo Ecuatorial se obtuvieron 254 mediciones mientras que con Mínimo acoplamiento fueron obtenidos 847 datos; siendo así un total de 1101 mediciones independientes (Figura 3.6).

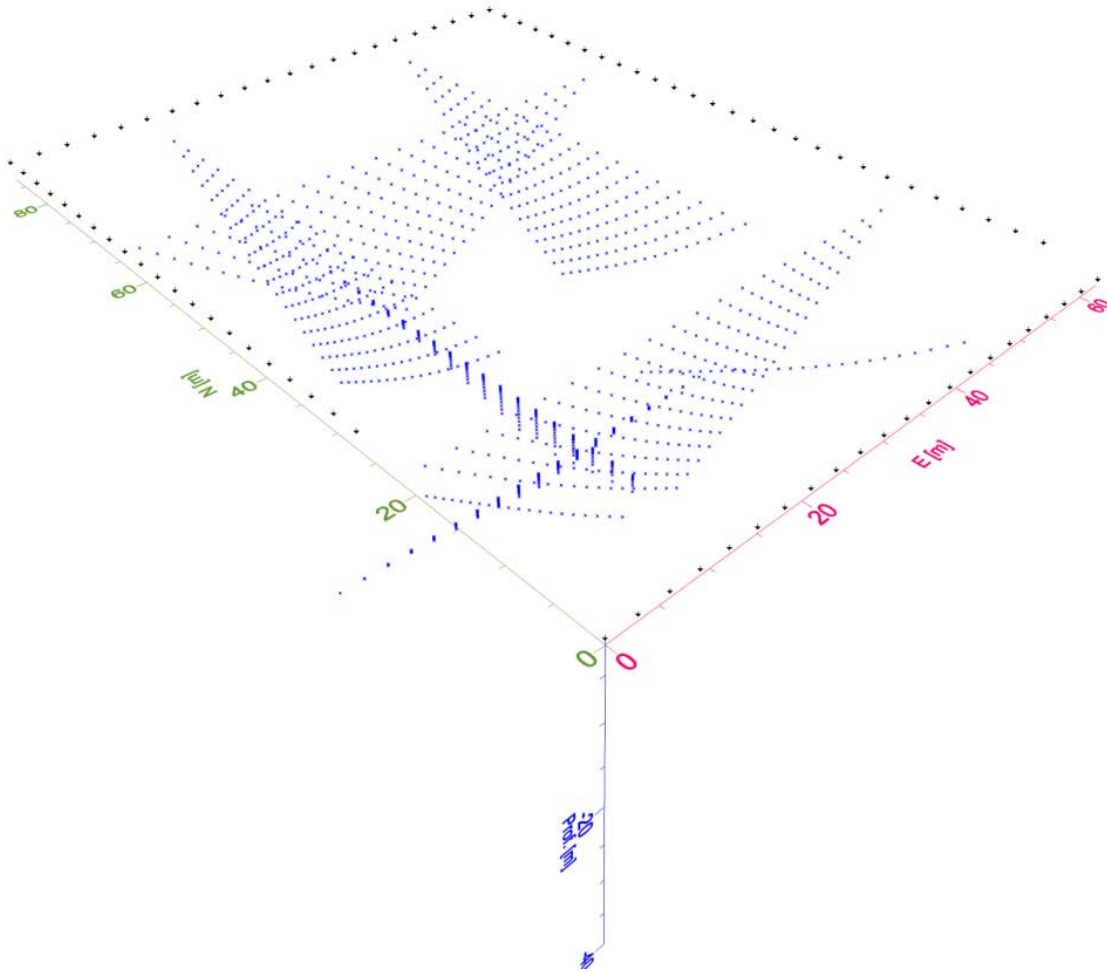


Figura 3.6 Puntos de atribución para el levantamiento de enero de 2017 con las secuencias Ecuatorial y Mínimo acoplamiento. Posición de electrodos señalizada con triángulos negros en superficie.

Llevando a cabo la secuencia Centroide se logró obtener una cobertura de alta densidad en la parte central del área de prospección, alcanzando profundidades teóricas de 40 metros. En total se obtuvo una serie de 1869 datos (Figura 3.7).

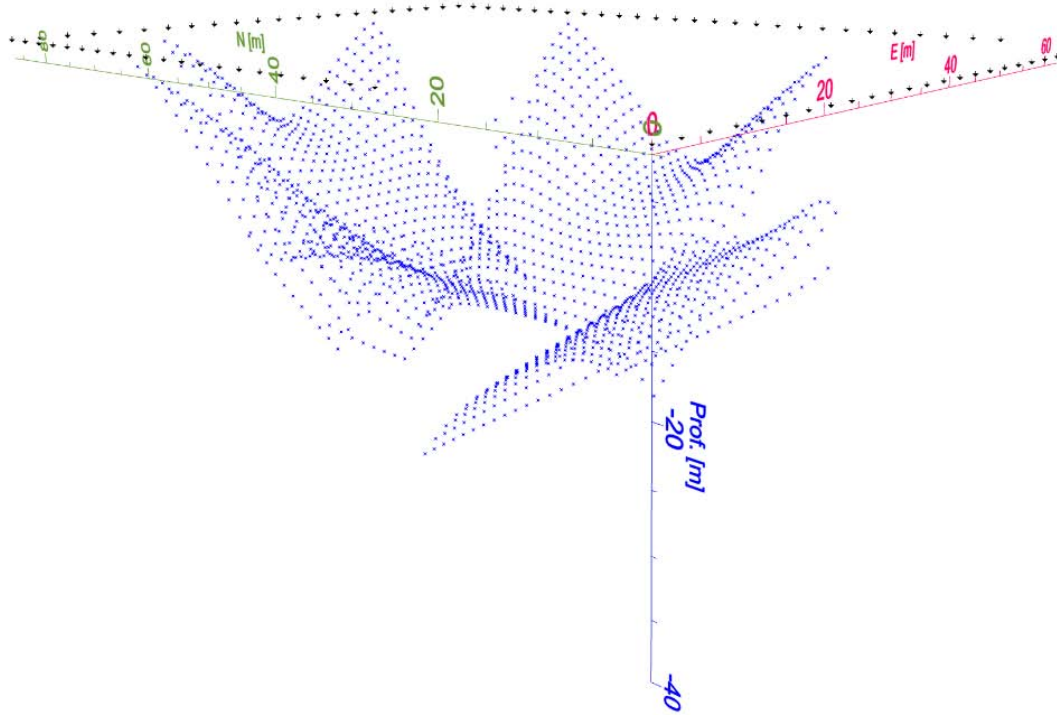


Figura 3.7 Puntos de atribución para el levantamiento de enero de 2017 con la secuencia Centroide. Posición de electrodos señalizada con triángulos negros en superficie.

En conjunto fueron medidos un total de 5082 cuadripolos, cubriendo un área total de 5481 metros cuadrados, donde cada secuencia pretende compensar el vacío de información dejado por alguna de las otras secuencias (Figuras 3.8 y 3.9).

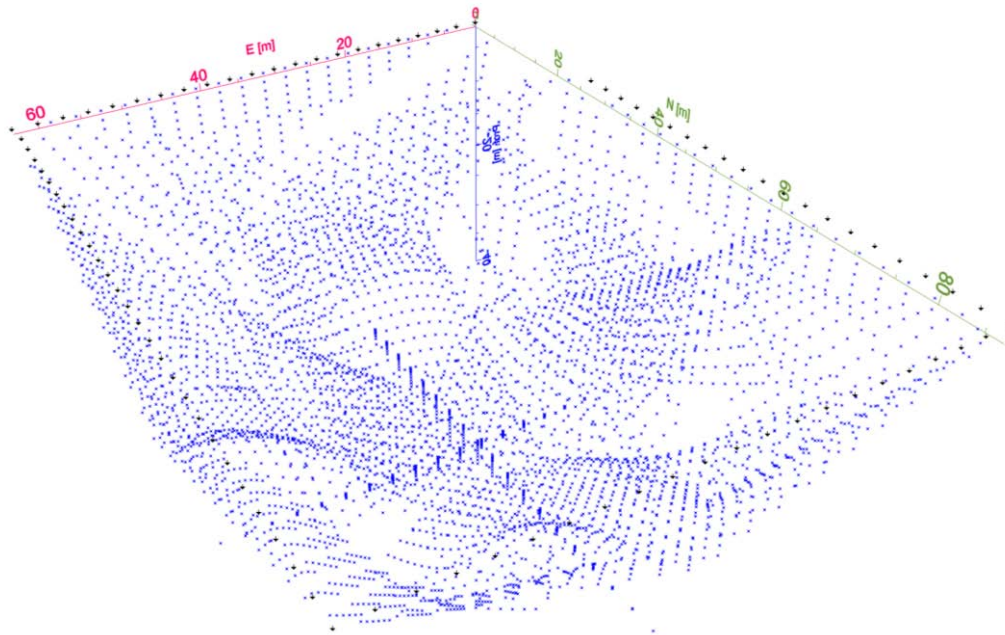


Figura 3.8 Total de los puntos de atribución para el levantamiento de enero de 2017 visto del NE. Posición de electrodos señalizada con triángulos negros en superficie.

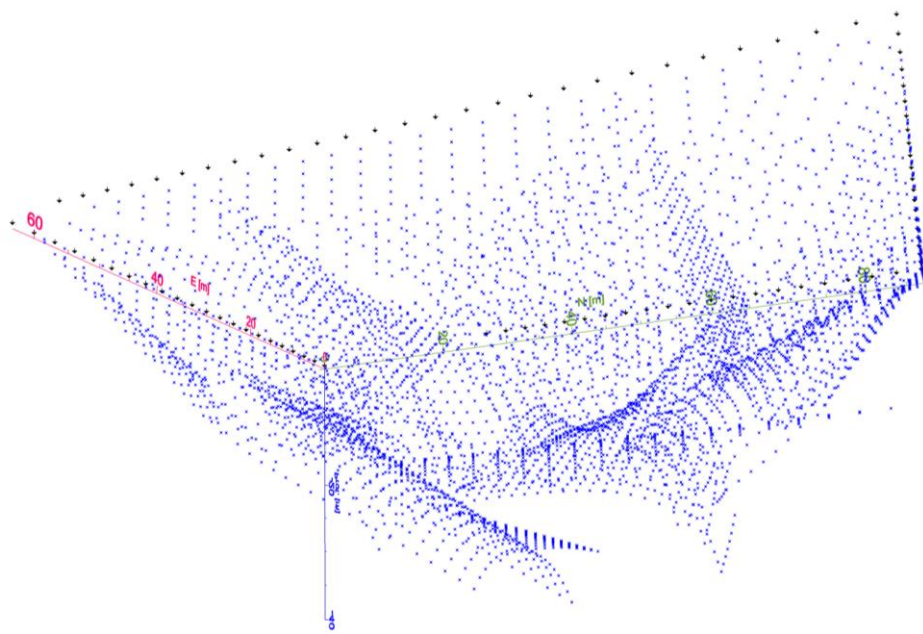


Figura 3.9 Total de los puntos de atribución para el levantamiento de enero de 2017 visto del E. Posición de electrodos señalizada con triángulos negros en superficie.

## 4. Resultados y análisis

Los resultados son presentados por año y analizados dependiendo de las estructuras encontradas en cada distribución de datos. Aunado a eso se presentan modelos de inversiones conjuntas cuando estas pudiesen brindar alguna clase de información relevante, no visible en los otros modelos.

2009.

A partir de la inversión y modelado de los 2439 datos obtenidos en la prospección del año 2009 se generaron cubos de isosuperficies de resistividad para la visualización de anomalías o posibles estructuras de interés, este modelo presentó un error comparativo (RMS) entre datos medidos y predichos de 6.71 % y un valor para la norma  $L^2$  de 0.95.

Se han encontrado al menos dos estructuras que, por su morfología y profundidad, se han vuelto objetos de interés (Figura 4.1).

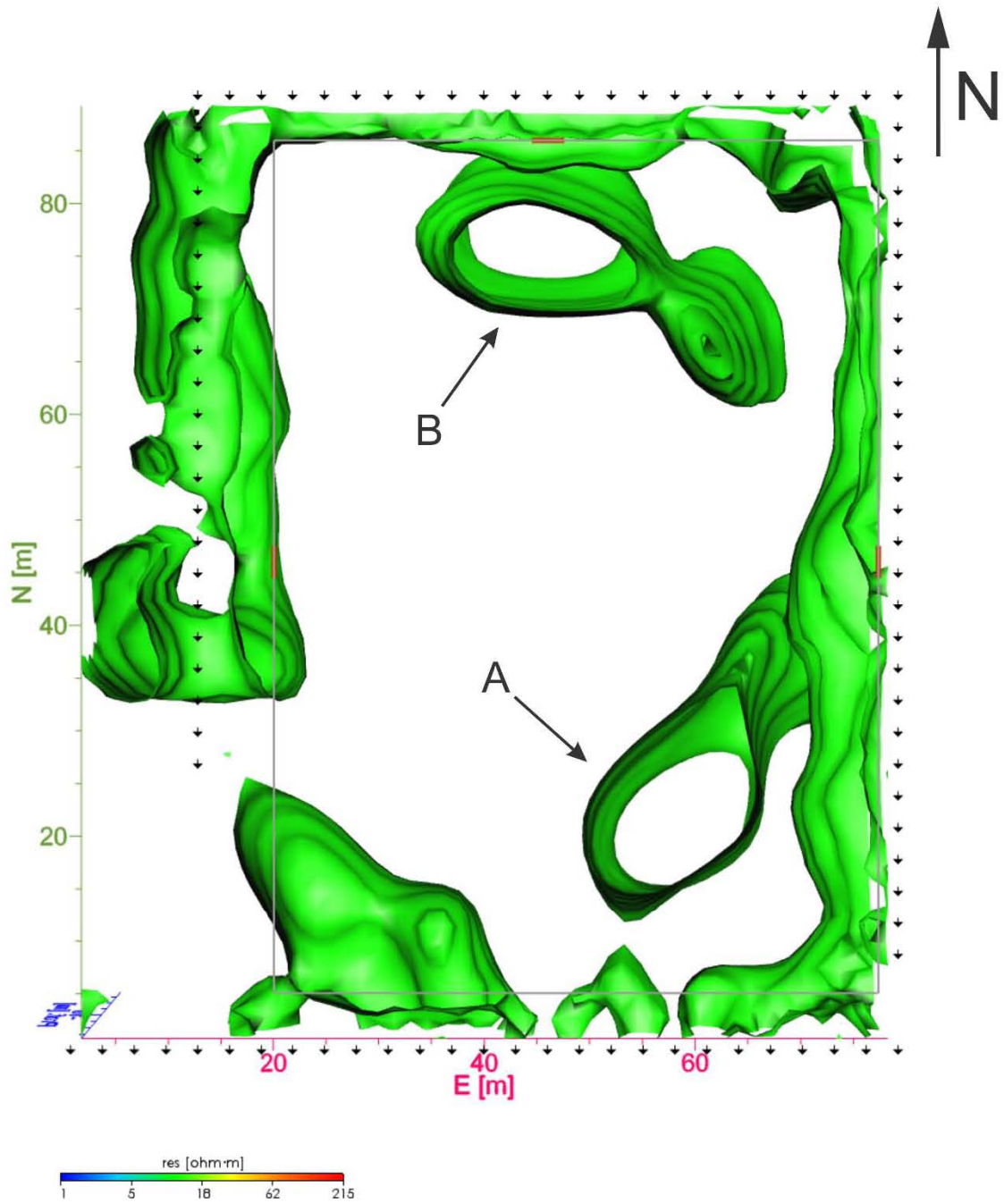


Figura 4.1 Vista en planta del modelo de los datos de 2009. Se señala contorno de catedral (línea gris) y puertas principales (líneas rojas) como referencia de posición. Se muestran isosuperficies de resistividad con un valor  $\rho = 12 \Omega\text{m}$ .



### Estructura A.

Ubicada en la porción Sur, a 60 metros al este y 20 al Norte del origen establecido para esta prospección la estructura puede poseer una profundidad de hasta 20 metros aproximadamente y sugiere conectividad con el flanco este del edificio (Figura 4.2).

La estructura A presenta una forma regular de posible origen antrópico; Chávez, Tejero-Andrade, Cifuentes y Hernández (2010) indican que muy posiblemente la estructura A sea la firma de la actual cripta de los obispos, lugar donde yacen los restos de los clérigos de importancia de este templo ceremonial.

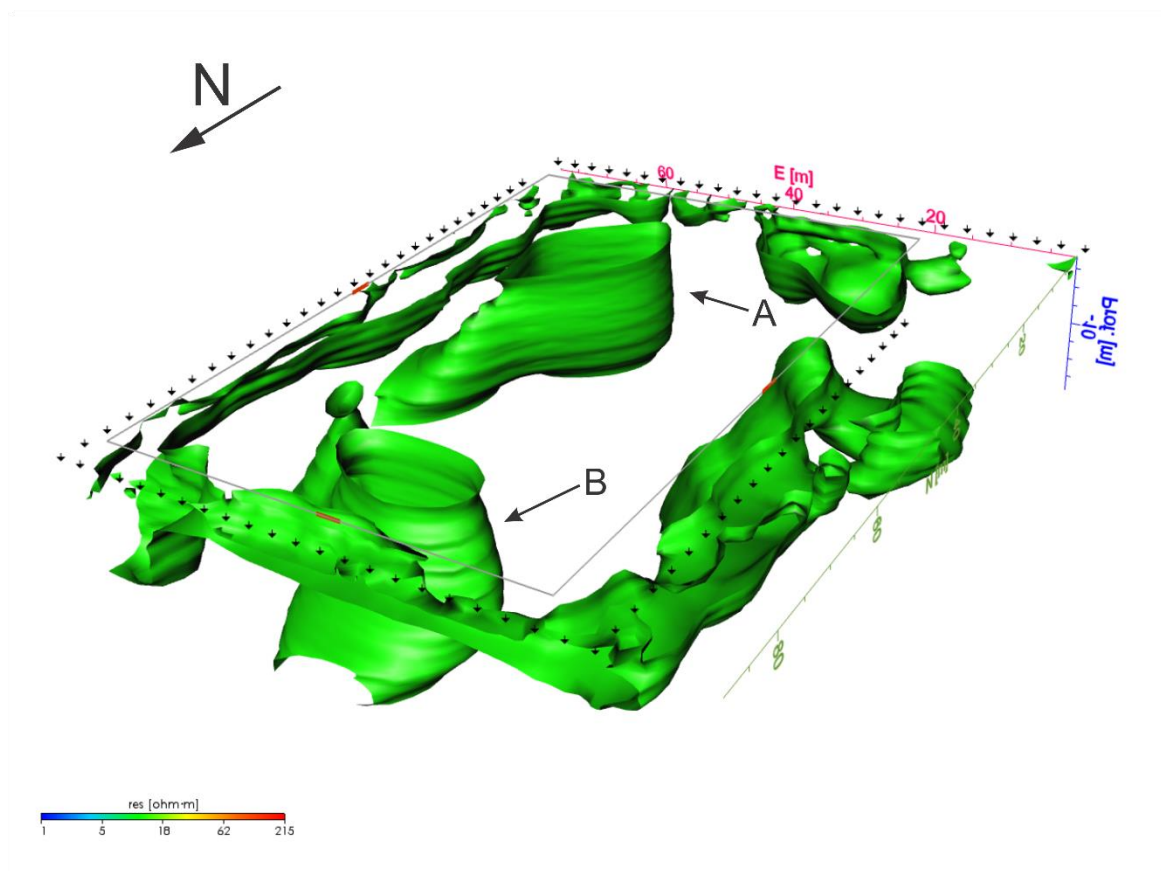


Figura 4.2 Vista del flanco Norte del modelo para los datos de 2009. Se señala contorno de catedral (línea gris) y puertas principales (líneas rojas) como referencia de posición. Se muestran isosuperficies de resistividad con un valor  $\rho = 12 \Omega\text{m}$ .

### Estructura B.

Estructura irregular alargada presente en la parte Norte del edificio, a 80 metros al Norte y 50 al este del origen utilizado para estos datos, dicha estructura sugiere tener conectividad con el flanco Norte del edificio (Figura 4.2).

Basándonos en recursos históricos la estructura B podría coincidir con la zona donde estaba designada, en un principio, la sepultura de restos humanos de pobladores no pertenecientes al clero, información que no ha sido comprobada hasta el momento.

2014.

La prospección de este año cubre un área menor a los resultados anteriormente presentados. El modelo presentado se obtuvo a partir de los 1087 datos independientes recabados en la prospección y que presenta un error RMS entre datos medidos y predichos del 15.54 % y un valor  $L^2$  de 5.9.

En este caso se puede visualizar la existencia de dos estructuras que por su morfología y profundidad podrían ser estructuras de interés para este trabajo (Figura 4.3).



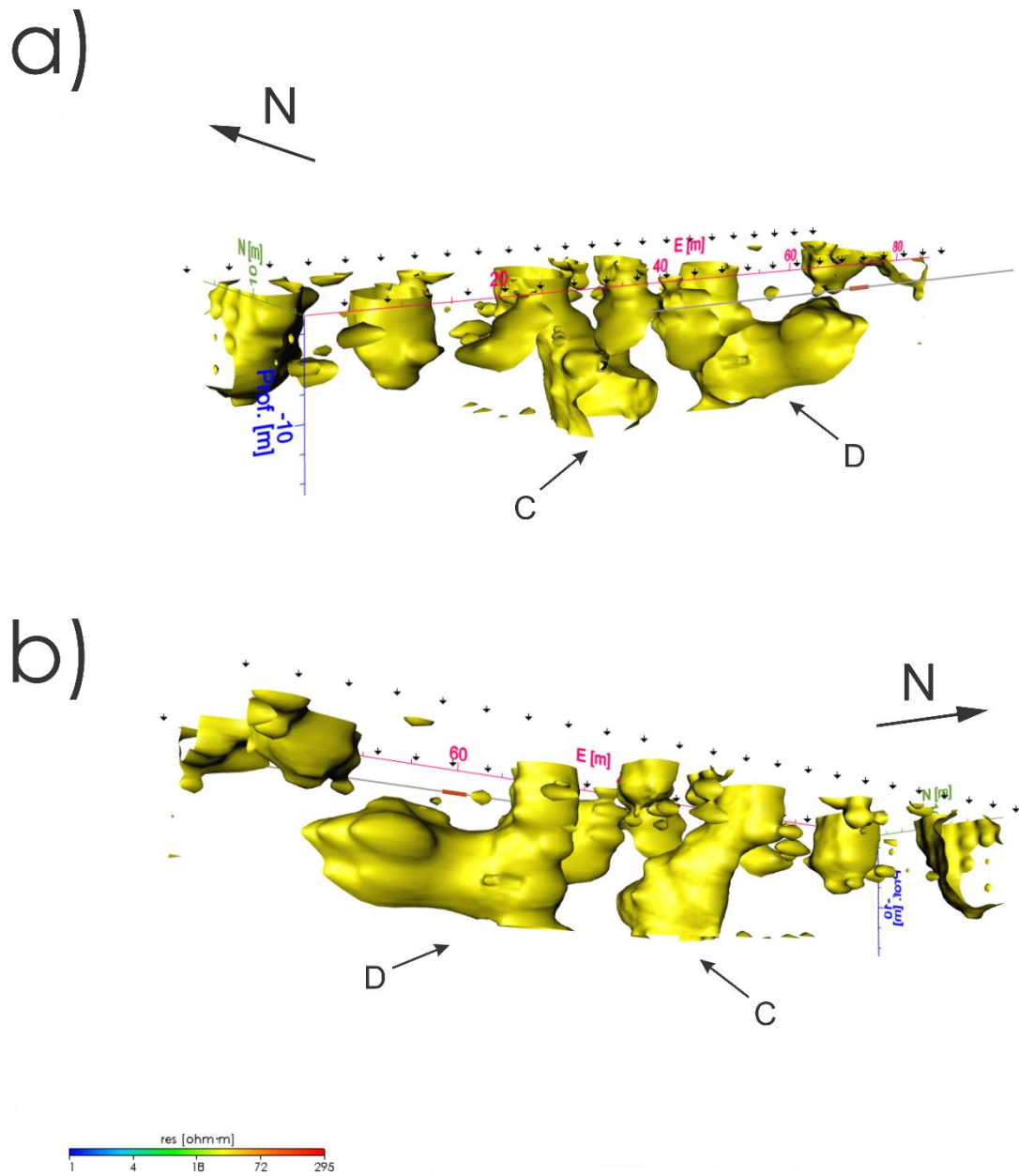


Figura 4.3 a) Vista del flanco Sur del modelo para la prospección de 2014 y b) Vista desde el flanco Norte. Se señala fachada de catedral (línea gris) y puerta principal (línea roja) como referencia de posición. Se muestran isosuperficies de resistividad con un valor  $\rho = 33 \Omega\text{m}$ .

### Estructura C.

Presente en la parte central del modelo, a 10 metros al Norte y 40 al este del origen para esta secuencia de datos; su firma alcanza una profundidad de 20 metros (Figura 4.3).

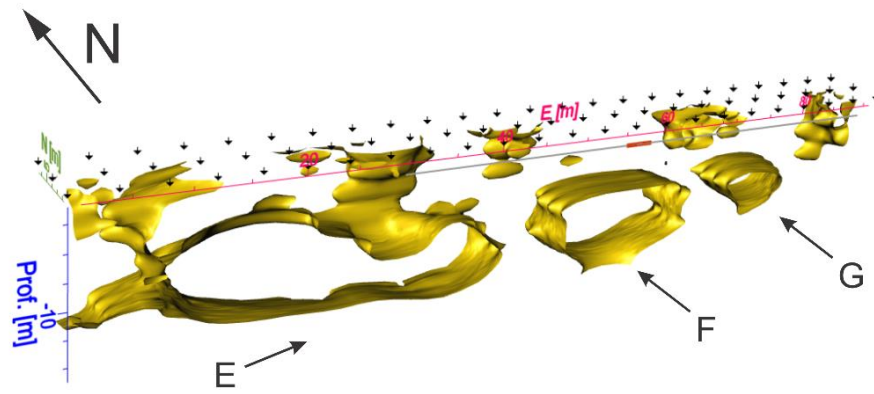
### Estructura D.

A un costado de la estructura C, a 60 metros al este y 10 metros al Norte del origen para esta secuencia de datos se encuentra esta estructura irregular alongada que parece tener continuidad a la zona donde se ha hecho la prospección en el año 2016. Su firma llega al límite de la profundidad de la adquisición de datos, cerca de los 20 metros (Figura 4.3).

2016.

Este modelo obtenido a partir de los 484 datos recabados en la prospección del año 2016 con un error comparativo RMS de 9.81 % y norma  $L^2$  con valor de 3.84 posee tres posibles estructuras de interés. Debido a que este arreglo poseía poca longitud en la dirección Norte las estructuras cubren toda la longitud del modelo (Figura 4.4).

a)



b)

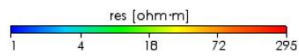
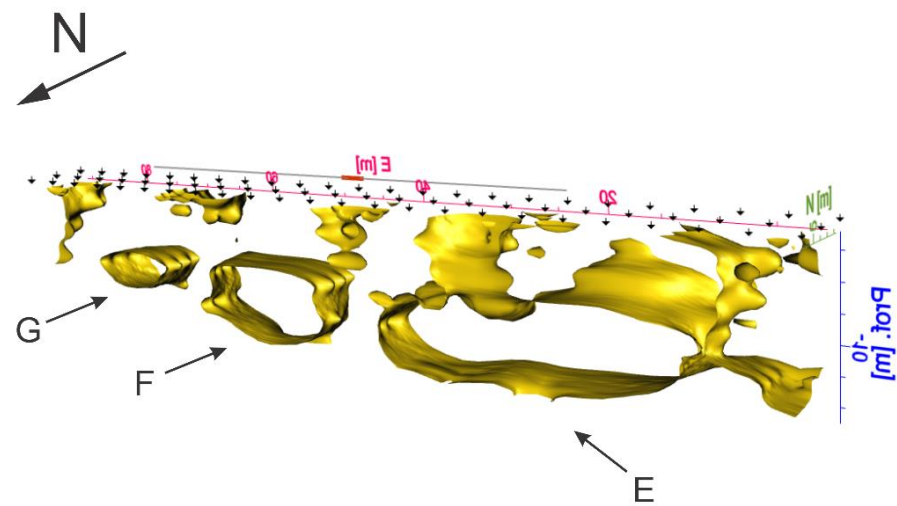


Figura 4.4 a) Vista del flanco Sur del modelo para la prospección de 2016 y b) Vista desde el flanco Norte. Se señala fachada de catedral (línea gris) y puerta principal (línea roja) como referencia de posición. Se muestran isosuperficies de resistividad con un valor  $\rho = 41 \Omega\text{m}$ .

#### Estructura E.

Estructura que presenta una elongación de al menos 10 metros cercana al origen de esta secuencia de datos y profundidad aproximada de 15 metros (Figura 4.4).

#### Estructura F.

Presente en la parte media del modelo, esta es una estructura más estrecha a la antes descrita. Se encuentra a 50 metros en dirección Este del origen para esta secuencia de datos y posee una profundidad aproximada de 15 metros (Figura 4.4).

Esta estructura se encuentra en la posición de la entrada principal del edificio, concordante con lo establecido por Chávez et al (2010) siendo este un indicio de un túnel con dirección Norte.

#### Estructura G.

De muy poca elongación y presente en el extremo Este de la inversión, esta estructura se encuentra de igual forma a una profundidad aproximada de 15 metros. Por su naturaleza es posible que sea una continuación de la estructura central que no se ha podido definir con claridad (Figura 4.4).

#### 2014 y 2016.

Como se mencionó anteriormente, debido a la poca extensión en dirección Norte del arreglo de 2016 todas las estructuras presentan conectividad hacia los flancos Norte y Sur. Este hecho sugiere la posibilidad de que exista conectividad entre las estructuras encontradas en las prospecciones de los años 2014 y 2016 por lo cual se procedió a realizar un modelado conjunto de datos (Figura 4.5).

Este modelo se formuló a partir de la conjunción de los 1571 datos de ambas prospecciones; dando un error comparativo RMS de 17.99 % y norma  $L^2$  de 5.79.

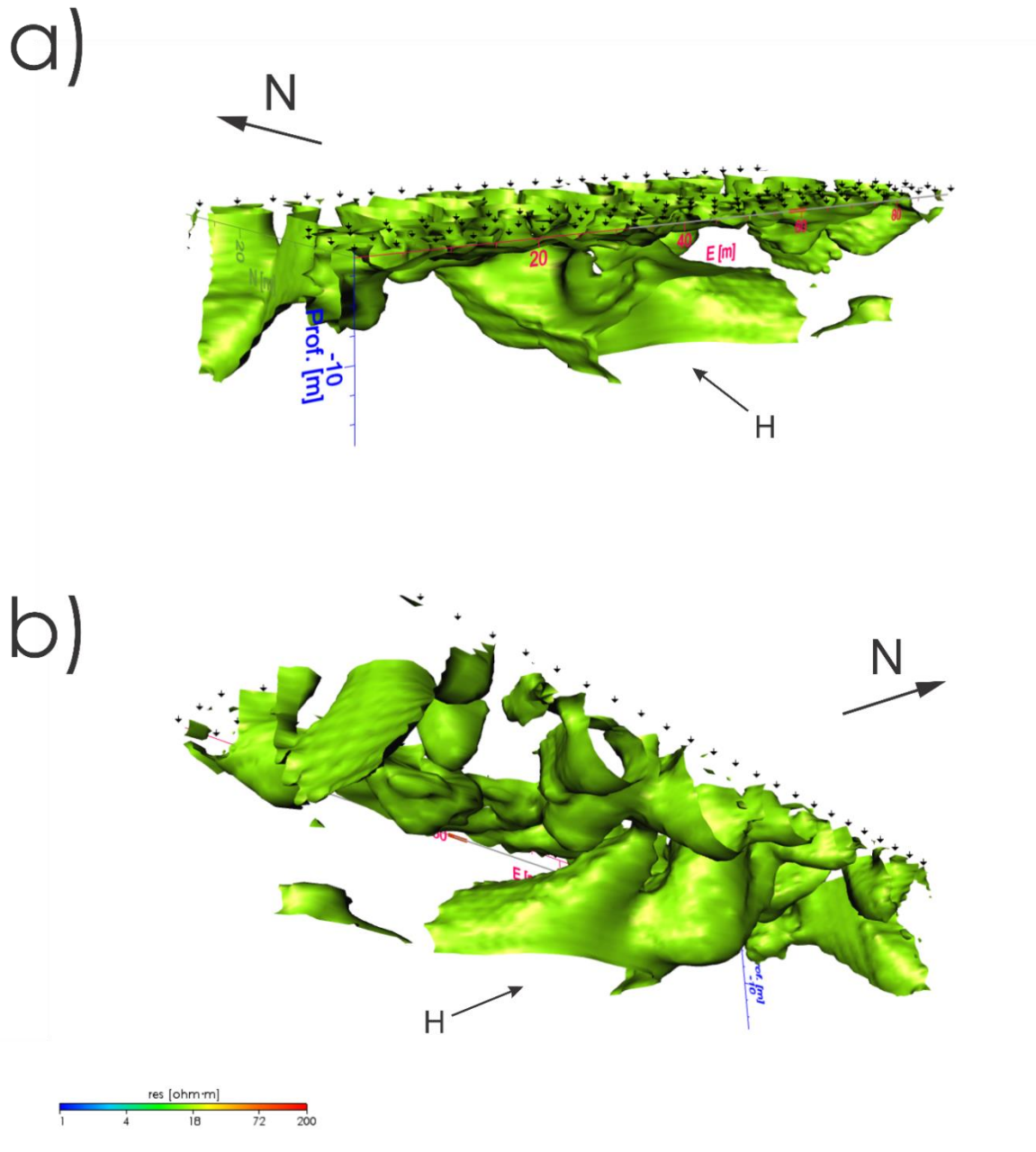


Figura 4.5 a) Vista del flanco Sur del modelo conjunto de las prospecciones de 2014 y 2016 y b) Vista desde el flanco Norte. Se señala fachada de catedral (línea gris) y puerta principal (línea roja) como referencia de posición. Se muestran isosuperficies de resistividad con un valor  $\rho = 15 \Omega\text{m}$ .

### Estructura H.

Alcanzando profundidades mayores a 20 metros se encuentra 40 metros al Este del origen utilizado para esta secuencia de datos.

Producto de la inversión conjunta de datos de 2014 y 2016 la estructura está presente en ambas áreas de prospección (Figura 4.5) coincidiendo espacialmente con una de las estructuras descritas por Chávez et al. (2010) como un posible túnel por debajo de la puerta principal de catedral con dirección Norte.

2017.

Por la gran cantidad de datos y la diversidad de secuencias utilizadas en la prospección de este año se decidió realizar inversiones independientes para algunas de las secuencias aunadas a la inversión conjunta con todos los datos; esto con el fin de poder definir estructuras en el subsuelo cuya definición pueda ser afectada por los datos que posee alrededor pertenecientes a otras secuencias.

### Centroide.

Por su mayor densidad de puntos de atribución ubicados en la parte central del área de prospección y por la profundidad de investigación alcanzada se realizó un modelo independiente para esta secuencia de datos.

Esta inversión podrá definir con mayor claridad estructuras presentes en el subsuelo de la parte central de la edificación (Figuras 4.6 y 4.7).

A partir de los 1869 datos medidos para esta secuencia se formuló el modelo de isosuperficies de resistividad mostrado a continuación con un error RMS de 5.85 % y valor de  $L^2$  igual a 1.07.

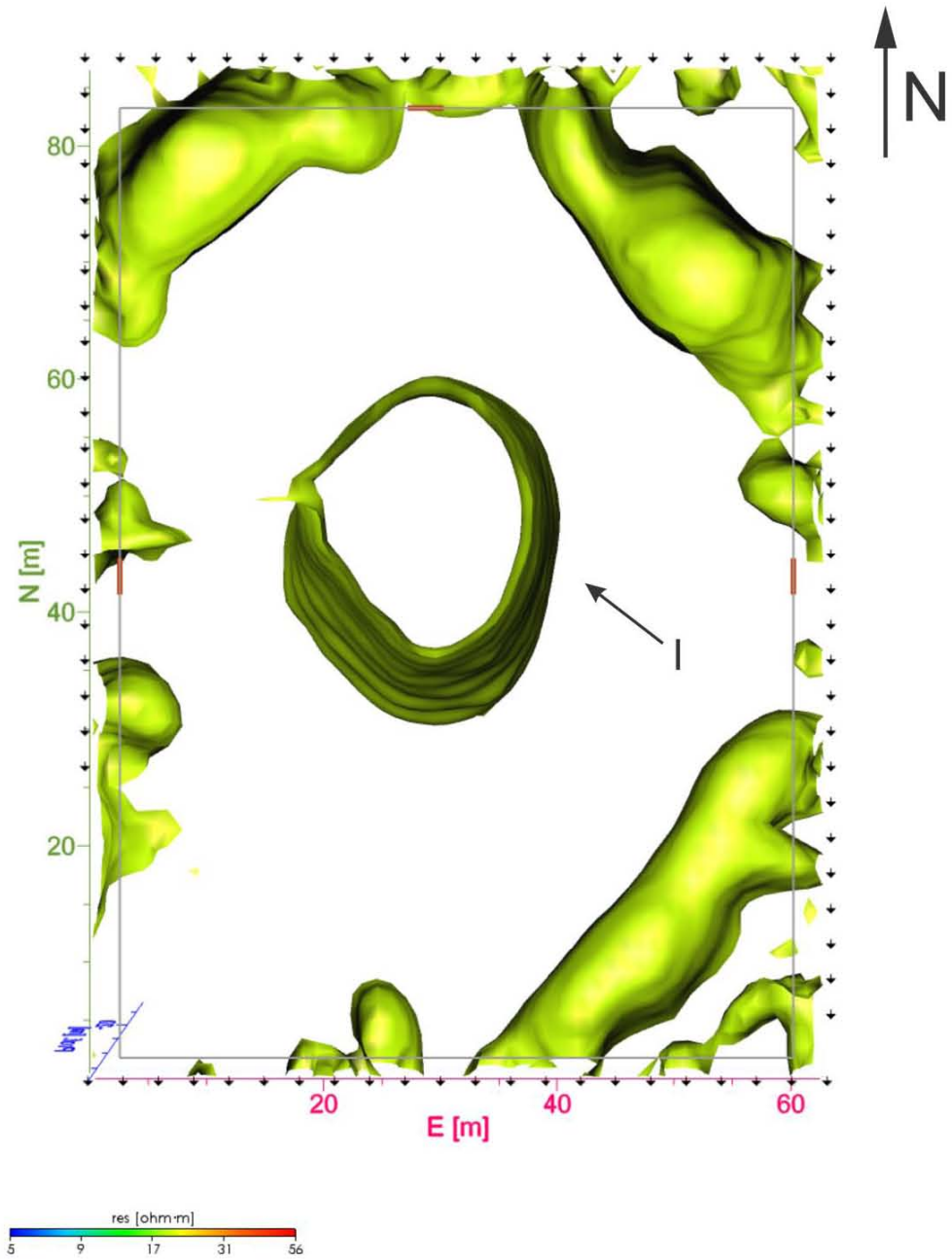


Figura 4.6 Vista en planta del modelo para la prospección de 2017. Se señala contorno de catedral (línea gris) y puertas principales (líneas rojas) como referencia de posición. Se muestran isosuperficies de resistividad con un valor  $\rho = 19 \Omega\text{m}$ .

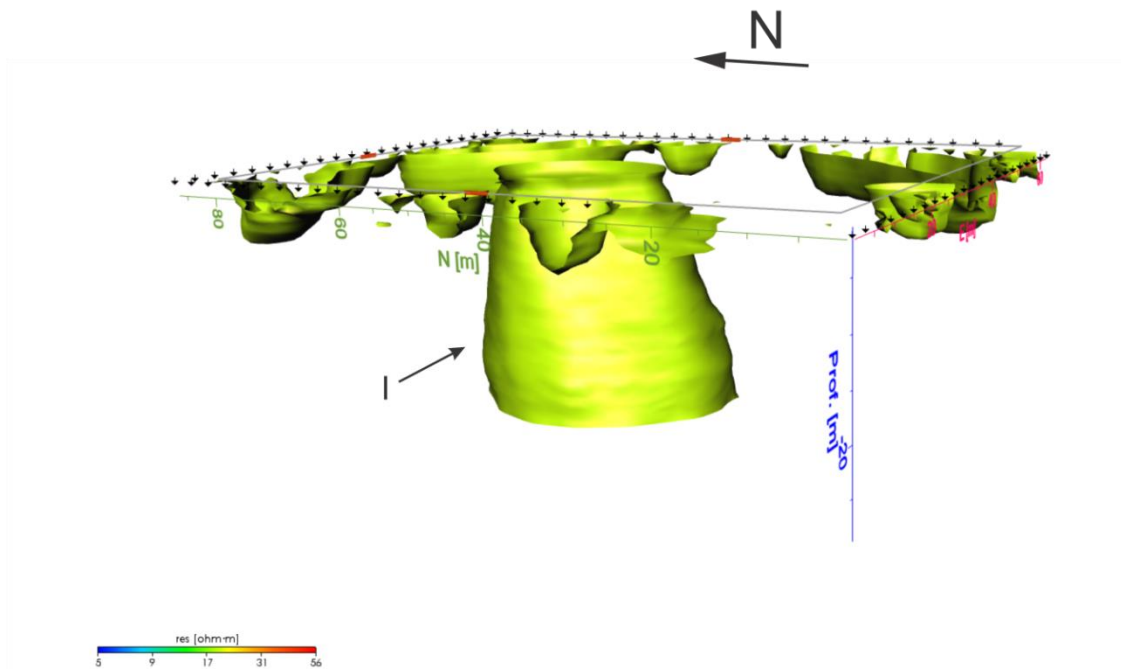


Figura 4.7 Vista del flanco Oeste del modelo para la prospección de 2017. Se señala contorno de catedral (línea gris) y puertas principales (líneas rojas) como referencia de posición. Se muestran isosuperficies de resistividad con un valor  $\rho = 19 \Omega\text{m}$ .

#### Estructura I.

Con una firma que supera profundidades de 20 metros esta estructura está localizada a 50 metros al Norte y 30 metros al Este del origen utilizado para esta secuencia de datos (Figura 4.7). Esta estructura estaría presente debajo del edificio de catedral cercana a la zona donde solía residir el altar antes de la remodelación a la que fue sometida tras los saqueos del siglo XIX.

#### Wenner-Schlumberger.

Por las características propias de esta secuencia el modelado independiente de los 2112 datos nos dará la capacidad de definir estructuras presentes en los márgenes del estudio (Figura 4.8). Así mismo esta secuencia cuenta con puntos de atribución cercanos a la parte central por lo cual puede ayudar a la confirmación de las estructuras encontradas con la secuencia Centroide. Se obtuvo un modelo con un error RMS de 1.81 % y  $L^2$  de 1.3.



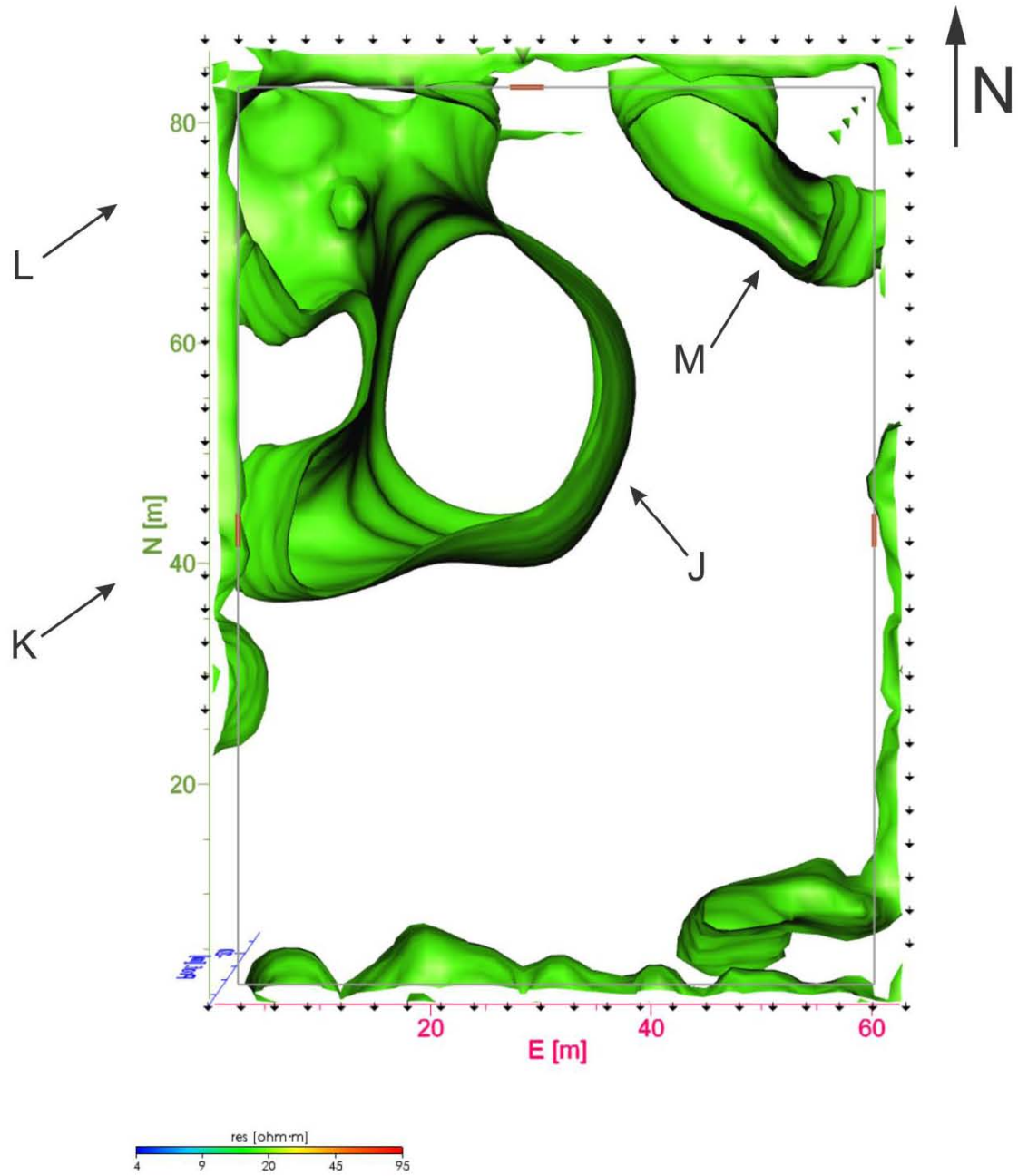


Figura 4.8 Vista en planta del modelo para la prospección de 2017. Se señala contorno de catedral (línea gris) y puertas principales (líneas rojas) como referencia de posición. Se muestran isosuperficies de resistividad con un valor  $\rho = 17 \Omega\text{m}$ .

### Estructura J.

Presente en la parte central y concordante con la Estructura I (Centroide) se encuentra a los 50 metros en dirección Norte y 30 en dirección Este conforme al origen de establecido en esta prospección. Como se mencionaba anteriormente esta estructura coincide con la zona donde se presentaba el altar antes de las remodelaciones hechas en catedral (Figura 4.9).

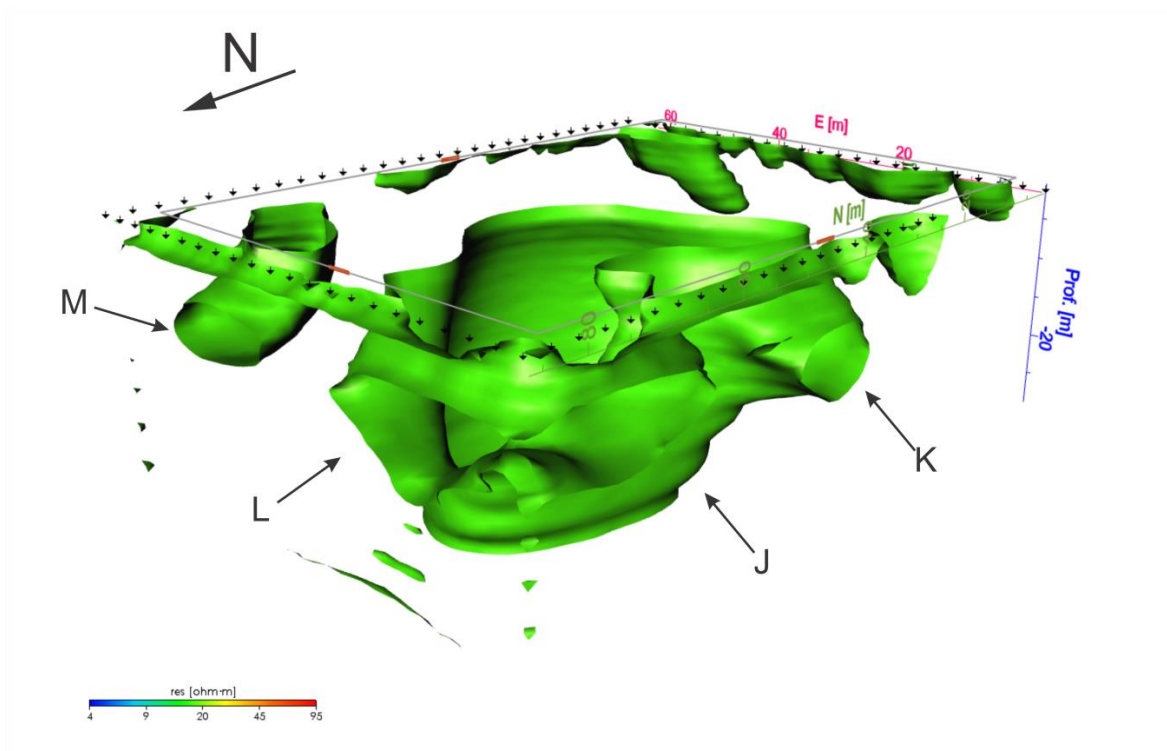


Figura 4.9 Vista del flanco Norte-Oeste del modelo para la prospección de 2017. Se señala contorno de catedral (línea gris) y puertas principales (líneas rojas) como referencia de posición. Se muestran isosuperficies de resistividad con un valor  $\rho = 17 \Omega\text{m}$ .

#### Estructura K.

Presente en el flanco Oeste del subsuelo de la edificación, debajo de su acceso Oeste, a 50 metros en dirección Norte y con profundidad aproximada de 10 metros esta estructura presenta conexión con la parte central (Estructura J). Sugiere continuidad más allá de los márgenes del trabajo de prospección (Figura 4.9).

#### Estructura L.

Aparente estructura con conectividad a la parte central (Estructura J) y con profundidad aproximada de 10 metros, se encuentra al borde Noroeste presenta fin en los flancos Oeste y Norte sugiriendo continuidad más allá de los márgenes de la exploración (Figura 4.9). Mencionada por Chávez et al. (2010) como posible zona de acceso a túneles o cimentación profunda de la torre Oeste.

#### Estructura M.

Estructura independiente en la parte Norte de la edificación, a 50 metros al Este y 80 metros al Norte presenta una posible conexión entre flanco Norte y flanco Este. Sugiere continuidad más allá de los márgenes de la prospección en las direcciones antes descritas (Figura 4.9). Concordante con una estructura mencionada por Chávez et al. (2010)

#### Datos conjuntos.

Se presentan dos grupos de isosuperficies de resistividad, cada grupo posee un valor resistivo distinto, en los cuales se pueden encontrar diferentes estructuras de interés.

El primer valor utilizado fue de 17 ohms por metro, donde pueden reconocerse al menos 4 estructuras (Figura 4.10). Ambos modelos fueron realizados con la totalidad de los datos de la prospección del año 2017 (5082 mediciones independientes) y poseen un error comparativo entre datos medidos y predichos RMS de 5.83 % y un valor para  $L^2$  igual a 9.68.

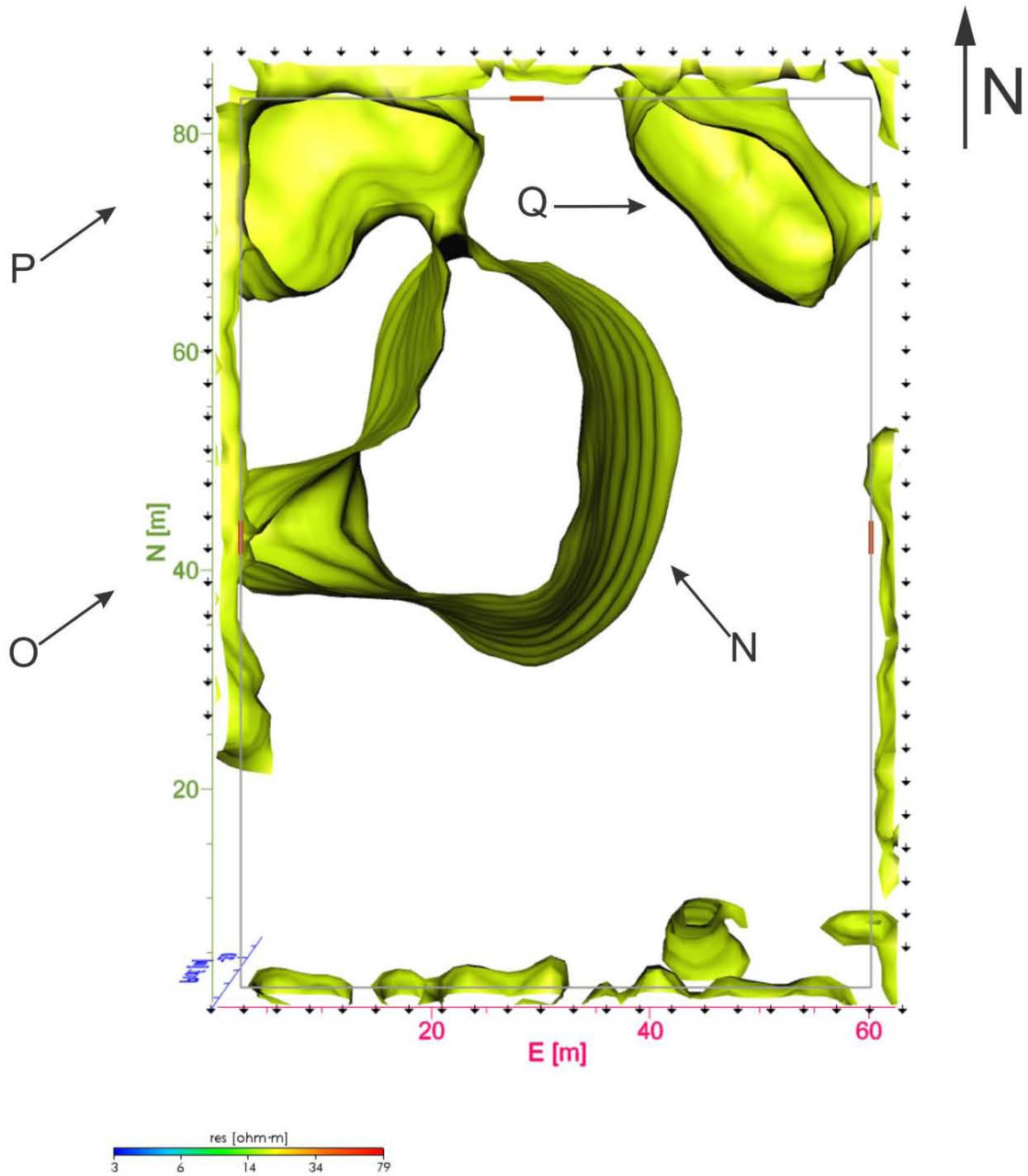


Figura 4.10 Vista en planta del modelo para la prospección de 2017. Se señala contorno de catedral (línea gris) y puertas principales (líneas rojas) como referencia de posición. Se muestran isosuperficies de resistividad con un valor  $\rho = 17 \Omega\text{m}$ .

### Estructura N.

Concordante con las estructuras I y J esta anomalía está presente en todas las inversiones. A 30 metros en dirección Este y 40 metros en dirección Norte presenta conexión con el flanco Este y profundidad de al menos 30 metros (Figura 4.11).

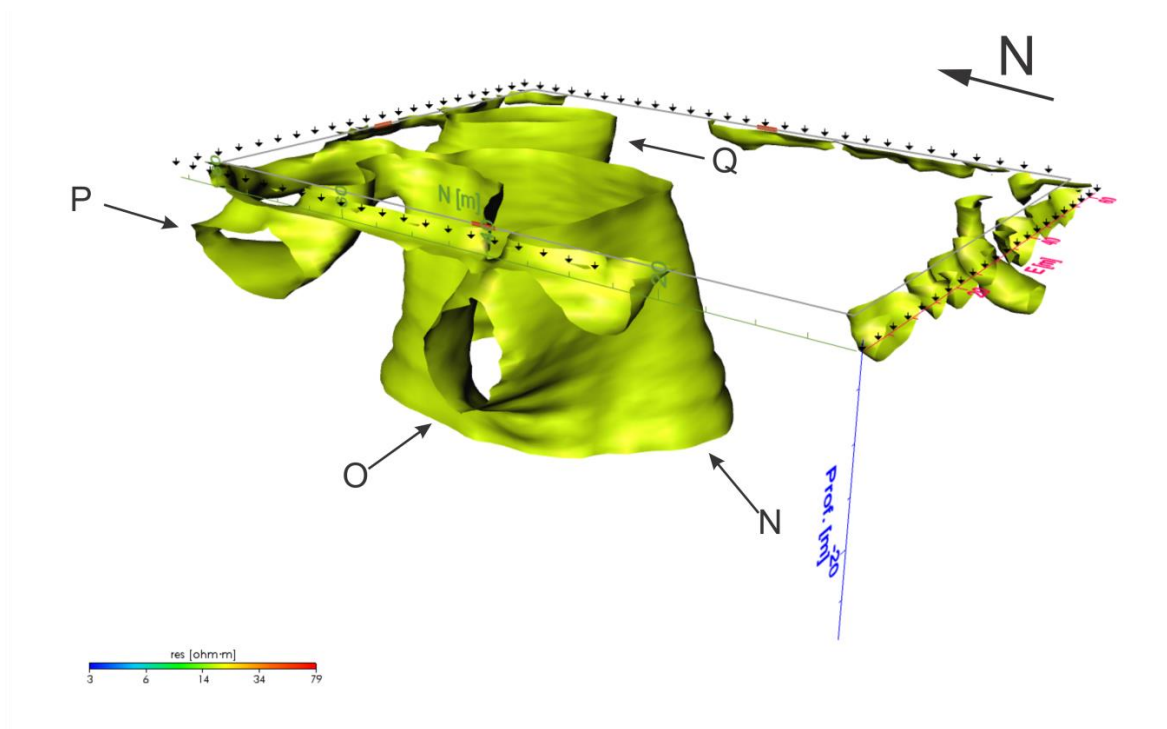


Figura 4.11 Vista del flanco Oeste del modelo para la prospección de 2017. Se señala contorno de catedral (línea gris) y puertas principales (líneas rojas) como referencia de posición. Se muestran isosuperficies de resistividad con un valor  $\rho = 17 \Omega\text{m}$ .

### Estructura O.

Esta estructura, que concuerda con la Estructura K antes descrita es la anomalía presente en el flanco Oeste de la inversión. Se encuentra a los 40 metros en dirección norte con profundidad de al menos 10 metros (Figura 4.11).

### Estructura P.

Estructura aparente con conexión con los flancos Oeste y Norte de la inversión y concordante con Estructura L de la inversión Wenner-Schlumberger. Presente en el límite Norte las estructuras poseen una profundidad de al menos 10 metros (Figura 4.12).

### Estructura Q.

Estructura presente desde la inversión Wenner-Schlumberger, concordante con M, se encuentra en el límite Noreste con conexiones a los flancos Norte y Este. Localizada a 80 metros Norte y 60 metros al Este con profundidad de al menos 10 metros (Figura 4.12).

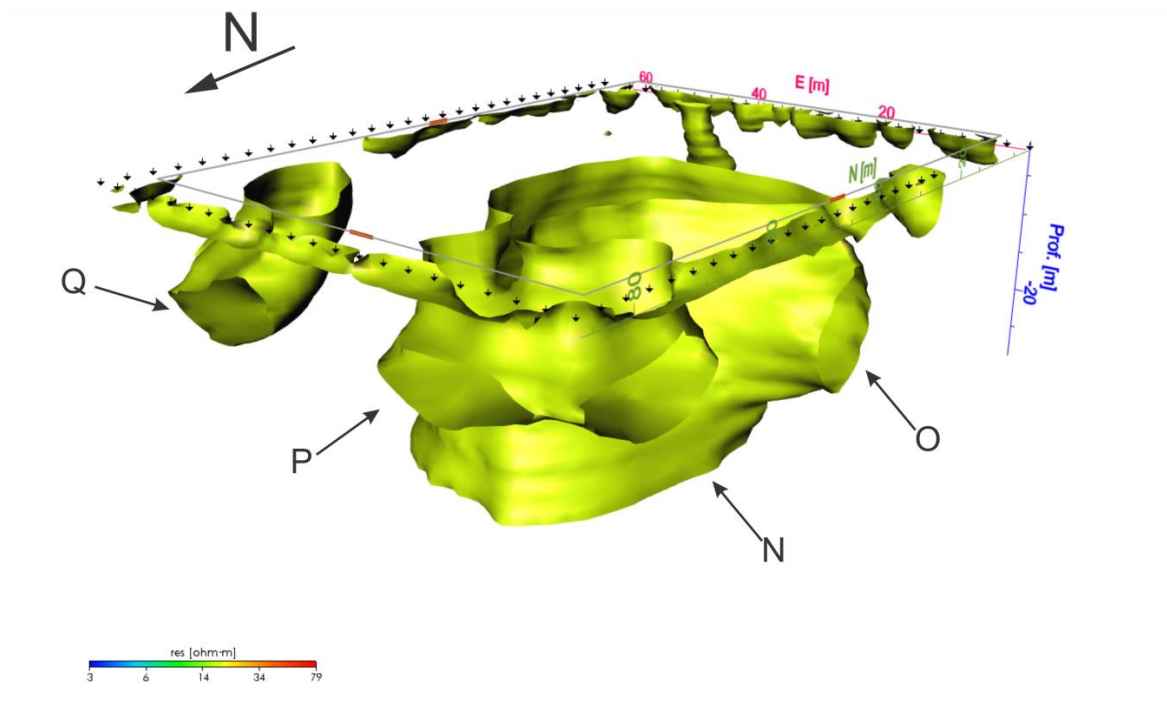


Figura 4.12 Vista del flanco Norte-Oeste del modelo para la prospección de 2017. Se señala contorno de catedral (línea gris) y puertas principales (líneas rojas) como referencia de posición. Se muestran isosuperficies de resistividad con un valor  $\rho = 17 \Omega\text{m}$ .

El otro valor de isosuperficies elegido fue de 15 ohm metro puesto que se pueden observar estructuras cuya morfología podría representar cavidades (Figura 4.13).

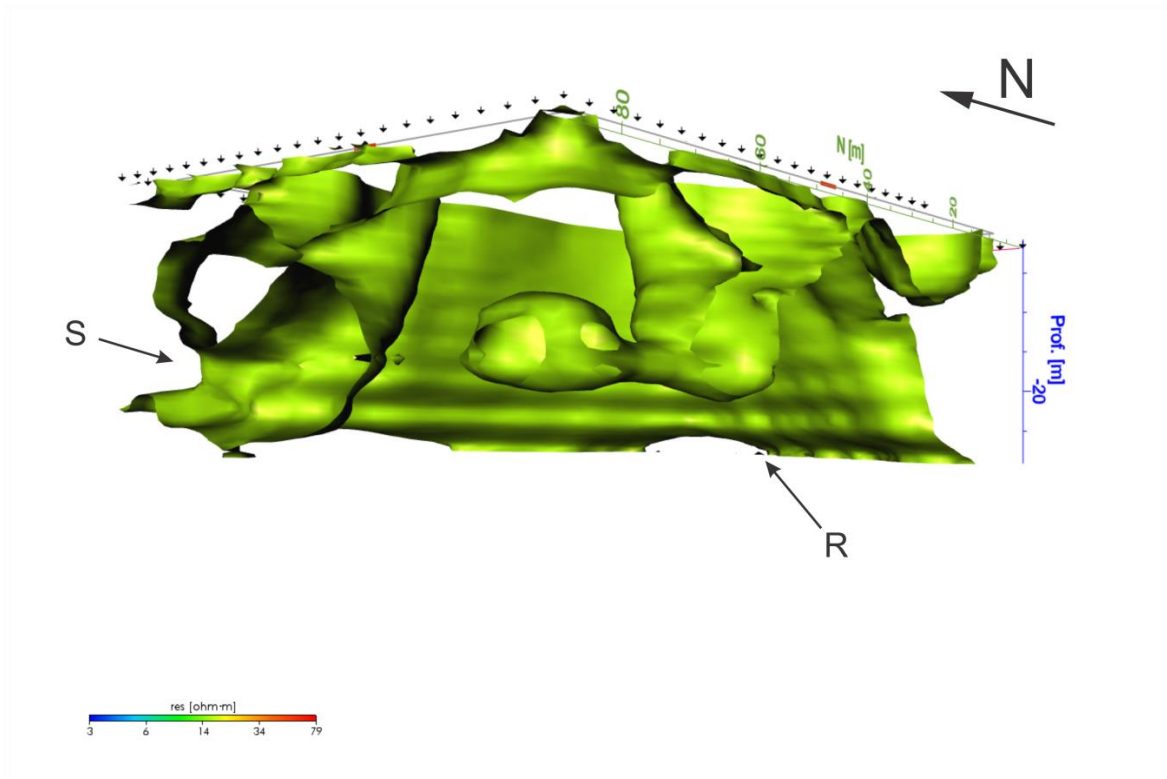


Figura 4.13 Vista del flanco Norte-Oeste del modelo para la prospección de 2017. Se señala contorno de catedral (línea gris) y puertas principales (líneas rojas) como referencia de posición. Se muestran isosuperficies de resistividad con un valor  $\rho = 15 \Omega\text{m}$ .

#### Estructura R.

Presente en el flanco Oeste de la inversión se nota una anomalía con posible conexión a superficie; se encuentra cerca de los 60 metros al Norte y cuenta con al menos 25 metros de profundidad (Figura 4.13).

### Estructura S.

Estructura con conexión al flanco Norte presente en el extremo Noreste de la inversión. Con profundidad cercana a los 30 metros sugiere conectividad con la superficie (Figura 4.13). Posible concordancia por la estructura norte descrita por Chávez et al. (2010).

Observando desde el flanco Sureste podemos observar otro par de posibles estructuras de interés (Figura 4.14).

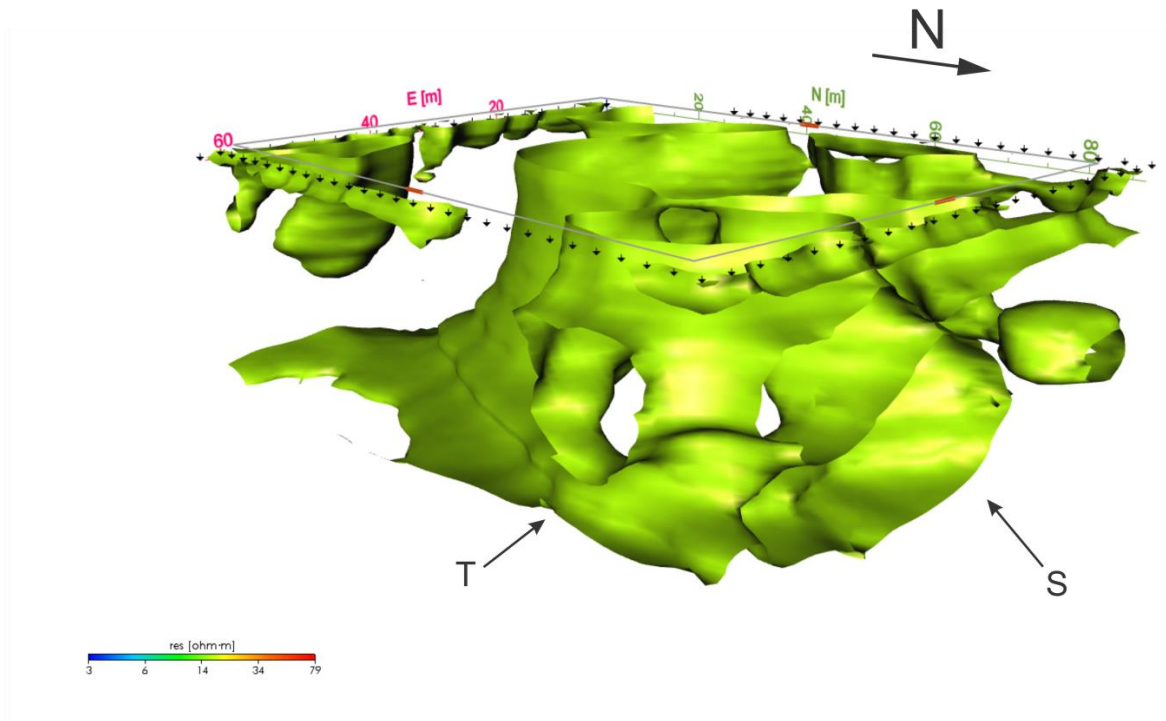


Figura 4.14 Vista del flanco Norte-Este del modelo para la prospección de 2017. Se señala contorno de catedral (línea gris) y puertas principales (líneas rojas) como referencia de posición. Se muestran isosuperficies de resistividad con un valor  $\rho = 15 \Omega\text{m}$ .



### Estructura T.

Presente en el extremo Noreste de la inversión y con una profundidad de al menos 15 metros presenta conectividad con el flanco Este. Posible continuación de la estructura S; se encuentra a 80 metros al Norte y 60 metros al Este (Figura 4.14).

### Estructura U.

Con una profundidad aproximada de 20 metros y con posible conectividad a superficie esta estructura sugiere conectividad al flanco Sur. Se encuentra 50 metros al este del origen elegido para esta serie de datos (Figura 4.15). Con posible concordancia a estructuras descritas por Chávez et al. (2010).

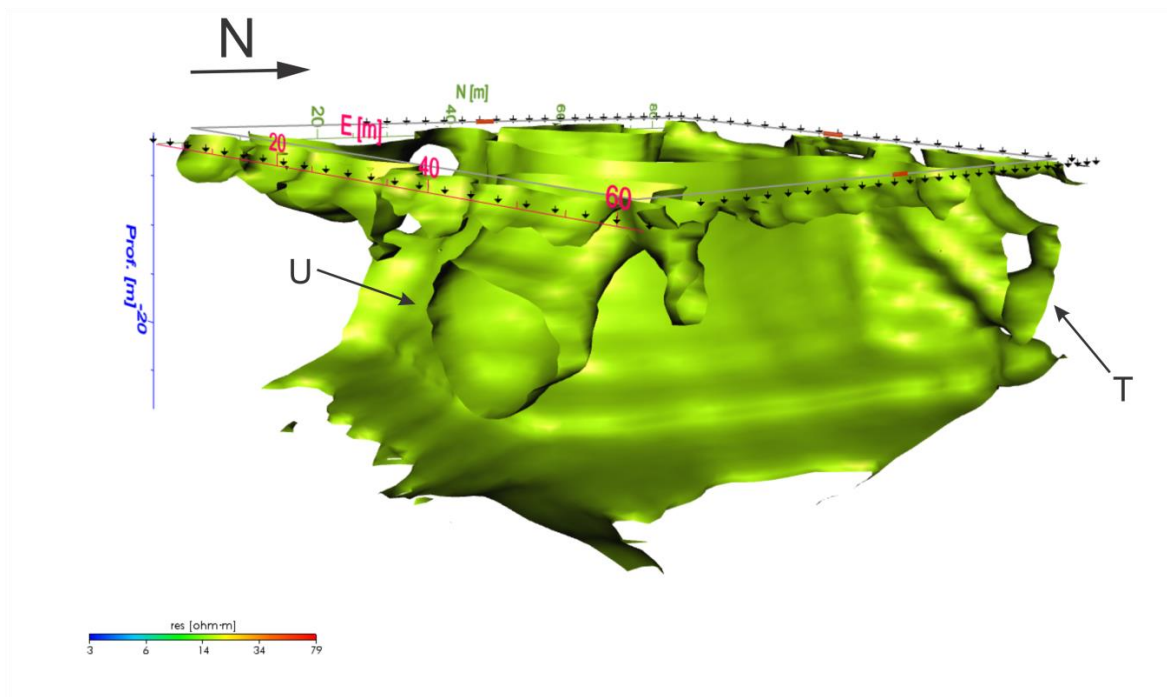


Figura 4.15 Vista del flanco Sur-Este del modelo para la prospección de 2017. Se señala contorno de catedral (línea gris) y puertas principales (líneas rojas) como referencia de posición. Se muestran isosuperficies de resistividad con un valor  $\rho = 15 \Omega\text{m}$ .

## 5. Conclusiones

La utilización de técnicas geofísicas, como la tomografía de resistividad eléctrica, en zonas de interés arqueológico es una forma segura de localizar estructuras u objetos de interés bajo la superficie. Debido a que son técnicas no invasivas poseen una ventaja sobre las perforaciones o excavaciones y pueden servir de preámbulo antes de realizar alguna de estas acciones.

Así mismo reforzar datos obtenidos de algún tipo de técnica geofísica con otros métodos de prospección es altamente recomendable para reducir posibles errores en las interpretaciones y evitar fallas si se decide excavar o perforar.

Dado que el objetivo se encuentra en una zona urbana y está catalogado como patrimonio cultural de la humanidad el nivel de complejidad de la campaña de exploración aumenta puesto que existen normatividades a tomar en cuenta, así como otro tipo de precauciones.

Los resultados obtenidos a partir de los datos recabados en las campañas de exploración muestran la presencia de más de una estructura que asemeja cavidades, algunas con conectividad a diversos puntos por debajo de la edificación. Como se había mencionado anteriormente el respaldo con otras metodologías e incluso la perforación de un pozo son necesarios para poder determinar con total seguridad la presencia de túneles o cavidades debajo de catedral.

Aunque algunas de las anomalías mostradas aparenten extenderse hasta la superficie este efecto surge de la modelación matemática utilizada para presentar los resultados, lo que se aprecia no es la morfología exacta del objeto que causa la anomalía si no es la continuación del efecto resistivo de un cuerpo a profundidad.

Las isosuperficies de resistividad mostradas no delimitan de manera exacta la morfología del objeto que causa la anomalía por lo cual en algunos casos determinar la profundidad del objeto puede ser complejo y se prefiere solo dar información de su localización en el

plano XY. Este problema puede ser erradicado al tomar perfiles justo por encima de la anomalía, pero siendo el caso de la catedral esto no es posible.

Por su repetida aparición en diferentes modelos, morfología y localización se recomienda seguir con los trabajos de exploración e identificación de las estructuras H, N, O, P, Q, S, T y U.

El estado de las estructuras encontradas es incierto, si bien podrían ser túneles o cavidades vacías, bien podrían encontrarse inundadas, azolvadas e incluso derrumbadas.

## 6. Referencias

### Artículos.

Azeiboikhai, A., 2010, 2D and 3D geoelectrical resistivity imaging: Theory and field design: *Scientific Research and Essays*, 5(23), 3592-3605.

Chávez, R., Tejero-Andrade, A., Cifuentes, G., Hernández, E., 2010, Informa Final: Localización de túneles en los alrededores de la catedral de Morelia mediante el método de tomografía eléctrica: Inédito.

Dey, A., Morrison, H., 1979, Resistivity Modeling for Arbitrarily Shaped Three-Dimensional Structures: *Geophysics*, 44(4), 753-780.

Garduño-Monroy, V., Giordano, N., Ávila-Olivera, J., Hernández-Madrigal, V., Sámano-Nateras, A., Díaz-Salmerón, J., 2014, Estudio hidrogeológico del sistema acuífero de Morelia, Michoacán, para una correcta planificación del territorio. *En Urbanización, sociedad y ambiente. Experiencias en ciudades medias: México*, Universidad Nacional Autónoma de México, 197-222.

Gómez-Vasconcelos, M., Garduño-Monroy, V., Macías, J., Layer, P., Benowitz, J., 2015, The Sierra de Mil Cumbres, Michoacán, México: Transitional volcanism between the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 301, 128-147.

Herman, R., 2001, An introduction to electrical resistivity in geophysics: *American Journal of Physics*, 69(9), 943-952.

Tejero-Andrade, A., Cifuentes, G., Chávez, R., López-González, A., Delgado-Solórzano, C., 2015, L- and CORNER-arrays for 3D electric resistivity tomography: an alternative for geophysical surveys in urban zones: *Near Surface Geophysics*, 13 (4), 355-367.

## Libros.

Butler, D., 2005, Near-Surface Geophysics: Estados Unidos, Society of Exploration Geophysicists.

Herz, N., Garrison, E., 1998, Geological Methods for Archaeology: Inglaterra, Oxford University Press.

Iskander, M., 1992, Electromagnetic Fields and Waves: Estados Unidos, Waveland Press.

Israde-Alcántara, I., Garduño-Monroy, V., 2004, La geología de la región de Morelia en Contribuciones a la geología e impacto ambiental de la región de Morelia: México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 1-13.

Kearey, P., Brooks, M., Hill, I., 2002, An Introduction to Geophysical Exploration: Inglaterra, Blackwell Science.

Loke, M., 2010, Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys.

Lowrie, W., 2007, Fundamentals of Geophysics: Inglaterra, Cambridge University Press.

Mazín, O., 1991, La Catedral de Morelia: México, El Colegio de Michoacán.

Oldenburg, D., Li, Y., 2005, Inversion for Applied Geophysics: A tutorial. En D. Butler, Near-Surface Geophysics: Canada, Society of Exploration Geophysicists, 89-150.

Ramírez, E., 1995, Morelia Patrimonio Cultural de la Humanidad: México, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo.

Ramírez, E., 1994, Arquitectura Religiosa de Morelia: Méxco, Instituto Michoacano de Cultura.

Silva, G. 1984, La Catedral de Morelia: arte y sociedad en la Nueva España: México, Comité Editorial del Estado de Michoacán.

Telford, W. G., 1990, Applied Geophysics: Australia, Cambridge University Press.