

Caracterización del Subsuelo Mediante Prospección Geofísica de Resistividades (Tomografía de Resistividad Eléctrica “TRE” y Sondeos Eléctricos Verticales “SEV’s”) con Fines Hidrogeológicos en la Sede de Málaga de la Universidad Industrial de Santander (UIS)

Maria Angelica Salamanca Corredor

Trabajo de grado para optar al título de geóloga

Director:

Luis Eduardo Moreno Torres

Ing. Civil

Codirector:

David Alfonso Serrano Ferreira

Geólogo

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Físico-Químicas

Escuela De Geología

Bucaramanga

2017

DEDICATORIA

A Dios por las bendiciones que me da cada día y por la oportunidad de
culminar esta etapa de mi vida.

A mi familia, en especial a mi madre Socorro Corredor Ruiz, mis hermanos
Juan Carlos Salamanca y Rodrigo Salamanca, por el apoyo incondicional,
amor y ejemplo constante en mi vida.

A mis pequeños Tomas Salamanca Caballero y Jerónimo Salamanca Rico,
sus sonrisas hicieron más ameno este trayecto.

A Sandra Milena Caballero y Leonel Perilla por hacerme parte de sus vidas.

A mis amigas por acompañarme en esta travesía y recordarme que cada día
tiene un motivo para sonreír.

A la manada por brindarme su apoyo y amor incondicional, por hacerme
parte de sus familias

A mi director de tesis, el Ingeniero Luis Eduardo porque sin su apoyo este
proyecto no sería el mismo.

AGRADECIMIENTOS

A el Director de este proyecto el Ingeniero Luis Eduardo Moreno Torres por la dedicación, tiempo y apoyo dado para la realización de esta investigación.

A el Codirector de este proyecto David Serrano por su colaboración y dedicación con esta investigación.

A el grupo de investigación Geomática, gestión y optimización de sistemas en especial al Ingeniero Yuseth Sebastián Gómez Neira y el Ingeniero Oscar Fabián Sánchez.

A la alcaldía del municipio de Málaga por su colaboración e interés en el proyecto realizado

A los docentes de la escuela de geología por su acompañamiento en el proceso educativo.

A mis compañeros de campo Jesús Rincón, José Tarazona y Natalia Rueda.

Contenido

Introducción	16
Justificación	17
1. Objetivos	19
1.1. Objetivo General.....	19
1.2. Objetivos Específicos	19
2. Generalidades	20
2.1. Localización.....	20
2.2. Clima.....	20
2.3. Hidrografía.....	22
2.4. Geomorfología.....	23
3. Estado del Arte.....	24
4. Marco Teórico.....	28
5. Marco Geológico.....	49
6. Geología Estructural.....	51
7. Metodología	53
7.1. Etapa 1. Pre Campo	53
7.1.1. Selección de la Zona de Campo:	53
7.1.2. Búsqueda de información.....	54
7.1.3. Selección de equipos	54

7.1.4.	Selección de arreglo geométrico para la toma de datos	55
7.2.	Etapa 2. Campo.....	55
7.2.1.	Etapa de reconocimiento	55
7.2.2.	Etapa de adquisición de datos geoelectricos	55
7.2.3.	Etapa de reconocimiento geológico	55
7.3.	Etapa 3. Etapa de Oficina.....	56
7.3.1.	Procesamiento	56
7.3.2.	Interpretación	56
8.	Resultados	56
8.1.	Geoelectrica	56
8.1.1.	Sondeos eléctricos verticales (SEV's)	57
8.1.1.1.	Adquisición.....	58
8.1.2.	Tomografía eléctrica de resistividades (TRE).....	65
8.2.	GEOLOGÍA.....	77
8.2.1.	Depósitos Cuaternarios:	77
8.2.2.	Formación Tibú y Mercedes	78
8.3.	Modelo Geológico-Geoelectrico.....	81
8.3.2.	Modelo geológico-geoelectrico por TRE.....	83
8.3.3.	Modelo geológico-geoelectrico SEV's	88
8.4.	Inventario de Puntos de Agua.....	93

8.4.1. Zonas de mayor potencial acuífero	99
9. Conclusiones	101
10. Recomendaciones.....	103
Referencias Bibliográficas.....	104
Anexos	108

Tablas

Tabla 1.	20
Tabla 2.	21
Tabla 3.	35
Tabla 4.	37
Tabla 5.	58
Tabla 6.	59
Tabla 7.	61
Tabla 8.	62
Tabla 9.	69
Tabla 10.	70
Tabla 11.	70
Tabla 12.	71
Tabla 13.	72
Tabla 14.	72
Tabla 15.	78
Tabla 16.	79

Tabla de Figuras

Figura 1. Ubicación sede UIS-Málaga, Norte del municipio de Málaga-Santander.	18
Figura 2. Mapa isotermas, ubicación UIS Málaga, tomado de: EOT, 2015.	19
Figura 3. Tipos de plegamientos A. Sinclinal, estructura similar a la presentada en el municipio de Málaga, Santander (zona de estudio); B. Anticlinal. Modificada de: Vélez 1999.	29
Figura 4. Implicaciones de las fallas en la posición de los acuíferos. Modificada de: Vélez, 1999.....	30
Figura 5. Tipos de acuíferos. Tomado de: http://aquabook.agua.gob.ar/407_0 , Fuente: banco de imágenes del departamento general de irrigación.	31
Figura 6. Resistividad del subsuelo según su geología tomado de: Iakubovskii y Liajov, 1980.	33
Figura 7. Relación entre la resistividad y la concentración de NaCl en el agua (salinidad), modificada de (Iakubovskii y Liajov, 1980)	38
Figura 8. Disposición geométrica de los electrodos en la superficie del terreno, A) dispositivo Schlumberger; B) Polo-Dipolo; c) Wenner; D) Polo-Polo; E) Dipolo-Dipolo y F) wenner-schlumberger (Iakubovskii y Liajov, 1980).	39
Figura 9. Relación de la resistividad aparente con el medio. Adaptado de: Parasnis, 2012. ...	40
Figura 10. Diferentes modelos dados para la toma de datos de resistividades, Adaptado de: López, 2008.....	43
Figura 11. Cortes geoeléctricos, modelo de dos capas (a), tres capas (b) y cuatro capas (c). Tomado de Iakubovskii y Liajov (1980).	44
Figura 12. Curvas de SEV's, tomado de: Iakubovskii y Liajov (1980).	45

Figura 13. Modelo de toma de datos de tomografía eléctrica de resistividades.	46
Figura 14. Tomografía eléctrica de resistividades después del proceso de inversión, la cual presenta una disposición en dos dimensiones de las resistividades reales del subsuelo estudiado.	47
figura 15. localización de los perfiles geológicos. adaptado de: plancha 136 de Málaga-Santander.....	50
figura 16. cortes geológicos, se observa el sinclinal de Málaga.	51
Figura 17. Ubicación tomografías eléctricas de resistividades y sondeos eléctricos verticales para la zona de estudio.	55
Figura 18. Adquisición de datos en las instalaciones de la sede Málaga.	56
Figura 19. Adquisición y puesta de arreglo geométrico Schlumberger.	57
Figura 20. Curva teórica y de campo, procesada en el software IPI2WIN RUIS1A.	58
Figura 21. Curva teórica y de campo, procesado en IPI2WIN RUIS2A.	59
Figura 22. Curva de campo y teorica, procesada en el software IPI2WIN. RUIS3A.	60
Figura 23. Curva de campo y teórica, procesada en el software IPI2WIN. RUIS4A.	61
Figura 24. Equipo de campo realizando labores de toma de datos por medio del quipo Supersting R8.	62
Figura 25. Cableado utilizado por el equipo supersting R8.	63
Figura 26. Pines conductores conectados a sus respectivos electrodos.	64
Figura 27. Swichbox del equipo.	64
Figura 28. Batería, CPU y Swichbox del equipo.	65
Figura 29. Datos del procesamiento de datos, Fuente: Software EarthImager.	65
Figura 30. A) Perfil de resistividad aparente medido; B) Perfil de resistividad aparente	

calculada y C) Perfil de resistividades reales; Iteración Cero.	66
Figura 31. A) Perfil de resistividades aparentes medidas; B) Perfil de resistividades aparentes calculadas y C) Perfil de resistividades reales; ultima iteración (No 5) calculada por el sistema.	67
Figura 32. relación entre el error y el número de iteraciones realizadas.	67
Figura 33. ubicación en el software de la comparación entre los datos aparentes medidos y calculados.	68
Figura 34. grafica de resistividades medidas contra resistividades calculadas.	68
Figura 35. Sección de resistividades reales interpretada. AERO1.....	69
Figura 36. Sección de resistividad real.	71
Figura 37. Sección de resistividad real. UIS2	72
Figura 38. Deposito coluvión, cerca de la sede Málaga de la Universidad industrial de Santander.....	73
Figura 39. Micritas de la formación Tibú-Mercedes, encontradas en el barrio barzal, metros más debajo del área de estudio.....	75
Figura 40. Calizas biomicriticas de la formación Tibú-Mercedes, encontradas en la vía que va del municipio a la vereda el barzal, metros más debajo de la zona de estudio.	76
Figura 41. Mapa geológico de la zona de estudio, donde se observa la distribución de los depósitos cuaternarios y formación Tibú-Mercedes, curvas de nivel cada dos metros.	77
Figura 42. A) Modelo Aero1	79
Figura 43. B) Modelo UIS1	80
Figura 44. Modelo UIS2	81
Figura 45. Modelo 1	83

PROSPECCIÓN GEOFÍSICA CON FINES HIDROGEOLÓGICOS

Figura 46. Modelo 2	83
Figura 47. A) Modelo RUIS1A-RUIS4A	84
Figura 48. B) Modelo RUIS2A-RUIS3A	86
Figura 49. caliza meteorizada, altamente fracturada, ubicada en el barrio Vista Hermosa.	87
Figura 50. punto de agua 1	88
Figura 51. Punto de agua 2	89
Figura 52. punto de agua 3	90
Figura 53. Punto de agua 4	91
Figura 54. Punto de agua 5	92
Figura 55. Punto de agua 6	92
Figura 56. Zonas de mayor potencial acuífero	94

RESUMEN

TÍTULO: CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO MEDIANTE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA DE RESISTIVIDADES (TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA Y SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES SEV'S) CON FINES HIDROGEOLOGÍCOS EN LA SEDE DE MÁLAGA DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER (UIS)^{1*}

AUTOR: MARIA ANGELICA SALAMANCA CORREDOR^{2**}

PALABRAS CLAVES: propiedades geoelectricas, agua subterránea, depósitos, acuífero.

DESCRIPCIÓN

Con la necesidad de buscar fuentes alternas para el abastecimiento de agua de la sede Málaga de la Universidad Industrial de Santander se realizó la caracterización de las capas del subsuelo por medio de investigación geológica y geoelectrica de la zona de estudio y sus alrededores.

En el análisis geológico se observó que la zona de estudio se encuentra sobre el flanco oeste del sinclinal de Málaga donde afloran depósitos de tipo coluvial y parte de la Formación TibúMercedes; esta información correlacionada con las resistividades obtenidas por medio de tomografías de resistividad eléctrica (TRE) y sondeos eléctricos verticales (SEV's), y el inventario de afloramiento y otros puntos de agua permitió estimar el potencial hidrogeológico aproximado de las capas diferenciadas.

Teniendo en cuenta los resultados encontrados se diferenciaron cuatro capas, tres de estas relacionadas con depósitos recientes (depósitos coluviales secos y saturados en la zona de estudio y en la zona norte del aeropuerto Jerónimo de Aguayo se asocia un depósitos aluviales) y la cuarta capa conformada por calizas micríticas y bio-micríticas de la Formación TibúMercedes, siendo ésta la de mayor importancia y potencial acuífero por mostrar una porosidad secundaria conveniente, una resistividad con rango de 48 a 960 Ω -m y un espesor aproximado de 104 m.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingeniería Físico-Químicas, Escuela de Geología UIS. Director: Ingeniero Luis Eduardo Moreno Torres

ABSTRACT

TITLE: CHARACTERIZATION OF THE SUBSUEL THROUGH GEOPHYSICAL PROSPECTION OF RESISTIVITY WITH HYDROGEOLOGICAL PURPOSE AT THE UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER MALAGA BRANCH.^{3*}

AUTHOR: MARIA ANGELICA SALAMANCA CORREDOR ^{4**}

KEY WORDS: geoelectric properties, groundwater, deposits, aquifer.

DESCRIPTION

Based on the need to look for alternative sources for water supply of the Universidad Industrial de Santander Malaga branch, the characterization of the subsoil layers was carried out through geological and geoelectric investigation of the study area and its surroundings.

In the geological analysis it was observed that the study area is located on the western sky of the Malaga syncline, where the colluvial deposits and part of the Tibú-Mercedes Formation; This information correlated with the resistivities obtained by means of electrical resistivity tomography (ERT) and vertical electrical soundings (VES), and the inventory of outcroppings and other water points allowed to estimate the approximate hydrogeological potential of the differentiated layers.

Taking into account the results found were four layers, three of these images with recent deposits (dry and saturated colluvial deposits in the study area and in the north zone of the airport) and the fourth layer formed by micrítica and bio-micritic limestones of the TibúMercedes Formation, being the greater importance and aquifer potential to show a suitable secondary porosity, a resistivity with the range of 48 to 960 Ω -m an approximate thickness of 104 m.

*Bachelor Thesis

** Facultad de Ingeniería Físico-Químicas, Escuela de Geología UIS. Director: Ingeniero Luis Eduardo Moreno Torres

Introducción

La principal fuente de abastecimiento de agua para consumo humano en el municipio de Málaga, departamento de Santander proviene de las fuentes hídricas superficiales; sin embargo, la reducción de éstas fuentes y el crecimiento de la población en éste municipio a causa del conflicto armado en Colombia y otros diversos factores socio económicos, trajeron consigo la necesidad de buscar fuentes alternas de suministro como el agua subterránea.

Las propiedades geológicas condicionan la ocurrencia o depósito de aguas subterráneas, por tanto tener conocimiento del tipo de litología, porosidad primaria y secundaria de las rocas encajantes, entre otras características de la zona de estudio es de gran importancia; complementar esta información con métodos geofísicos indirectos como la geoelectrica permite conocer la resistividad del material a profundidad y la correlación de las unidades geológicas con dichas resistividades permite inferir características hidrogeológicas de la zona.

Este proyecto constituye el inicio de la prospección geofísica con fines hidrogeológicos de la Universidad industrial de Santander sede Málaga, utilizando el método geoelectrico por medio de técnicas como los sondeos eléctricos verticales (SEV's) que permiten ver perfiles en una dimensión y las tomografías de resistividades eléctricas (TRE) que muestran el perfil del suelo en profundidad y en dos dimensiones; una descripción geológica de la zona e inventarios de afloramientos de aguas aldañas a la Sede, presentando como resultado un modelo geológico-geoelectrico encaminado a la descripción de características hidrogeológicas y la propuestas de puntos de exploración del agua subterránea directos.

Justificación

La sede UIS Málaga maneja en sus instalaciones en promedio 710 personas entre funcionarios, profesores y estudiantes, los cuales consumen per cápita un aproximado de 70 litros de agua al día (CRA, 2015), entre lavado de manos, dientes, cara y el desagüe de la cisterna; lo cual representa un uso diario de 49,700 litros de agua aproximadamente. Teniendo en cuenta esta información (de acuerdo al censo estudiantil), sin proyectarla a futuro y la reciente adquisición de predios aledaños a sus instalaciones para proyectos de ampliación y pronosticando el aumento de estudiantes y la demanda del recurso hídrico, se hace necesario la búsqueda, identificación y ubicación de posibles fuentes que puedan abastecer o contribuir a suplir la demanda de agua, brindando alternativas para la solución del déficit de este recurso, ya que el principal problema del casco urbano del municipio de Málaga, es precisamente el Abastecimiento del agua, que a la fecha no cumple ni en calidad, volumen ni oportunidad en cuanto a la prestación del servicio de acueducto.

Como una posible y efectiva solución a ésta problemática se plantea la exploración hidrogeológica en los predios vecinos a la Sede recién adquiridos, por medio de estudios estratigráficos, estructurales y la implementación de herramientas geoelectricas (tomografía eléctrica TRE y sondeos eléctricos verticales SEV's), realización de modelamiento de capas, miembros o formaciones que puedan tener vocación acuífera para lograr la identificación de una fuente estratégica y alterna al suministro de agua en la planta física de la UIS en Málaga.

Los métodos geológicos en conjunto con el método geoelectrico pueden brindar un gran conocimiento y aproximación acerca de las propiedades del subsuelo; las características geológicas del terreno como la porosidad, fracturamiento, entre otras pueden inferir un ambiente propicio para el flujo de agua subterránea. Por otro lado, las propiedades eléctricas determinadas por medio del

PROSPECCIÓN GEOFÍSICA CON FINES HIDROGEOLOGÍCOS

método geoelectrico pueden ser de ayuda a la hora de identificar una zona óptima para la exploración de agua subterránea. Uno de los indicadores de la existencia de éste recurso por medio de la geoelectrica corresponde a las bajas resistividades que ésta da a la mayoría de las formaciones rocosas, gracias a la gran cantidad de iones que el agua posee disueltos permitiendo que la corriente eléctrica viaje con mayor facilidad, dando como resultado resistividades reales entre 40-100 Ω .m. para rocas y ambientes que permiten un mejor aprovechamiento del recurso hídrico. Por esta razón, el método geo eléctrico a partir de resistividades es de gran utilidad y uno de los más comúnmente utilizados para la prospección de agua subterránea.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Realizar la caracterización de las heterogeneidades del subsuelo e identificación de capas y espesores con vocación acuífera, a partir del análisis de las resistividades reales, obtenidas mediante herramientas geoelectricas de tomografía (TRE) y sondeos eléctricos verticales SEV'S, en los predios adquiridos por Universidad Industrial de Santander en su Sede de Málaga.

1.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar una caracterización geológica general, con el fin de identificar tipos de litología, rasgos estructurales, sedimentológicos y estratigráficos determinantes (cartografía geológica 1:2000, columna estratigráfica generalizada, cortes geológicos.
- Adquirir, analizar e interpretar los datos obtenidos a partir de sondeos eléctricos verticales SEV's del subsuelo en los predios de la sede UIS Málaga utilizando el *Software Ipi2win*.
- Generar e interpretar los modelos 2D a partir de datos adquiridos utilizando el equipo *SuperSting Resistivity/IP/SP meter* y el software *Earthimager 2D* de tomografía eléctrica, para la identificación de capas con vocación acuífera y definición de la geometría del acuífero.
- Definir la Localización de por lo menos un pozo profundo con fines de explotación

2. Generalidades

2.1. Localización

La zona de estudio se encuentra ubicada al nororiente del casco urbano en el municipio de Málaga, localizado al suroriente del departamento de Santander, en la sede de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Se encuentra entre las coordenadas Magna Colombia Bogotá: $X_1=1'149.040$ y $X_2=1'149.335$ en el Norte y $Y_1=1'233.689$ y $Y_2=1'233.721$ en el Oeste, ubicada en la plancha geológica 136. Geológicamente se sitúa en el borde oriental del Macizo de Santander y parte sur del Páramo del Almorzadero.

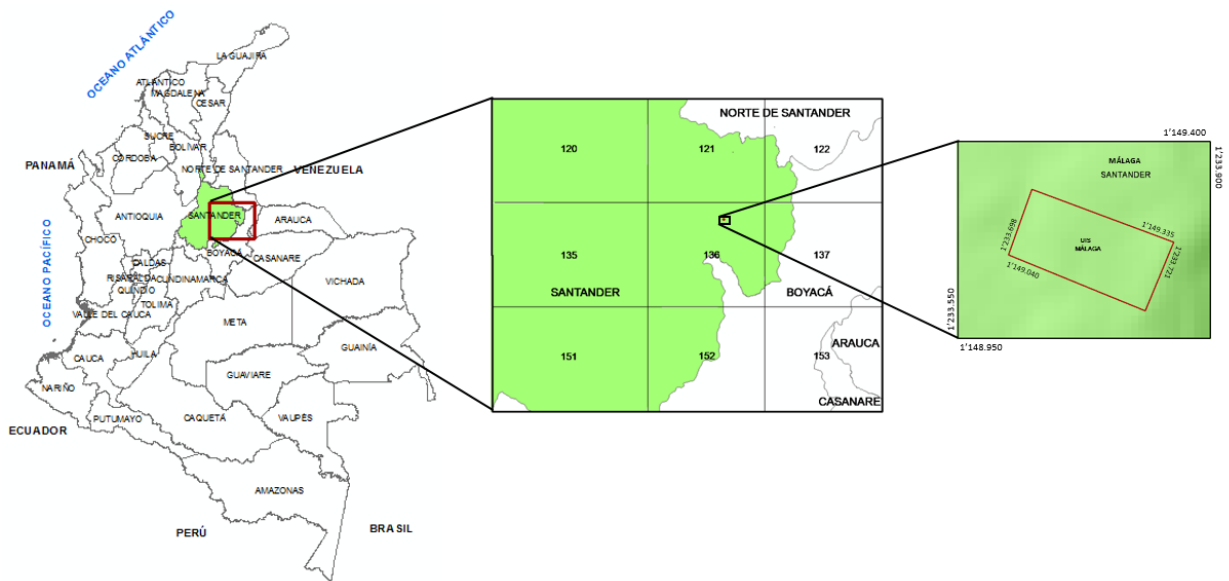


Figura 1. Ubicación sede UIS-Málaga, Norte del municipio de Málaga-Santander.

2.2. Clima

El Municipio de Málaga cuenta con una temperatura promedio de 17°C , la precipitación anual tiene un promedio de 1.400 mm en los últimos 20 años. Los meses de mayor pluviosidad son mayo, octubre y noviembre, constituyendo un clima bimodal, con dos períodos lluviosos: abril a mayo y septiembre a noviembre.

El municipio de Málaga se ubica latitudinalmente entre los 1.600 y 3.400 m.s.n.m, lo que determina que la temperatura en el sector oscile entre 19,5°C. y 8,5°C. (PD, 2012). La temperatura según el EOT (Figura 2) para la zona de UIS Málaga es de 16-18 grados centígrados.

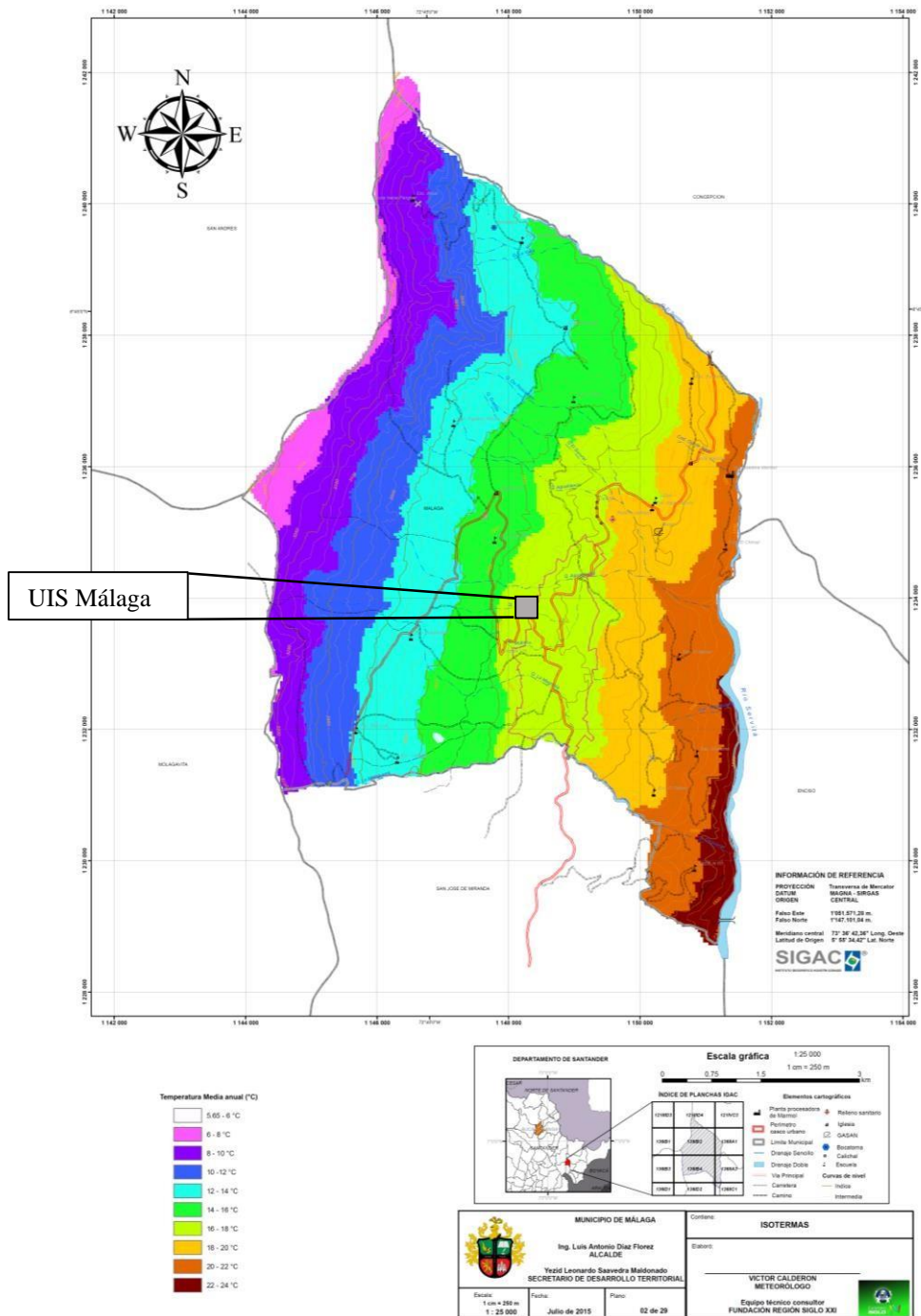


Figura 2. Mapa isotermas, ubicación UIS Málaga, tomado de: EOT, 2015.

2.3.Hidrografía

El municipio de Málaga-Santander se encuentra asociado a la red hídrica perteneciente a la sub-cuenca del río Servita, con dirección norte-sur; las vertientes que alimentan este río fluyen en dirección sureste pertenecientes a microcuencas en la zona y la pluviosidad media permite el flujo constante e intermitente de los drenajes (EOT, 2003).

El río Servita se une con el río Chicamocha, el cual entrega sus aguas al río Sogamoso que desemboca en la cuenca del río Magdalena. Este río marca la referencia del límite entre los municipios de Málaga y el Enciso, nace en el páramo del Almorzadero, sector Angosturas, en los límites del departamento de Santander y Norte de Santander (EOT, 2003).

La cuenca es alimentada por todos los drenajes que atraviesan al municipio de occidente a oriente, los cuales forman tres microcuencas: microcuenca de la Quebrada El Término (MQT), microcuenca de la Quebrada Agua Blanca (MQA) y la microcuenca de la Quebrada La Magnolia (MQM), ésta atraviesa el casco urbano y los drenajes directos (D) (EOT,2003).

Tabla 1.

Microcuencas. Tomado y adaptado de EOT, 2003.

Quebrada	Nacimiento	Área (Ha)	Longitud (Km)	Desembocadura (m.s.n.m.)
El Término	Vereda Pantano Grande a 3,400	1,069.78	7.3	Rio Servitá a 1800
Agua Blanca	Vereda Pescadero a 3,020	2,338.90	6.8	Rio Servitá a 1700
La Magnolia	Vereda Buenavista a 3,000	1,345.67	7.6	Rio Servitá a 1550

2.4. Geomorfología

La geomorfología del municipio de Málaga se encuentra representada por estructuras fluviales, coluviales y tectónicas. La geomorfología se clasifica teniendo en cuenta la descripción de las formas del terreno, explicación del génesis (origen y evolución), definición de la naturaleza de los materiales que lo constituyen, clasificación de los paisajes (en base a morfología, origen, edad y composición), la explicación y descripción de los agentes y procesos geomorfológicos (EOT, 2003).

En la Tabla 2, se presentan las principales estructuras geomorfológicas del municipio de Málaga-Santander.

Según el EOT la morfología se relaciona con el relieve y el proceso que da origen a estos, la identificación y clasificación de las diferentes geoformas se realizó en base a la Metodología del I.T.C-. (Internacional Instituto for Aerospace sourcey and Earth Sciencies) de Holanda, propuesta por Vanzvidman en 1985 que es utilizada por Ingeominas, Delimitando once (11) geoformas. En la Tabla 2, se describen las geoformas de interés para el estudio.

Tabla 2.

Morfología del municipio de Málaga-Santander, Tomado y adaptado de: EOT, 2003.

Morfología		
Geoforma Denudacional	Colinas y Montañas Denudacionales (D3).	Localización: limita a la vereda Calichal (sector Agua Blanca), Barzal, Guásimo (sector Tablón y Guásimo bajo) y Tierra Blanca (márgenes de la Quebrada El Espinal) Área cubierta: 822,19 Hectáreas que corresponden al 14,42% del territorio municipal.

Características: comúnmente en la Formación Tibú-Mercedes, se presenta gracias a la denudación del

material arcilloso de esta formación, con pendientes empinadas a muy empinadas con topografía de colina a montañosa, presenta formas en colina redondeada de poca elevación alternadas con montañas altas de pendientes largas con una inclinación de 0°-30° (50%), moderadamente a severamente disectada.

Localización: veredas de Calichal (entre los tres sectores de la vereda, sobre vía a Concepción), Pantano Grande (sector Alizal y Pantano Grande, sobre cañada Las Flores, Potreritos y Colorada), el casco urbano se ubica sobre esta geoforma.

Cuestas (S₆) Área cubierta: 932,72 Hectáreas que corresponden al 16,36% del territorio municipal

Características: está constituido por secuencia de areniscas y calizas, por lo cual la ladera estructural es más regular, ligeramente a moderadamente disectada, con suelos bien definidos y cierto grado de madurez.

3. Estado del Arte

Según Custodio y Llamas (2001), los primeros estudios en hidrología subterránea fueron realizados por Pierre Perrault (1608-1680) quien en el siglo XVII en su libro “De l’origine des fontaines” demuestra que el caudal anual del río Sena corresponde a la sexta parte del volumen de la lluvia caída en la cuenca vertiente, tomando datos de lluvia durante tres años seguidos de la cuenca del Sena. Edmé Mariotte (1620-1684), realiza un estudio similar en el río Sena implementado el funcionamiento de flotadores, llegando a conclusiones análogas a las de Perrault, midiendo la infiltración del agua de lluvia con un lisímetro y concluyendo que el caudal del río variaba con respecto a la pluviosidad.

La evaporación fue estudiada por el inglés Edmund Halley (1656-1742), el cual llega a la conclusión de que el agua evaporada por los mares es suficiente para la producción de agua lluvia que alimenta a esas cuencas.

En la historia no se podía hablar de la hidrogeología como ciencia sino hasta después de los primeros avances en geología dados por los pioneros en esta rama como Hutton, Smith, Werner y Brogniart, los cuales abrieron camino para complementar el estudio de las aguas subterráneas con el estudio de las rocas que sirven como entes almacenadores de estas.

Lamarck en 1802 fue uno de los pioneros en la utilización del término *Hidrogeología*, utilizándolo bajo la definición del conjunto de fenómenos de erosión, transporte y sedimentación producidos por los agentes acuosos, es decir como una parte de la geodinámica externa. En 1885, el americano Powell utilizó el término hidrogeología de la misma manera, sin embargo, el significado asignado por estos autores no tuvo una buena aceptación (Davis y De Wiest, 1966).

En 1880, el inglés Lucas describe el término hidrogeología como el estudio geológico para la investigación de aguas subterráneas, haciéndolo también el americano Mead en su libro “Hydrology” publicado en 1919; este mismo año, el alemán Prinz en su publicación “Handbuch der Hydrologie” utiliza el término refiriéndose exclusivamente a las aguas subterráneas.

En 1939, Meinzer propone ante la Asociación Internacional de Hidrología Científica denominar Geohidrología a la parte de la hidrología que toma en el interior de la tierra. En su libro “Hydrology” publicado en 1942 separa el estudio de las aguas superficiales como hidrología superficial y aguas subterráneas como hidrología subterránea o Geo-hidrología.

El comité coordinador de Decenio Hidrológico Internacional (como se citó en Custodio y llamas, 2001) adopta la siguiente definición para el término hidrogeología “Hidrología subterránea es aquella parte de la hidrología que corresponde al almacenamiento y circulación y distribución de las aguas terrestres en la zona saturada de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus

propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico y biológico y sus reacciones a la acción del hombre”

La hidrogeología se presenta como una materia interdisciplinaria donde participan ciencias como la geofísica, geomorfología, tectónica, estratigrafía, hidrogeoquímica, geotecnia, mecánica de fluidos, climatología, estadística y técnicas de perforación de pozos. (Custodio y Llamas, 2001; Ingeominas, 2004; Velez, 1999).

Según el INGEOMINAS (hoy Servicio Geológico Colombiano SGC), en 1950 empiezan los estudios hidrogeológicos en Colombia con el fin de plantear soluciones de abastecimiento de agua potable donde los departamentos beneficiados fueron el Valle del Cauca, Boyacá, Cauca, Cundinamarca, Huila, Córdoba y Antioquia.

Hacia los años 60, se continuó en Colombia con este tipo de estudios teniendo en cuenta poblaciones de los departamentos de Tolima, Bolívar, Santander y Caldas, así como otros complementarios en Boyacá y Valle del Cauca. En los años 70, por medio de convenios internacionales y contratos institucionales con el gobierno de Holanda (*The Netherlands Organisation for Applied Scientific Research – TNO*) y Colombia (Departamento Nacional de Planeación “DNP”), el INGEOMINAS empezó a realizar estudios sistemáticos de carácter regional. Se llevó a cabo la exploración de aguas subterráneas en el Departamento del Valle del Cauca, en el Valle Medio del Magdalena y en la zona noroccidental de la Sabana de Bogotá.

En los años 80, persistieron los estudios por parte del INGEOMINAS con la cooperación de la TNO (*The Netherlands Organisation for Applied Scientific Research*), continuando con la exploración de aguas subterráneas en Cúcuta, en los Valles de Ubaté y Chiquinquirá, en la Media y Alta Guajira, en los departamentos de Atlántico y Bolívar, en el noreste de Urabá y en la Isla de

Mompóx. A través de convenios interinstitucionales se adelantaron estudios hidrogeológicos en algunos municipios de los departamentos de Boyacá, Cundinamarca y Tolima.

En el año 1996, el INGEOMINAS inició la elaboración del Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia (escala 1:500.000), que comprendió la compilación y análisis de información de los estudios hidrogeológicos ejecutados por el Instituto y la existente en otras entidades públicas y privadas.

La rama de la ciencia enfocada en la búsqueda de agua subterránea es la geofísica, la geoelectrica es uno de los métodos geofísicos más populares para la búsqueda de agua subterránea gracias a sus bajos costos y efectividad.

En 1827, se formula la ley de Ohm dada por Geor Simón Ohm (1787-1854), la cual relaciona la intensidad de la corriente eléctrica, la fuerza electromotriz y la resistencia ofrecida por el medio físico al paso de una corriente eléctrica, la unidad utilizada para medir la resistencia eléctrica es el Ohm (Martinez, s.f), en 1837 el científico Michael Faraday (1791-1867) aporta la hoy llamada ley de Faraday.

En geología es muy común utilizar técnicas geofísicas, por medio de estos principios se puede reconocer las diferentes capas geológicas encontradas en profundidad mediante el estudio y la medición de algún parámetro físico, por ejemplo, en sísmica por la velocidad de transmisión de las ondas a través de las rocas o en prospección eléctrica por la resistividad ofrecida por las mismas.

El inicio de los métodos geoelectricos se remonta en el siglo XVIII. En el año 1720, los científicos Gray y Wheeler adelantaron trabajos que demostraban la capacidad del paso de la corriente (resistividad-conductividad) de las rocas y el descubrimiento aportado por Watson en 1746 de un suelo conductor; los primeros métodos con electrodos impolarizables fueron realizados

entre el año 1880-1914 por los científicos Barnes; Brown y Wells. Brown en 1833 patentó un sistema de prospección geoelectrica con dos electrodos y Daft y Williams obtiene una patente dada por el empleo de corrientes de baja frecuencia, utilizada principalmente en exploración de yacimientos mineros (Orellana, 1982).

Uno de los descubrimientos más importantes de la época fue dado por el científico Conrad Schlumberger en 1913 donde por medio del método de PI o Polarización Inducida descubrió un yacimiento de sulfuros de Boro (Moncayo, 2015), dos años después en 1915 C. Schlumberger y F. Wenner patentaron el sistema tetra electrodico de corriente artificial los cuales son utilizados hasta el día de hoy precisamente por su simpleza y efectividad demostrada ante los demás dispositivos utilizados.

Hoy en día los métodos geo eléctricos más usados se centran en: sondeos eléctricos verticales (SEV's), los cuales miden resistividades en una dirección (dimensión vertical); la Tomografía de resistividades eléctrica (TRE2D), el cual consiste en un sistema multi electrodico que trabaja con el mismo principio del SEV's con un menor tiempo de adquisición de datos para una cantidad apreciable de SEV's consecutivos adquiridos con la disposición multi electrodica de las TRE y actualmente se desarrollaron equipos con un sin número de electrodos (56 o más) y longitudes de cable apreciable (mayor a los 2 kms) que permiten adelantar estudios en el campo de la TRE3D (en 3 dimensiones).

4. Marco Teórico

La hidrogeología se define como el estudio de la interacción entre el agua y la disposición geológica del suelo (Maxey, 1964), por esta razón es necesario conocer conceptos básicos de la

geología relacionados con la hidrogeología. Sin embargo, la definición actualmente aceptada corresponde a *“La hidrogeología es la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, las formas de yacimiento, su difusión, movimiento, régimen y reservas, su interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas); así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación”* (Mijailov, 1989).

La parte del ciclo hidrológico perteneciente al subsuelo terrestre se designa como agua subterránea o hidrogeología (Davist y De Wiest, 1966). Es denominada agua subterránea toda la acumulación de agua que se mueve y se almacena a través de la zona saturada del subsuelo, sin incluirse aquellos depósitos transitorios de agua acumulados por altas infiltraciones; la presencia de estas aguas está relacionada altamente con la litología y propiedades de la roca caja o almacenadora donde el agua es almacenada en sus poros, fisuras, fracturas y diaclasas de esta litología donde por diferencia de presión hidrostática permanece en constante movimiento. (Vélez, 1999).

Los parámetros que controlan el almacenamiento y movimiento de las aguas subterráneas son la permeabilidad y porosidad, dando a entender que una unidad litológica se define como un acuífero el cual contiene agua en cantidades apreciables y que además permite la circulación de esta (Velez, 1999; Moore, 2002), aunque casi siempre, los acuíferos se conforman por la asociación de dos o más unidades litológicas incluso de diferentes formaciones geológicas siempre que sean adyacentes.

Según Vélez (1999) los acuíferos pueden ser fácilmente encontrados en estas cuatro formaciones geológicas:

- Depósitos de gravas y arenas no consolidados, intercalados frecuentemente con estratos de limos y arcillas, con pocas unidades de carbonatos.
- Formaciones consolidadas y semi confinadas de conglomerados y areniscas, que tienen permeabilidad y porosidad primarias y secundarias.
- Formaciones carbonatadas que tienen fisuras y fracturas, que pueden ensancharse por disolución. Tienen porosidades y permeabilidades primarias muy pequeñas
- Rocas ígneas y metamórficas con fisuras y fracturas que permiten el almacenamiento y circulación del agua

La estratificación y los accidentes estructurales de las formaciones rocosas son primordiales para el almacenamiento de aguas subterráneas, la estratigrafía es una ciencia que se utiliza como herramienta para el conocimiento de la disposición de los estratos con el fin de determinar zonas de permeabilidades altas, espesores y profundidades de los estratos (Vélez, 1999). Algunos controles estructurales como los plegamientos, fracturas discontinuidades y fallas, participan en muchos casos, tanto en la acumulación como en la facilidad de movimiento de éstas aguas (ductos abiertos e interconectados por donde con cierta facilidad puede moverse el agua).

Los plegamientos, son estructuras geológicas que corresponden a deformaciones de la corteza terrestre producto de la aplicación de esfuerzos compresivos en el sistema tectónico, estos generalmente introducen incertidumbre en la localización de pozos productivos cuando se aplican técnicas geofísicas (geo eléctrica) para la prospección del sub suelo, haciendo necesario el control geológico detallado en un área dada, para obtener un mapa que indique las unidades más permeables y la posición de los niveles piezométricos, esto debido a la estructura presente.

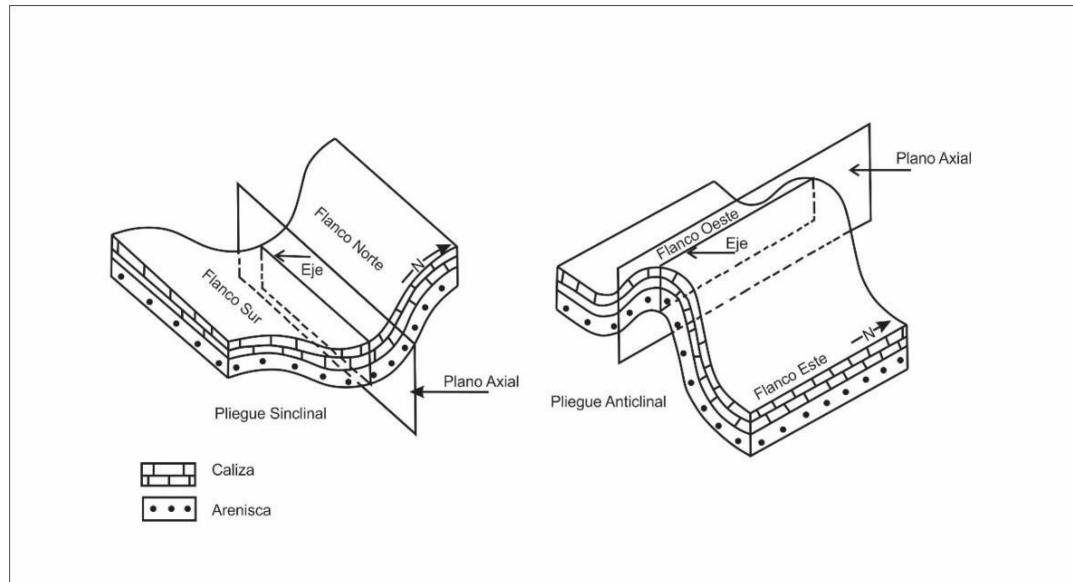


Figura 3. Tipos de plegamientos A. Sinclinal, estructura similar a la presentada en el municipio de Málaga, Santander (zona de estudio); B. Anticlinal. Modificada de: Vélez 1999.

Las fracturas, planos de estratificación y en general cualquier discontinuidad en la masa rocosa sirven como medios conductores de agua, si se encuentran interconectadas aumentan la permeabilidad de la roca favoreciendo la velocidad del flujo del agua subterránea a través del medio rocoso.

Las fallas pequeñas afectan muy poco el movimiento del agua subterránea a menos que se encuentren interconectadas o que conecten con un medio de mayor permeabilidad en la dirección del flujo, y se constituyen a la vez como pequeños almacenamientos. Las fallas regionales afectan la distribución y posición de los acuíferos actuando ya sea como barreras o como canales conductores de agua, también pueden modificar la topografía y altitud del terreno; además, teniendo en cuenta la profundidad de la falla pueden dar paso al ascenso de aguas termales (Vélez 1999), siempre y cuando lo permitan las condiciones piezo métricas (piezometría o energía por unidad de peso).

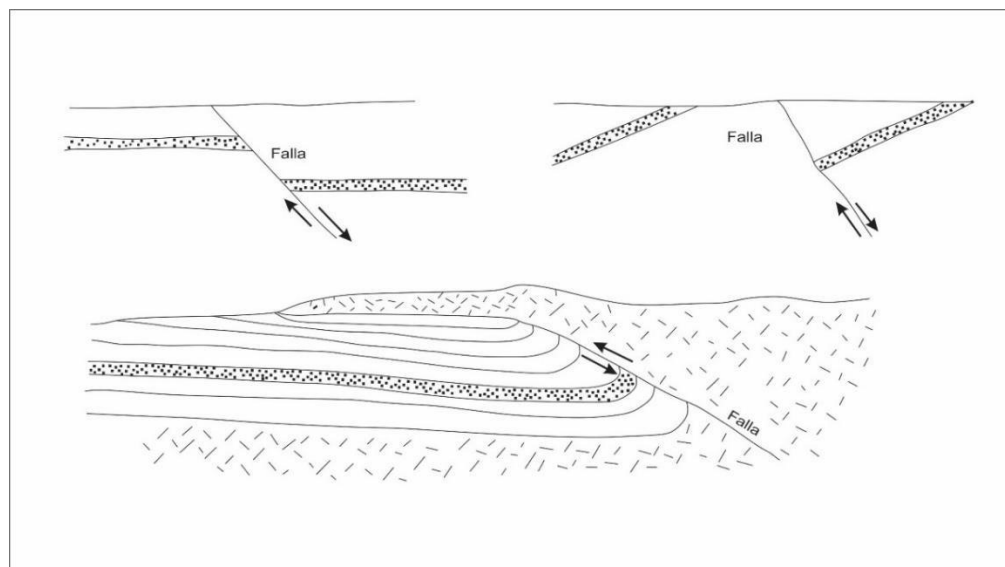


Figura 4. Implicaciones de las fallas en la posición de los acuíferos. Modificada de: Vélez, 1999.

Teniendo en cuenta esta particularidad el agua subterránea puede estar almacenada en litologías con diversas características en los cuerpos geológicos que la contienen, dichas características clasifican los cuerpos como acuífero, acuicludos, acuífugos y acuitardos; y según su estructura y relación con el medio se clasifican en acuíferos libres, confinados y semi confinados. (Collazo y Montaña, 2012) básicamente por el contacto o no con la presión atmosférica).

Según Custodio y Llamas (2001), los acuíferos son estratos o formaciones geológicas (o miembros de una formación) que permiten la circulación del agua por sus poros o fisuras, esta puede ser extraída de forma económicamente rentable; un acuicludo se define como aquella formación geológica que, conteniendo agua en su interior, incluso hasta la saturación, no la transmite y por tanto su explotación no es posible; el acuitardo hace referencia a la existencia de numerosas formaciones geológicas que conteniendo cantidades apreciables de agua, su transmisión es muy lenta por tanto igual su explotación; y por último los acuífugos son aquellas formaciones geológicas que no poseen la capacidad de almacenar ni transmitir agua como por ejemplo una masa rocosa no alterada (no porosa y sin fracturamiento alguno).



Figura 5. Tipos de acuíferos. Tomado de: http://aquabook.agua.gob.ar/407_0, Fuente: banco de imágenes del departamento general de irrigación.

Los acuíferos libres se caracterizan por estar bajo presión atmosférica (o en contacto con ella) con una capa o sello inferior impermeable o de muy baja permeabilidad, su recarga es directa y se realiza por infiltración del agua lluvia a través de la zona no saturada, ejemplos de estos son las terrazas y llanuras aluviales. (Collazo y Montaña, 2012; Villarroya, 2009).

En los acuíferos confinados o cautivos, el agua contenida en estos se encuentra sometida a una presión litológica mayor a la atmosférica, presentando una saturación total. (Custodio y Llamas, 2001; Villarroya, 2009)

Los acuíferos semi confinados (en inglés *leaky aquifers*) se presentan como un sistema integrado por un acuífero superior bien alimentado y su techo es representado por una capa de baja permeabilidad, pero no nula. (Custodio y Llamas, 2001; Villarroya, 2009)

Uno de los métodos utilizados para la localización y la caracterización de algunas de las propiedades físicas de las capas geológicas como resistividad, espesores, profundidad,

acumulación de agua, entre otros son los métodos geofísicos, en hidrogeología es mayormente utilizada la geoelectrica dada su sencillez, simplicidad y efectividad.

Los métodos geofísicos hacen parte de las herramientas usadas en el ámbito de la geología para conocer las propiedades del subsuelo desde un punto de vista físico; los métodos principales son el método eléctrico, el magnético, el sísmico y los gravimétricos cada uno de estos miden diferentes propiedades y tienen distintos usos. El método eléctrico es uno de los más empleados en la exploración de aguas subterráneas, geotecnia y arqueología, entre otros.

Para la caracterización de las propiedades acuíferas de las capas es importante el conocimiento litológico, estructural, geomorfológico, resistivo e hidrológico de la zona a trabajar por lo cual, para este trabajo se realizarán estudios geoelectricos con ayuda de equipo de sondeos eléctricos verticales (SEV's) y tomografía eléctrica de resistividades (TRE); como respuesta se tendrá la resistividad aparente debido a las diferentes capas que atraviesa, y luego de un procesamiento se logra conocer la resistividad real de cada capa pudiéndose diferenciar unas de otras hasta una profundidad limitada, la profundidad es definida por el arreglo geo eléctrico utilizado con cada uno de los métodos y en forma general depende de la abertura entre un par específico de electrodos. Las características litológicas, estructurales y geomorfológicas se determinarán a partir de mapas, memorias explicativas, bibliografía, salidas de campo donde se observará, corroborará y controlará con lo encontrado en la bibliografía. Algunos conceptos básicos necesarios serán descritos en este capítulo.

La litología, geología estructural y geomorfología son características directas del terreno y de la geología que lo sustenta, lo cual indica que pueden ser tomadas de forma precisa in situ. La litología de las capas se estudia en la vía al aeropuerto municipal Jerónimo de Aguayo donde se

puede observar un corte ubicado directamente bajo de la zona de estudio, donde pueden ser analizadas las capas superiores encontradas en dicha zona; para el análisis de las capas inferiores se tendrá en cuenta la geología regional de la zona. La geología estructural y geomorfología se estudian de forma regional. Dentro del análisis estructural, se muestra la dirección principal de los esfuerzos para encontrar cualquier anomalía en el fracturamiento de las rocas y las principales estructuras geomorfológicas, las cuales infieren las zonas de vocación acuífera, de recarga y descarga del flujo de agua, entre otras características.

Para complementar los estudios geológicos serán tomados los datos geoelectricos con la utilización de SEV's y TRE dispuestos de forma horizontal en el terreno, para realizar la interpretación de estos datos se deben tener en cuenta las propiedades físicas de la roca medidas directamente in situ.

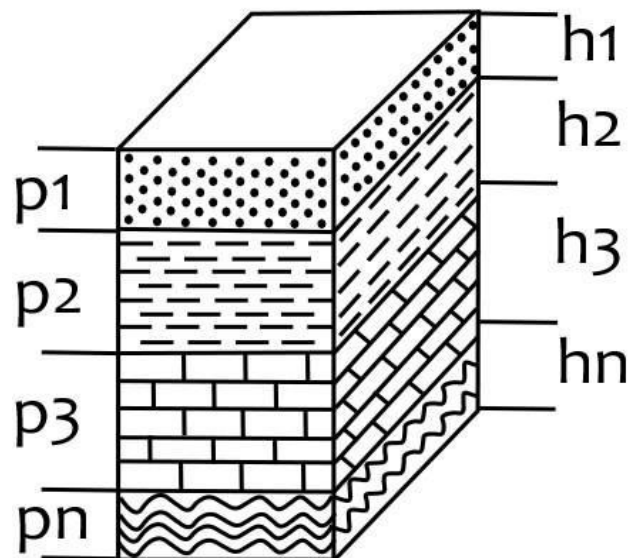


Figura 6. Resistividad del subsuelo según su geología tomado de: Iakubovskii y Liajov, 1980.

Las propiedades físicas de la roca como la resistividad permiten que los métodos eléctricos sean útiles en la geología ya que por medio de ella se puede obtener un modelo o imagen de la roca que atraviesa la corriente, permitiendo hacer una relación resistividad-roca y realizar un modelamiento

del subsuelo de la zona. El procesamiento de la información capturada en campo posee un factor de incertidumbre el cual puede disminuir considerablemente incluyendo variables observadas en campo como la litología, estratigrafía, sedimentología, geomorfología, la geología estructural, entre otras. Para cada tipo de roca se le es asignada una resistividad característica como se observa en la Figura 6, según el grado de humedad y otros factores en la roca la resistividad podría variar representativamente, la humedad es un factor importante en la medición, siendo esta directamente proporcional a la conductividad, a mayor humedad mayor conductividad en la roca como se observa en la Tabla 3 y Tabla 4, e inversamente proporcional a la resistividad eléctrica.

Tabla 3.

Tabla de resistividades adaptado de. (Telford et al, 1990)

Tipo de roca	Rango de resistividad (Ωm)
Granito	4.5×10^3 (húmedo)– 1.3×10^6 (seco)
Cianita	10^2 - 10^6
Diorita	1.9×10^3 (húmedo) – 2.8×10^4 (seco)
Cuarzo diorita	2×10^4 – 2×10^6 (húmedo)
Dacita	2×10^4
Andesita	4.5×10^4 (húmedo) - 1.7×10^2 (seco)
Diabasa	20 - 5×10^7
Lavas	10^2 - 5×10^4
Gabro	10^3 - 10^6
Basalto	10 - 1.3×10^7 (seco)
Marmol	10^2 - 2.5×10^8 (seco)
Skarn	2.5×10^2 (húmedo) - 2.5×10^8 (seco)
Cuarcita	10 - 2×10^8
Shale	20 - 2×10^3
Conglomerados	2×10^3 - 10^4
Areniscas	1 - 6.4×10^8
Limolitas	50 - 10^7
Dolomita	3.5×10^2 - 5×10^3
Arcilla	1 - 100

La resistividad eléctrica (ρ) de cualquier material se determina por la resistencia dada en Ohms que se obtiene en un cubo de dimensiones unitarias, esta muestra la oposición de un material al paso de corriente.

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

Donde ρ es la resistividad eléctrica, R la resistencia del material, A el área transversal del sistema y L la longitud de esta, la resistividad se mide en Ohm*m. La magnitud inversa de la resistividad es la conductividad eléctrica. Sus dimensiones están dadas en siemens por metro (Sm/m).

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

La geoelectrica se basa fundamentalmente en la Ley de Ohm, relacionando el potencial eléctrico (V) con la intensidad de corriente (I) y la resistencia (R) del material al paso de la corriente.

$$V = IR$$

La roca se encuentra constituida por un armazón, matriz y cemento, lo cuales dejan un espacio poroso en su estructura permitiendo el paso de fluidos. Los factores que influyen en la resistividad de la roca son los siguientes (Iakubovskii y Liajov, 1980):

- La resistividad de los minerales que forman la parte sólida de la roca
- La resistividad de los líquidos y gases que rellenan los poros de la roca
- Factor de salinidad del líquido que rellena los poros de la roca
- La humedad de la roca o factor de saturación
- La porosidad de la roca o volumen de huecos
- La distribución de sus poros, la textura y forma de la roca

- Los procesos que ocurren en el contacto de los líquidos de los poros y el esqueleto mineral

La influencia de la temperatura en la resistividad se encuentra dada en la siguiente ecuación:

$$\rho_t = \frac{\rho_{18^\circ}}{1 + \alpha(t - 18^\circ)}$$

Donde ρ_t representa la resistencia de la solución a temperatura t , ρ_{18° = resistencia de la solución a la temperatura de 18° , α = coeficiente de la temperatura de la conductividad eléctrica, igual en promedio a 0.025 a $1/^\circ\text{C}$, esto para electrolitos no puros (Iakubovskii y Liajov, 1980), al aumentar la temperatura la viscosidad de las soluciones acuosas facilita la movilidad de los iones disminuyendo la resistividad. (Olivares, 2010).

En la Tabla 4, se encuentra las resistividades de algunas rocas teniendo en cuenta el porcentaje de H_2O , se puede observar las diferencias en las resistividades en las mismas rocas a diferente porcentaje de agua.

La capacidad de conducción de corriente en las rocas es bastante baja en comparación con las soluciones que ocupan los poros de la roca, se puede observar en Tabla 4. Lo cual indica que la corriente eléctrica fluye a través de las sustancias que ocupan los poros de la roca, en función de esto se concluye que la conductividad de eléctrica es esencialmente electrolítica, lo cual indica una importancia en la humedad de las rocas (Iakubovskii y Liajov, 1980).

Tabla 4.

Resistividades de las rocas teniendo en cuenta su porcentaje de humedad en la roca. Adaptado de (Telford et al, 1990)

Roca	% H_2O	Rango de resistividad (Ωm)
Arenisca	0.54	1.15×10^4
Arenisca	0.38	5.6×10^8
Arenisca de grano grueso	0.39	9.6×10^5

PROSPECCIÓN GEOFÍSICA CON FINES HIDROGEOLOGÍCOS

Arenisca de grano grueso	0.18	10^8
Arenisca de grano medio	1.00	4.2×10^3
Arenisca de grano medio	0.10	1.4×10^8
Grauvaca	1.16	4.7×10^3
Grauvaca	0.45	5.8×10^4
Arenisca arcosa	1.00	1.4×10^3
Caliza orgánica	11	0.6×10^3
Dolomita	1.3	6×10^3
Dolomita	1.96	8×10^3
Peridotita	0.1	3×10^3
Peridotita	0	1.8×10^7
Pirofilita	0.76	6×10^6
Pirofilita	0	10^{11}
Granito	0.31	4.4×10^3
Granito	0.19	1.8×10^6
Granito	0	10^{10}
Diorita	0.02	5.8×10^5
Diorita	0	6×10^6
Basalto	0.95	4×10^4
Basalto	0	1.3×10^8
Piroxeno-olivino	0.028	2×10^4
Piroxeno-olivino	0	5.6×10^7

Los fluidos que rellenan los poros en la roca se caracterizan por tener composiciones minerales diferentes, dadas principalmente por su contenido de sales disueltas y este contenido de sales se encuentra asociado al tiempo de permanencia del agua subterránea en el medio poroso, las zonas de recarga, zonas de descarga, hidrología y la química de la roca encajante en el paso del flujo. La resistividad del agua de las rocas es inversamente proporcional a la concentración de las sales disueltas lo cual pueden describirse en la Figura 7, allí se observa la resistividad en la concentración de NaCl en el agua, a mayor resistividad menor será la concentración de esta solución en el agua (Iakubovskii y Liajov, 1980), un gráfico similar se obtiene al analizar otra especie salina diferente a los cloruros.

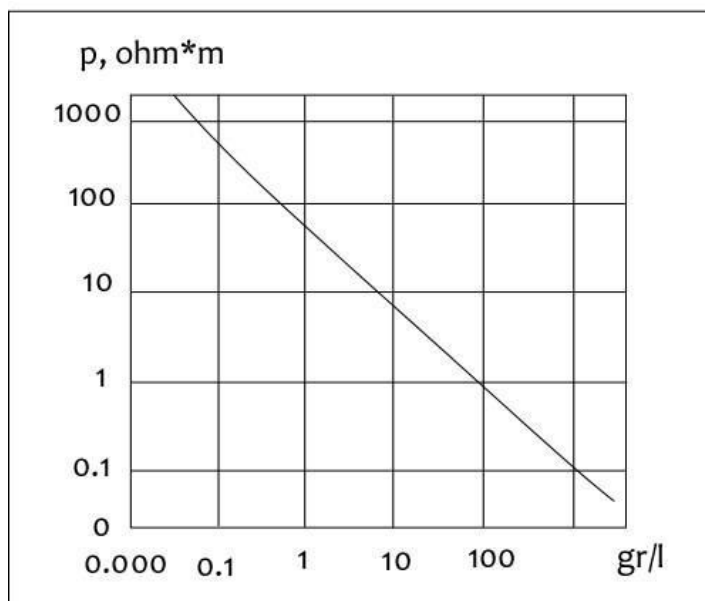


Figura 7. Relación entre la resistividad y la concentración de NaCl en el agua (salinidad), modificada de (Iakubovskii y Liajov, 1980)

En la aplicación in situ, el paso de la corriente crea un campo eléctrico mediante dos electrodos puestos a tierra tomados como los puntos A y B (electrodos de corriente) donde se introduce una corriente eléctrica (I) de cualquier fuente DC (corriente continua) generalmente suministrada por un condensador de carga profunda que comercialmente se conoce como batería de barco. Con ayuda de dos tomas de tierra M y N se miden las diferencias de potencial del terreno ΔUI (electrodos de voltaje o potencial); la disposición de los electrodos que toman este sistema es llamado dispositivo tetra puntual y esta ubicación se determina por el carácter del problema geológico que se desea resolver. (Iakubovskii y Liajov, 1980; Auge, 2008). Por supuesto este sistema tetra puntual aplica para un SEV (un equipo SEV solo tiene 4 electrodos, los dos de corriente y el par de Potencial), para una TRE sencillamente el sistema tetra puntual se repite por tener el tomógrafo más de cuatro electrodos.

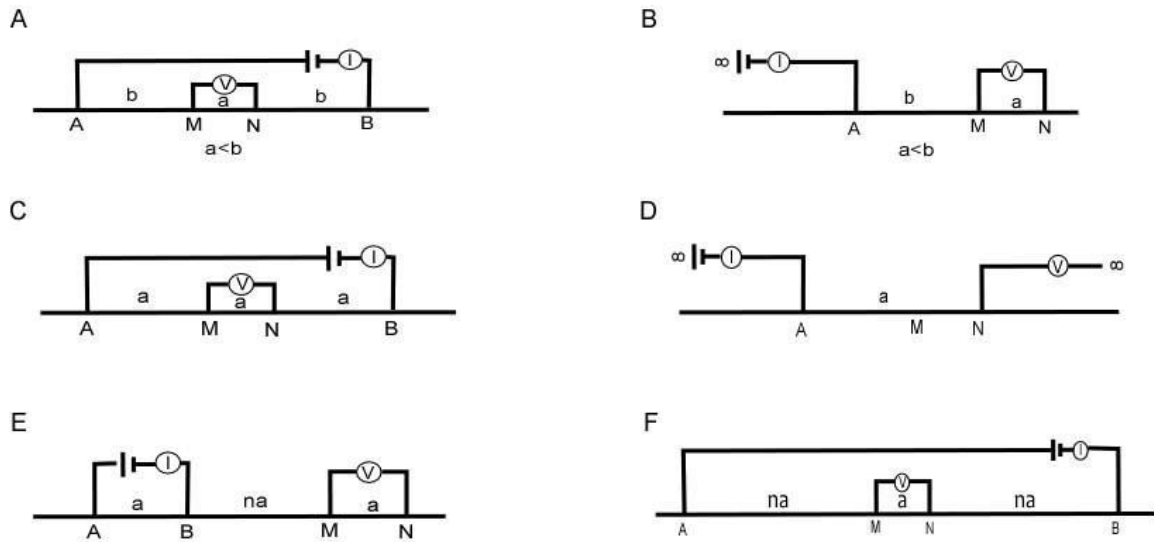


Figura 8. Disposición geométrica de los electrodos en la superficie del terreno, A) dispositivo Schlumberger; B) PoloDipolo; c) Wenner; D) Polo-Polo; E) Dipolo-Dipolo y F) wenner-schlumberger (Iakubovskii y Liajov, 1980).

La resistividad representada en un medio homogéneo obtenido a partir de un dispositivo tetra puntual dispuesto en la superficie del terreno presenta como resultado una magnitud arbitraria de la resistividad que se está midiendo. Esa magnitud se denomina resistividad eléctrica aparente (ρ_a) debido a que atraviesa varias capas a la vez, por lo que la magnitud medida de dicha propiedad podría suponerse como un promedio ponderado de las resistividades de las rocas y sus respectivos espesores atravesados por el flujo de la corriente.

$$\rho_a = \frac{K\Delta U}{I}$$

Donde:

- K se denomina *coeficiente del dispositivo* y se determina por la distancia entre los electrodos del dispositivo, posee dimensiones de longitud.
- ΔU : diferencia de potencial

- I: Corriente eléctrica inyectada

Para un medio homogéneo, la resistividad aparente es igual a la resistividad real como se puede observar en la Figura 9a donde la resistividad aparente es igual a la resistividad uno y dos del subsuelo.

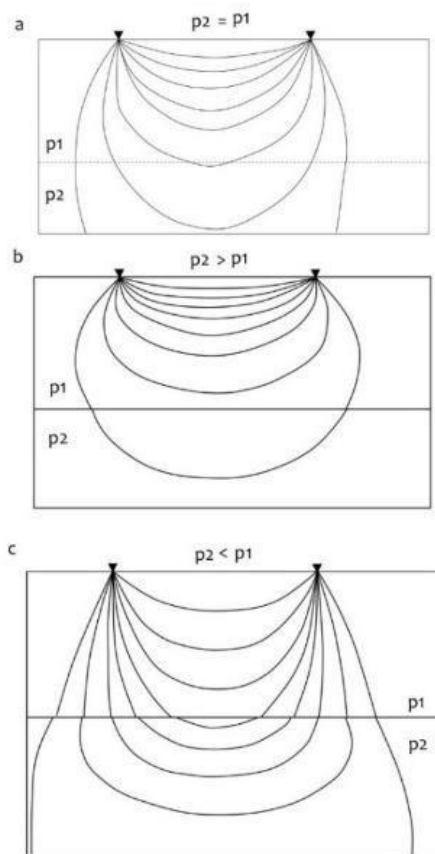


Figura 9. Relación de la resistividad aparente con el medio. Adaptado de: Parasnis, 2012.

En la Figura 9 se puede observar un dispositivo electródico tetra puntual situado en: (a) un medio homogéneo, (b) capa inferior de mayor resistividad que la capa superior o de menor conductividad del cuerpo superior y (c) una capa de mayor conductividad al nivel superior. En el primer caso la resistividad aparente será igual a la resistividad real como ya se había dicho; en el segundo caso la corriente contornea el cuerpo de alta resistencia y se condensa en la zona de las tomas de tierra de medición lo que lleva a un aumento del potencial y por consiguiente un aumento

de ρ_a (resistividad aparente) y en el último caso se observa que la corriente se concentra en el cuerpo conductor, lo cual genera que la densidad de corriente en la parte del medio circundante en el que está colocado las tomas de tierra de medición disminuya, a causa de esto se presenta una disminución tanto en la diferencia de potencial como en ρ_a (Iakubovskii y Liajov, 1980).

El coeficiente del dispositivo (K) varía según sea el arreglo (Figura 8) que se disponga en superficie del sistema tetraédrico, a partir de esto se limita la profundidad y resolución de los datos tomados, (Iakubovskii y Liajov, 1980).

Según Iakubovskii y Liajov (1980), el coeficiente del dispositivo o K se representa a partir del arreglo geométrico utilizado para la toma de datos, teniendo en cuenta que los electrodos A y B inyectan corriente al sistema y los electrodos M y N se utilizan para medir la diferencia de potencial, que distan entre ellos una distancia r_{AM} , r_{BM} , r_{AN} y r_{BN} y un campo eléctrico con potencial U_{MA} , U_{MB} , U_{NA} y U_{NB} . El potencial se expresa de la siguiente forma:

$$U_{XY} = \frac{\rho I}{2\pi} * \frac{1}{r_{XY}}$$

Potencial total en el punto M.

$$U_M = U_{MA} + U_{MB} = \frac{\rho I}{2\pi} * \frac{1}{r_{AM}} - \frac{\rho I}{2\pi} * \frac{1}{r_{BM}} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right)$$

Análogamente, el potencial para el punto N será:

$$U_N = U_{NA} + U_{NB} = \frac{\rho I}{2\pi} * \frac{1}{r_{AN}} - \frac{\rho I}{2\pi} * \frac{1}{r_{BN}} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}} \right)$$

La diferencia de potencial entre los puntos M y N será

$$\Delta U = U_M - U_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right) - \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}} \right) =$$

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

De la ecuación anterior se puede obtener la siguiente expresión para la resistividad ρ en un medio homogéneo, con un dispositivo tetrapuntual en su superficie

$$\rho = \frac{\Delta U}{I} * \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}}$$

Sí,

$$\rho = \frac{K \Delta U}{I}$$

Entonces

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}}$$

La resistividad de las rocas puede ser medida a partir de sondeos eléctricos verticales SEV's los cuales indican el cambio de resistividad de forma vertical (en una sola dirección en el subsuelo) y la tomografía eléctrica de resistividades (TRE), presentado como un método multielectrónico que muestra la resistividad en dos o tres dimensiones según sea tomada la configuración en la superficie, ver Figura 10.

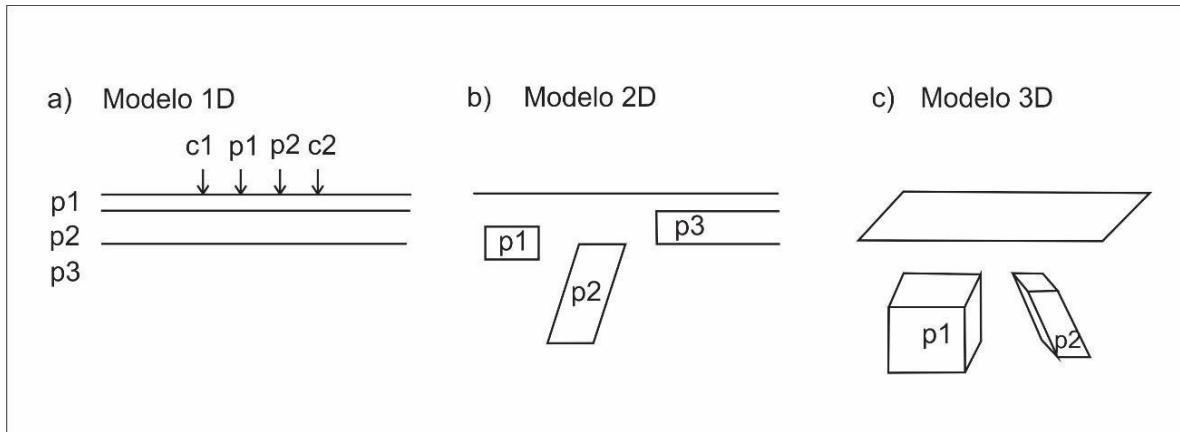


Figura 10. Diferentes modelos dados para la toma de datos de resistividades, Adaptado de: López, 2008

Los sondeos eléctricos verticales (SEV's) son utilizados en la prospección geoelectrica por medio de un sistema tetra puntual AMNB, donde la resultante de la resistividad aparente depende de la disposición de las rocas de diferentes resistividades en el semi espacio inferior (sub suelo) y de la disposición relativa de los electrodos en superficie, así como la profundidad de penetración de la corriente en el terreno, la cual está relacionada directamente con la posición que toman los electrodos A y B en superficie (Auge, 2008).

La influencia más grande al factor de resistividad aparente está dada por las rocas que se encuentran en el medio donde se distribuye la corriente. En forma general si se aumenta la distancia entre los electrodos A y B se va a tener una mayor profundidad de penetración de la corriente en el terreno.

Según Iakubovskii y Liajov (1980), la observación de campo se presenta por medio de curvas que relacionan la resistencia aparente con la distancia entre las tomas de tierra de emisión, teniendo en cuenta los diferentes tipos de sondeos eléctricos se tiene cuatro clases de estos: el sondeo

tetraédrico con dispositivo simétrico, sondeo tri-electródico con dispositivos, sondeo bielectródico y el sondeo dipolar.

Según Iakubovskii y Liajov (1980), la relación entre la resistividad y la distancia entre las tomas de tierra A y B, para los diversos cortes geoelectricos, es muy compleja. El cálculo teórico de esta relación está basado en el cálculo del campo de una fuente puntual de corriente en un medio heterogéneo. Actualmente se dispone de tales cálculos solo para cortes geoelectricos sencillos. La teoría del método, así como su utilización, se ha desarrollado especialmente para cortes de capas horizontales que se encuentran sobre todo en condiciones de plataforma, en área de desarrollo de rocas de la cobertura sedimentaria.

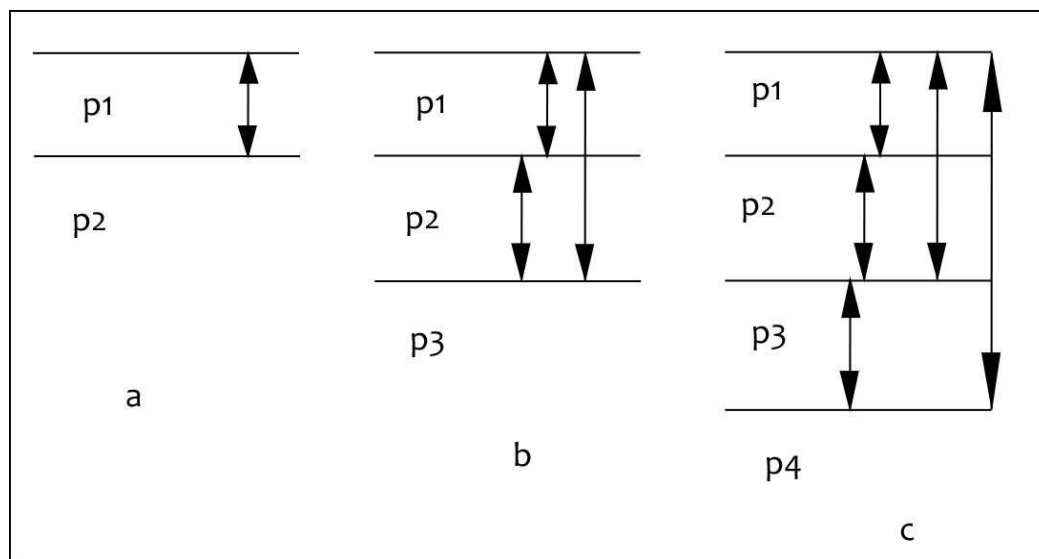


Figura 11. Cortes geoelectricos, modelo de dos capas (a), tres capas (b) y cuatro capas (c). Tomado de Iakubovskii y Liajov (1980).

Para una mejor comprensión de los modelos dados para la representación de las capas horizontales que existen en los cortes, se relaciona las resistividades con sus espesores como puede ser observado en la Figura 10, donde se tienen cortes geoelectricos en modelos de dos, tres, cuatro y más capas (conformadas por rocas o depósitos diferentes dispuestos en el subsuelo).

El corte de dos capas (Figura 11a) se caracteriza por los siguientes parámetros: h_1 de la primera capa, la resistividad (ρ_1) y la resistividad del medio de espesor ilimitado (ρ_2); el corte de tres capas, Figura 11b, presenta cinco parámetros representativos: h_1 , h_2 , ρ_1 , ρ_2 , y ρ_3 ; el de cuatro capas, Figura 11c, presenta siete parámetros: h_1 , h_2 , h_3 , ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 y ρ_4 (Iakubovskii y Liajov, 1980).

Por medio de estos parámetros se facilitará la interpretación de las líneas procesadas con el software IPI2WIN el cual posee una interfaz sencilla y bastante entendible de manejar. Este software se presenta de forma libre para manejo académico, permitiendo la inversión de los datos dando como resultado la resistividad real del material en el subsuelo.

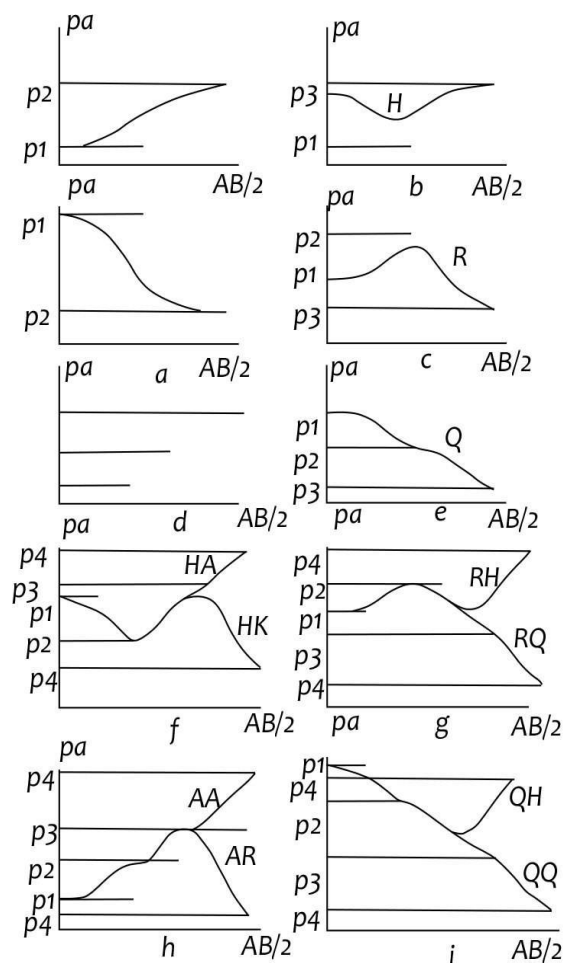


Figura 12. Curvas de SEV's, tomado de: Iakubovskii y Liajov (1980).

La TRE o tomografía eléctrica de resistividades se basa en la constitución de un perfil continuo de resistividades del subsuelo, el cual nos permite observar una imagen en dos dimensiones de resistencias aparentes que después de un procesamiento de datos (inversión de resistividades) (EARTHIMAGER, 2009), permite la determinación de la profundidad, espesor y presencia de agua subterráneas en las capas geológicas.

La toma de datos se realiza bajo los mismos arreglos utilizados para la toma de datos en una dimensión a partir de SEV's (Wenner, Schlumberger, Dipolo-dipolo, polo-polo y sus variaciones), por medio de un software se realiza la inversión de las resistividades aparentes.

Para este proyecto de investigación se utilizará el software EARTHIMAGER

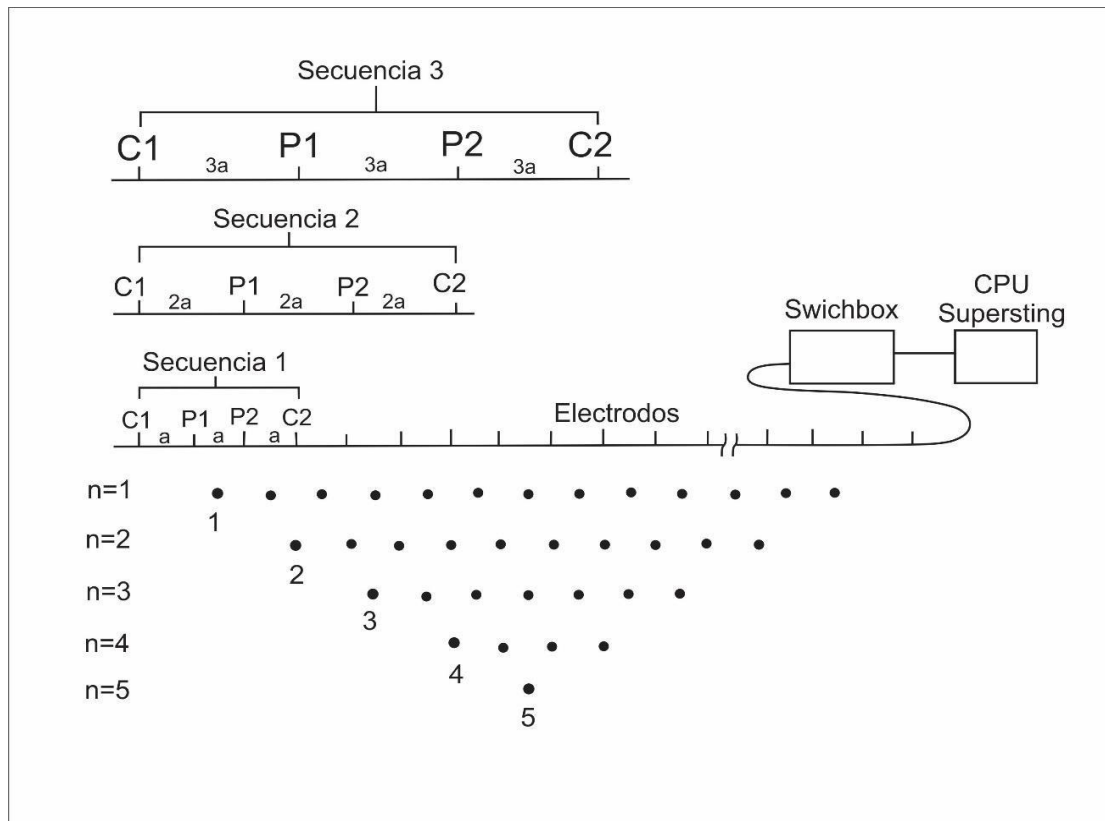


Figura 13. Modelo de toma de datos de tomografía eléctrica de resistividades.

Este tipo de modelos dan una visualización de los cambios tanto en la vertical como en la horizontal del subsuelo, la visualización de los datos se presenta en una geometría de cuña como se puede observar en la Figura 13.

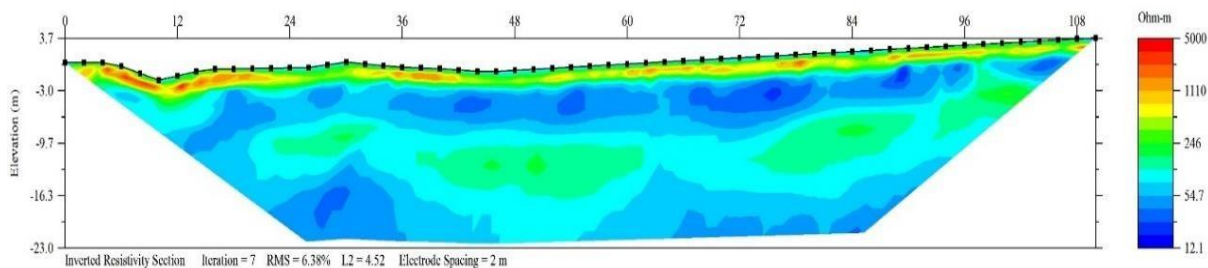


Figura 14. Tomografía eléctrica de resistividades después del proceso de inversión, la cual presenta una disposición en dos dimensiones de las resistividades reales del subsuelo estudiado.

5. Marco Geológico

Colombia se divide en tres principales zonas divididas por suturas, la primera zona se caracteriza por tener las rocas más antiguas (pre cámbrico) es llamado el Escudo Guayanés, el cual toma parte en Venezuela, Brasil, Guyanas, Surinam, Guayanas francesas y una pequeña parte en Colombia ubicada al sur-este del país, la segunda zona que forma parte de la base de la Cordillera Central y Oriental, ubicadas en el centro del país dominado por rocas metamórficas del Precámbrico-Paleozoico y la tercera zona caracterizada por acreciones oceánicas y fragmentos de subducción que forman el basamento de la Cordillera Occidental (Cooper et al, 1995).

Según Cooper 1995, la Cordillera Oriental Colombiana se describe como un cinturón orogénico bivergente el cual limita al oeste por el sistema de fallas Salinas y al Este por la falla Guaicáramo; está conformada por rocas metamórficas del Precámbrico-Paleozoico (Cooper et al. 1995, Gómez et al. 2005), presenta unidades con una complejidad estructural alta (fallamiento y plegamiento) al

oeste con vergencia al oriente yuxtapuesto con rocas de menor deformación de la cuenca de antepaís de los Llanos Orientales (Bayona et al, 2007).

El levantamiento de la Cordillera Oriental Colombiana da sus inicios desde el Eoceno medio-temprano, presentando desde ese momento varios pulsos de deformación, tomando su punto de mayor actividad en el Mioceno medio (Caballero et al, 2010).

A finales del Berriasiano, comienzos del Valanginiano se presenta la transgresión marina que marca la discordancia entre los depósitos del Jurásico Superior y la Formación Río Negro, este período de transgresión continúa hasta el Aptiano Superior con la deposición de la Formación Tibú-Mercedes; en el Aptiano–Albiano Inferior, se observa un cambio progresivo en el régimen de sedimentación, dando paso a la deposición de las calizas y margas de la Formación Mercedes, posteriormente se presenta una variación en las condiciones de tranquilidad, aportando material terrígeno a la cuenca (niveles arenosos de la Formación Mercedes). En el Albiano Superior se presenta el cese de las condiciones de tranquilidad y agitación. Se produce levantamiento en las áreas de aporte a la cuenca reflejadas en las acumulaciones de arenas y arcillas de la Formación Aguardiente (EOT, 2015).

La zona de estudio se encuentra ubicada en la Cordillera Oriental tomando parte del macizo de Santander en su zona oriental, las formaciones sedimentarias presentes están dadas con la nomenclatura de la cuenca de Maracaibo en Venezuela o cuenca de Catatumbo en Colombia, de edad Cretácica. Teniendo en cuenta la configuración dada para la cuenca Cretácica Colombiana se tiene un ambiente que va desde marino somero a continental (Vargas et al, 1981; Cooper et al, 1995).

6. Geología Estructural

El municipio de Málaga se encuentra ubicado en el extremo oriental del Macizo de Santander.

Según el EOT del 2003 y la memoria explicativa de la plancha geológica nacional número 136 (cuadrángulo San Gil-Málaga), su geología estructural se relaciona con la falla principal ubicada en el extremo oriental de la cabecera municipal asociada al río Servitá por lo cual lleva su nombre, dispuesta en sentido N-S. Asociadas a ésta se encuentran cinco fracturas perpendiculares de tipo inversa y tres dispuestas paralelas de régimen normal.

La falla del río Servita se caracteriza por limitar el Macizo de Santander y la franja sedimentaria del borde oriental del macizo, en el municipio de Málaga se ponen en contacto rocas de edades Cretácicas con Terciarias, causando inversión en estas rocas; la falla “El Término” es de régimen inverso con dirección N-E y se dispone de forma perpendicular con la falla del río Servitá, su plano de falla sigue el valle encajonado de la Quebrada El Término; la falla “Calichal” toma una dirección E-W, de régimen inverso de bajo ángulo; la falla Buenavista de régimen inverso, bajo ángulo en dirección E-W, es intersectada por las fallas El Alto y Málaga; la falla Agua Blanca con dirección N-E, su plano sigue el curso de la Quebrada Agua Blanca hasta encontrarse con la falla del río Servitá; la falla Guásimo, presenta una dirección N-E, intersectada con la falla del río Servitá; la falla de Málaga con una dirección NS paralela a la falla del río Servita, de régimen normal, separa el flanco abrupto del sinclinal de Málaga de su núcleo, es posterior a las fallas transversales de tipo inverso; y la falla El Alto, la cual se caracteriza por un régimen normal de dirección N-S paralela a la falla del río Servitá donde el plano de falla se encuentra por encima de los 3.000 m.s.n.m. y el bloque oriental de esta se encuentra hundido (EOT, 2003).

El anticlinal de Pantano Grande es observable en el Oeste de Málaga, su flanco oriental sirve de flanco Oeste del sinclinal de Málaga. El núcleo del anticlinal está constituido por rocas de edad Jurásica de la Formación Girón (EOT, 2003).

El sinclinal de Málaga se describe como una estructura simétrica que cierra al sur de San José de Miranda, cortado transversalmente por la falla del río Servita y donde su núcleo está constituido por la Formación Tibú-Mercedes, el flanco Oeste se encuentra afectado por la falla de Málaga y genera que este flanco sea abrupto y no presente límite tectónico neto con el flanco oriental del anticlinal (EOT, 2003). El municipio de Málaga se encuentra ubicado sobre esta estructura la cual presenta una orientación N-S (Portilla, 1999).

A continuación, se presentan dos cortes geológicos realizados a partir de la plancha 136 con escala 1:100.000, donde se presenta la litología y estructuras geológicas presentes en la zona.

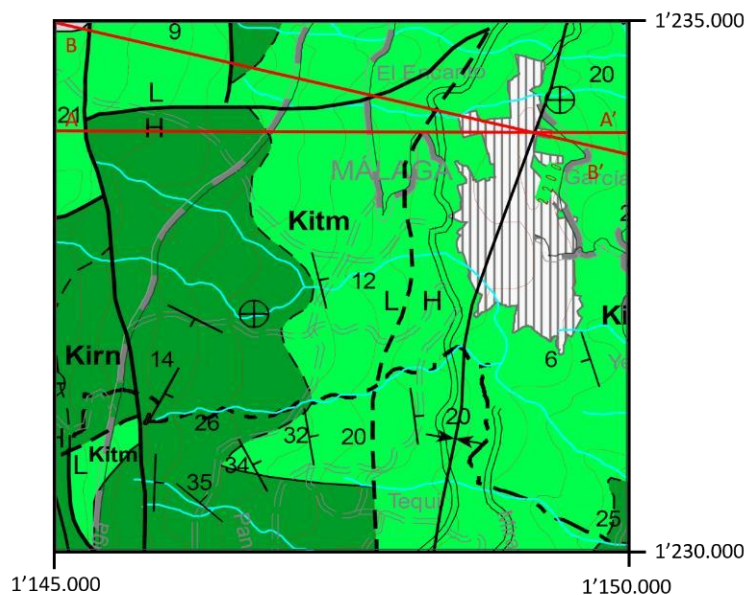


figura 15. localización de los perfiles geológicos. adaptado de: plancha 136 de Málaga-Santander.

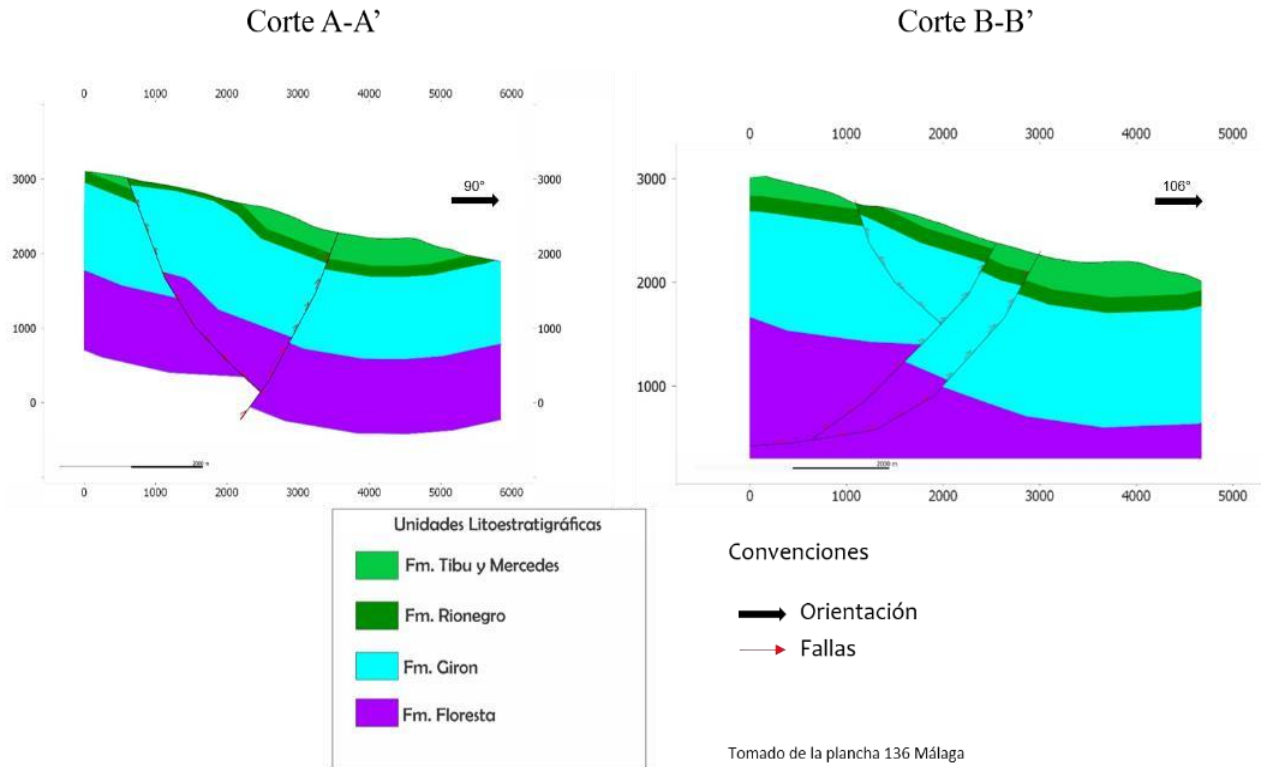


figura 16. cortes geológicos, se observa el sinclinal de Málaga.

7. Metodología

7.1. Etapa 1. Pre Campo

7.1.1. Selección de la Zona de Campo:

El municipio de Málaga se encuentra bajo el sinclinal que lleva su nombre, este sinclinal se encuentra constituido por parte de la secuencia Cretácica sedimentaria de la cuenca de Catatumbo, el alto fracturamiento de esta zona sugiere un posible potencial por porosidad secundaria; además el municipio posee una baja densidad de información geológica, geoelectrica e hidrogeológica. Por estas razones la zona de estudio se localiza en este municipio.

7.1.2. Búsqueda de información

Se realizó la recolección de información necesaria como artículos de revistas reconocidas en el área de geociencias, física, geofísica, etc.; información de la zona de trabajo como mapas, cartas geológicas, plan de ordenamiento territorial, libros, proyectos, etc. y de temas como la geoelectrónica para estudios de aguas subterráneas, hidrogeología o estudio de aguas subterráneas y la geología del municipio de Málaga-Santander.

7.1.3. Selección de equipos

La geoelectrónica nos permite conocer la resistividad del subsuelo, propiedad que depende de las variables como: el material (geología), porosidad de este, líquidos y gases que rellenan esta porosidad, entre otras, presentadas en el marco teórico de este proyecto, siendo esta resistividad una propiedad importante para conocer la posible existencia de agua subterránea en la zona, aclarando que estos métodos son secundarios o indirectos. La adquisición de los datos se realiza por medio de equipos especializados para medir esta propiedad, el resultado que arroja puede ser un perfil de tres, dos o una dimensión según el método.

La adquisición de los datos se realizó por medio de la tomografía de resistividades eléctrica (TRE) y sondeos eléctricos verticales (SEV's), la TRE muestra los datos como un perfil en dos dimensiones donde el eje vertical se encuentra dado por la profundidad y esta depende del espaciamiento entre electrodos y la configuración geométrica utilizada donde su eje horizontal está dado por la longitud en superficie y la variación de los colores representan las diferentes resistividades presentes en el perfil. El equipo utilizado para esto es el AGI Supersting R8.

Los SEV's se realizaron como complemento a las TRE para tener una mayor densidad de datos en la zona de estudio. El equipo utilizado para la toma de datos es el TERRAMETER ABEM SAS 1000.

7.1.4. Selección de arreglo geométrico para la toma de datos

Para la tomografía de resistividades eléctricas se utilizó el arreglo Wenner-Schlumberger, por su excelente resolución y profundidad de investigación, además de obtener una mayor densidad de datos con este método. Para los sondeos eléctricos verticales se utilizó el arreglo Schlumberger.

7.2. Etapa 2. Campo

La jornada de campo se realizó en tres etapas diferentes:

7.2.1. Etapa de reconocimiento

Se realizó el reconocimiento de la zona de campo, donde se ubicaron las zonas de adquisición de datos geoelectricos y el acceso de carreteras para adquisición de datos geológicos.

7.2.2. Etapa de adquisición de datos geoelectricos

Se realizó la adquisición de tres tomografías de resistividades eléctricas y cuatro sondeos eléctricos verticales.

7.2.3. Etapa de reconocimiento geológico

Se realizó un barrido de información geológica a los alrededores de la adquisición de datos geoelectricas para tener una herramienta para realizar la correlación entre el modelo geológico y geoelectrico.

7.3. Etapa 3. Etapa de Oficina

7.3.1. Procesamiento

El procesamiento de los datos geoelectricos se dividirá en datos de dos dimensiones (TRE) y unidimensionales (SEV's). El software EARTHIMAGER 2D se utilizó para el procesamiento de tomografías de resistividades eléctricas, los datos adquiridos en campo tienen extensión *.stg* compatible con el software a utilizar. Para los SEV's se utilizó el software libre IPI2WIN.

7.3.2. Interpretación

El reconocimiento geológico realizado en la etapa de campo es complementado con la información geoelectrica adquirida para así presentar buenos resultados en las interpretaciones.

8. Resultados

8.1. Geoelectrica

El área de la Sede UIS Málaga es de aproximadamente de 5 hectáreas incluyendo los lotes recién adquiridos por la UIS para la ampliación de la Sede, La campaña de geoelectrica consta de tres tomografías eléctricas de resistividades (TRE) y cuatro sondeos eléctricos verticales (SEV's).

Las tomografías eléctricas fueron tomadas con el equipo SUPERSTING R8, WIFI, el cual pertenece al grupo de investigación GEOMATICA de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander. Este equipo permite tomar datos de resistividad eléctrica, polarización inducida, resistencia, SP, y voltaje de la batería; el software utilizado para el procesamiento de estos datos fue el Earthimager 2D de la empresa AGI, perteneciente al grupo de investigación de la escuela de ingeniería civil Geomatica.

Los sondeos eléctricos fueron adquiridos con el equipo TERRAMETER SAS 1000 de la empresa ABEM, perteneciente a la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander. Los datos arrojados fueron procesados en el software Ipi2win.

A continuación, se presenta la disposición en planta de la geoelectrónica realizada en la zona:

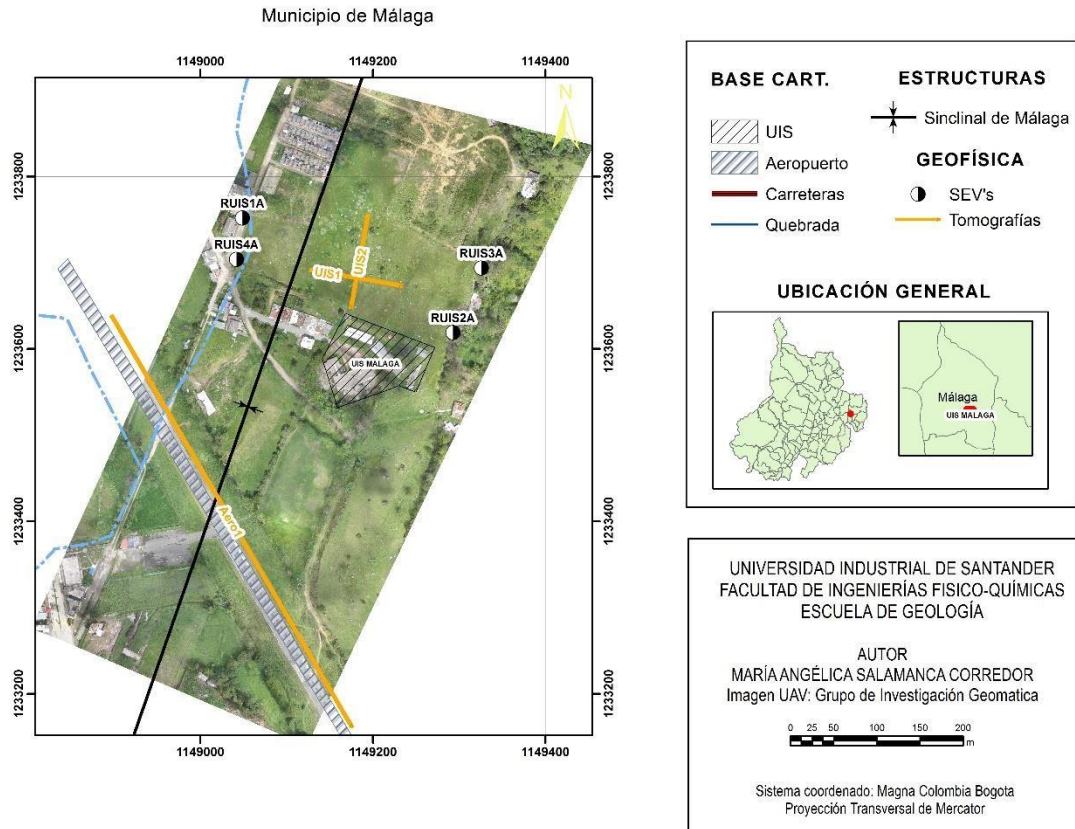


Figura 17. Ubicación tomografías eléctricas de resistividades y sondeos eléctricos verticales para la zona de estudio.

8.1.1. Sondeos eléctricos verticales (SEV's)

El método permite observar cambios unidimensionales verticales del subsuelo, es el método más sencillo y económico del mercado.

8.1.1.1. Adquisición

La adquisición de datos se realizó el día 13 de febrero de 2017 (ver Figura 16), en las instalaciones de la Sede Málaga de la Universidad Industrial de Santander, con la configuración geométrica Schlumberger, el equipo utilizado, TERRAMETER SAS 1000, está conformado por:

- CPU u aparato de control el cual contiene cuatro puertos dos de corriente y dos de potencial
- Dos carretes para potencial
- Dos carretes para corriente, mayor longitud.
- Dos cables adaptadores para corriente, conectados de a CPU al carrete • Dos cables adaptadores para potencial conectados de la CPU al Carrete
- Cuatro estacas de metal conductoras de corriente.
- Cuatro cocodrile clip, para conectar los carretes con las estacas • Una batería 12V



Figura 18. Adquisición de datos en las instalaciones de la sede Málaga.

La toma de datos fue realizada por medio del arreglo geométrico Schlumberger, siendo un total de cuatro SEV's distribuidos en el terreno como se observa en la Figura 15.



Figura 19. Adquisición y puesta de arreglo geométrico Schlumberger.

8.1.1.2. *Procesamiento*

Para el procesamiento de los datos se utilizó el software IPI2win versión libre y descargable en la siguiente dirección electrónica: <http://geophys.geol.msu.ru/ipi2win.htm>. Este software nos permite hacer la conversión de resistividades aparentes a resistividades reales adquiridas en el equipo *TERRAMETER SAS 1000* y nos permite ver los cambios verticales de las resistividades aparentes donde el equipo toma un promedio de cuatro datos adquiridos en cada toma.

8.1.1.3. *Interpretación*

Para la interpretación de los datos se muestra el resultado de las resistividades reales procesadas en el software IPI2WIN.

RUIS1A

Este SEV fue adquirido en la carretera que va de la molinera hacia el aeropuerto municipal de Málaga, en las coordenadas E: 1'149.049; N: 1'233.752; Z: 2.204.

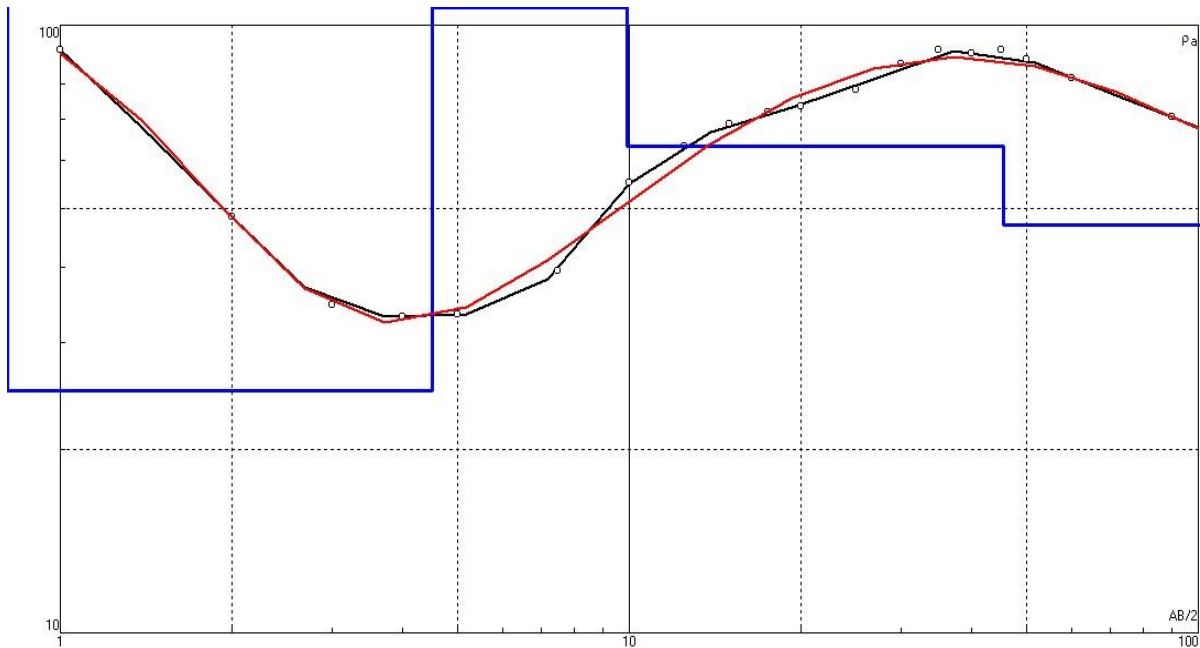


Figura 20. Curva teórica y de campo, procesada en el software IPI2WIN RUIS1A.

La Figura 20 muestra el corte geoelectrico asociado a este punto con un error de 3.4%, presentando una diferenciación de cinco capas indicadas en la Tabla 5, donde se puede observar la resistividad de la posible litología en el terreno. La litología obtenida se correlaciona con la formación Tibú-Mercedes; el deposito aluvial puede estar relacionado a la quebrada El Molino, la cual se encuentra ubicada cerca de esta zona y un estudio realizado por el grupo de investigación la escuela de ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander en el año 2017 asocia esta zona a depósitos aluviales.

Tabla 5.

Correlación hidrogeológica del corte geoelectrico RUISIA

Nº de capas	Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Correlación Hidrogeológica
I	119	0.674	0.674	Suelo seco
II	25	3.83	4.5	Deposito coluvial húmedo
II	326	5.41	9.91	Deposito aluvial seco, posiblemente con menor porosidad en este sector.
IV	63.1	35.6	45.5	Deposito aluvial saturado
III	47	-	-	Caliza fracturada biomicritica saturada, perteneciente a la parte superior de la formación Tibu-Mercedes.

RUIS2A

Este SEV fue adquirido en el camino que va desde el aeropuerto hasta la parte superior de la Sede Málaga de la UIS, en las coordenadas E: 1'149.293; N: 1'233.619; Z: 2.224.

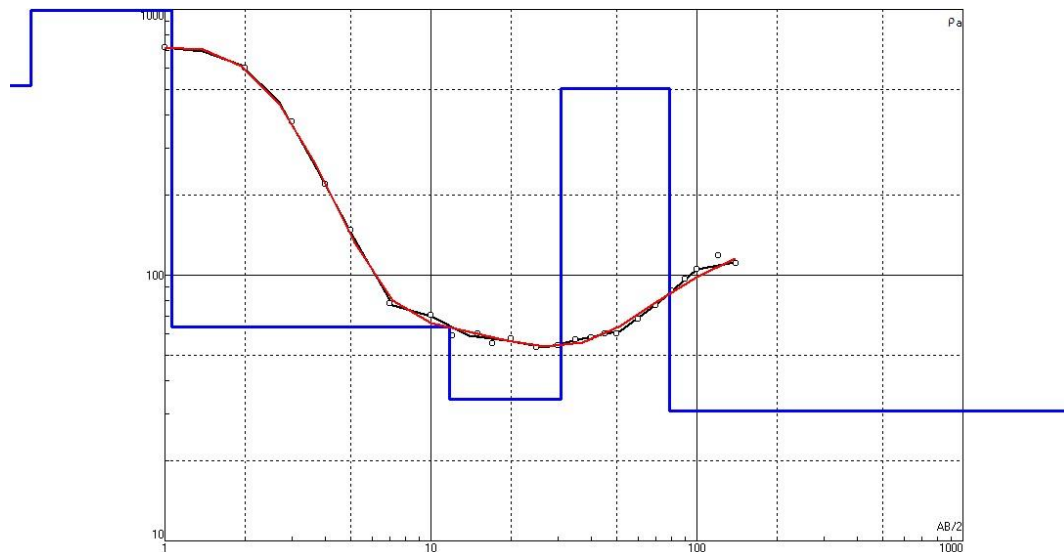


Figura 21. Curva teórica y de campo, procesado en IPI2WIN RUIS2A.

La Figura 21 muestra el corte geoelectrico asociado a este punto con un error de 3.27%, en la cual se evidencian seis capas indicadas en la Tabla 6, donde se puede observar la resistividad a la

posible litología en el terreno. Esta litología se correlaciona con la formación TibúMercedes y lo suelos se relacionan a suelos residuales de esta misma formación.

Tabla 6.

Correlación Hidrogeológica del corte geoelectrico RUIS2A

N° de capas	Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Correlación Hidrogeológica
I	515	0.314	0.314	Suelo seco
I	1177	0.749	1.06	Suelo seco
II	63.7	10.7	11.8	Deposito Coluvial húmedo
III	34.2	19.1	30.9	Caliza fracturada biomicritica saturada, perteneciente a la formación tibu-mercedes
III	505	48.1	79	Caliza micritica húmeda, perteneciente a la formación Tibu-Mercedes
III	30.8	-	-	Caliza altamente fracturada saturada perteneciente a la formación Tibu-Mercedes.

RUIS3A

Este SEV fue adquirido en el camino que va desde el aeropuerto hasta la parte superior de la Sede Málaga de la UIS, en las coordenadas E: 1'149.326; N: 1'233.692; Z: 2.226.

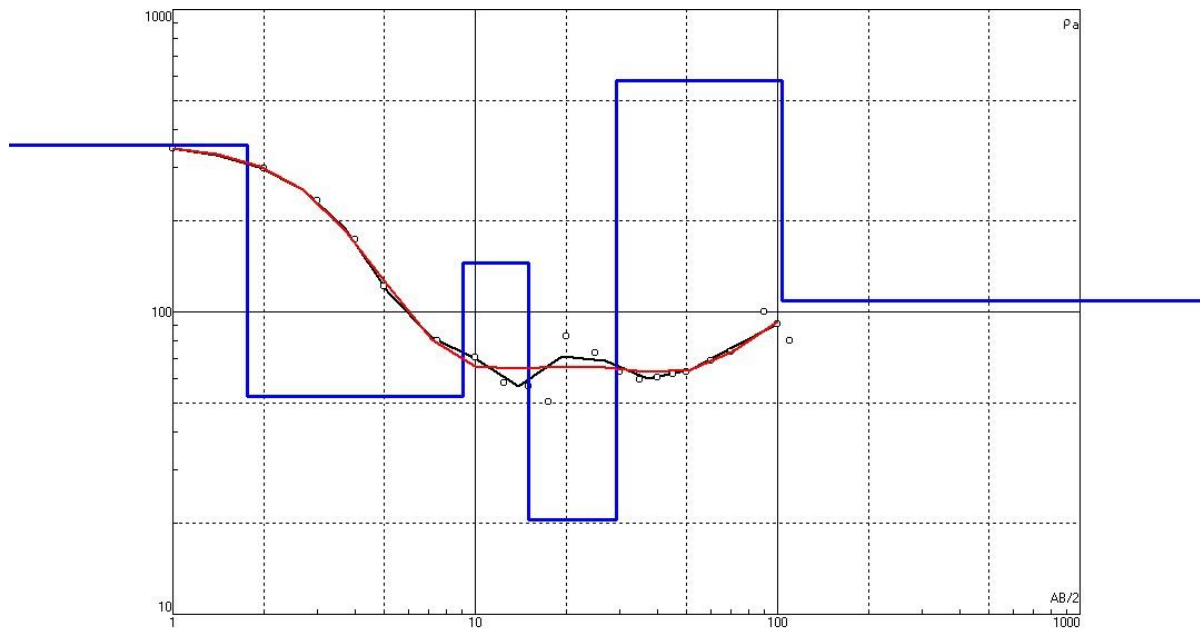


Figura 22. Curva de campo y teorica, procesada en el software IPI2WIN. RUIS3A.

La Figura 22 muestra el corte geoelectrico asociado a este punto con un error de 4.49%, esta evidencia una diferenciación de seis capas presentadas en Tabla 7, donde se puede observar la resistividad a la posible litología en el terreno. Esta litología es correlacionable con la formación Tibú-Mercedes, lo suelos se relacionan a suelos residuales de esta misma formación, el depósito aluvial puede estar asociado a la quebrada El Molino, la cual se encuentra ubicada cerca de esta zona y un estudio realizado por el grupo de investigación Geomática en el año 2017 asocia este sitio a depósitos aluviales. Se relaciona en superficie con el SEV RUIS2A.

Tabla 7.

Correlación hidrogeológica del corte geoelectrico RUIS3A

Nº de capas	Resistividad	Espesor	Profundidad	Correlación Hidrogeológica
I	356	0.314	0.314	Suelo seco
II	52.6	0.749	1.06	Suelo húmedo
II	145	10.7	11.8	Deposito Coluvial húmedo
III	20.5	19.1	30.9	Caliza fracturada biomicritica saturada perteneciente a la formación Tibú-Mercedes
III	583	48.1	79	Caliza micritica húmeda, perteneciente a la formación Tibú-Mercedes.
III	109	-	-	Caliza altamente fracturada, saturada.

RUIS4A

Este SEV fue adquirido en la carretera que va de la molinera hacia el aeropuerto municipal de Málaga, en las coordenadas E: 1'149.042; N: 1'233.709; Z: 2.206.

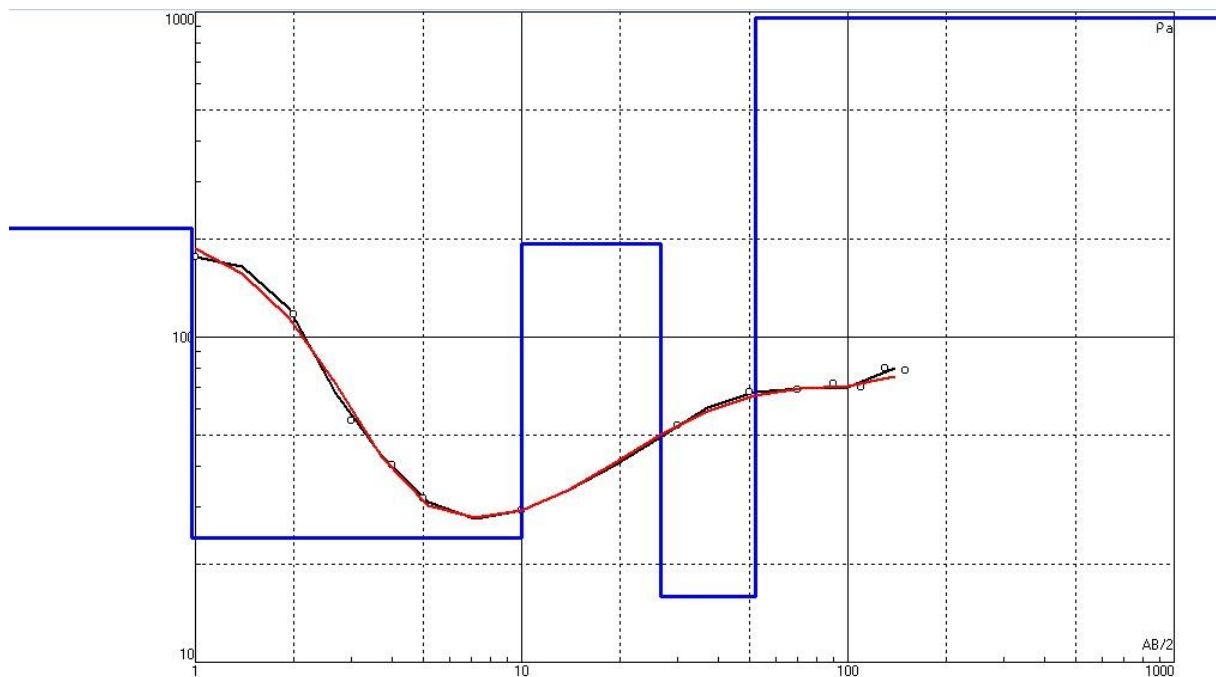


Figura 23. Curva de campo y teórica, procesada en el software IPI2WIN. RUIS4A.

La grafica mostrada en la Figura 23 presenta el corte geoelectrico asociado a este punto con un error de 3.58%, en esta se observa una diferenciación de seis capas indicadas en Tabla 7, donde se puede observar la resistividad a la posible litología en el terreno. La litología resultante se asocia con la formación Tibú-Mercedes, lo suelos se asocian a suelos residuales de esta misma formación, se asocia en superficie con el SEV RUIS1A.

Tabla 8.

Correlación hidrogeológica del corte geoelectrico RUIS4A

Nº de capas	Resistividad	Espesor	Profundidad	Correlación Hidrogeológica
I	216	0.976	0.976	Suelo seco
II	24.1	9.06	10	Deposito Coluvial húmedo
II	193	16.7	26.7	Deposito coluvial con bloques de la formación Tibú-Mercedes.
IV	15.9	25.4	52.1	Deposito aluvial saturada
III	960	-	-	Caliza micritica húmeda perteneciente a la formación tibu-mercedes.

8.1.2. Tomografía eléctrica de resistividades (TRE)

Este método permite la mejor visualización de datos de resistividades, espacializando en dos dimensiones.

8.1.2.1. Adquisición

La adquisición de datos de tomografía de resistividad eléctrica se realizó por medio del equipo

Supersting R8.



Figura 24. Equipo de campo realizando labores de toma de datos por medio del equipo Supersting R8.

El equipo se compone de:

- una CPU, donde se calibra la toma de datos, allí se ingresará el tipo de arreglo a utilizar, que en este caso es Wenner-Schlumberger debido a su buena resolución en la horizontal y su alcance en profundidad del terreno. También se agrega el nombre del proyecto, número de electrodos a utilizar y algunas configuraciones internas del equipo.

- Posee ocho cables cada uno con siete electrodos y una longitud aproximada de 70 m, se pueden observar en la Figura 25.



Figura 25. Cableado utilizado por el equipo supersting R8.

- 56 pines conductores conectados a los electrodos.



Figura 26. Pines conductores conectados a sus respectivos electrodos.

- Una swich box la cual conecta la CPU con los electrodos.



Figura 27. Swichbox del equipo.

- Y una batería 12V para el funcionamiento del equipo, en la Figura 28, se puede observar la batería, el equipo conectado a esta y en funcionamiento.



Figura 28. Batería, CPU y Swichbox del equipo.

8.1.2.2. *Procesamiento de datos*

El procesamiento de los datos se realizó por medio del software *EARTHIMAGER 2D* con el método de inversión *ROBUST INVERSION* y modelado por medio del método de elementos finitos.

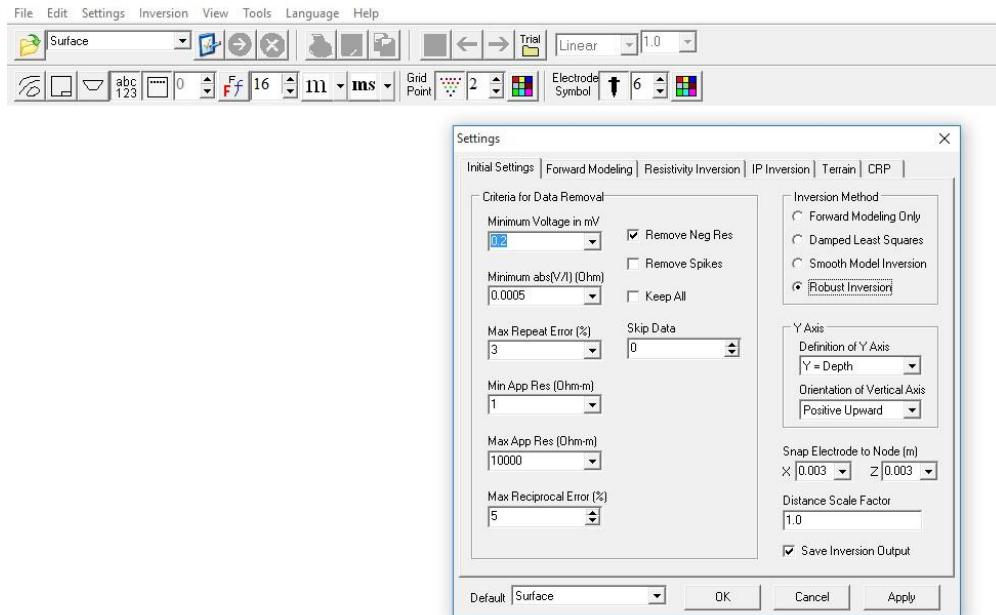


Figura 29. Datos del procesamiento de datos, Fuente: Software EarthImager.

Las resistividades aparentes tomadas en campo corresponden a los datos de entrada a este software, el cual inventa un perfil de resistividades reales, que parte de una resistividad uniforme (Figura 30); dicho perfil de resistividades reales genera unas resistividades aparentes calculadas que es comparado con las resistividades aparentes medidas en campo; para llegar al resultado final el sistema repite este proceso iterando hasta que la diferencia de la resistividad aparente medida y la resistividad aparente calculada llegue a su mínima expresión previamente definida (Figura 31).

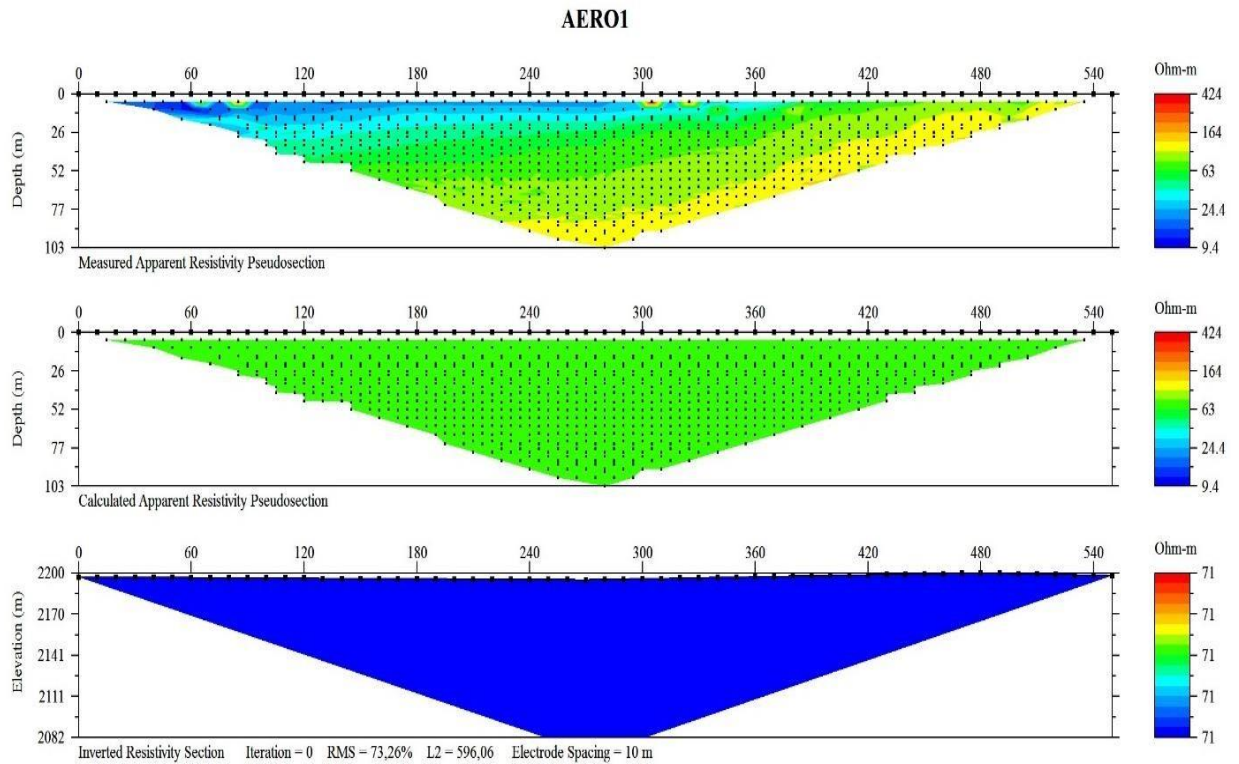


Figura 30. A) Perfil de resistividad aparente medido; B) Perfil de resistividad aparente calculada y C) Perfil de resistividades reales; Iteración Cero.

La interpretación de los datos se realiza por medio de las resistividades reales finales obtenidas una vez concluido el procesamiento, como ejemplo se tiene a continuación la tomografía llamada AERO1, realizada junto a las demás tomografías de este estudio en el municipio de Málaga, Santander por el equipo de campo conformado por un grupo de estudiantes de Geología, con el acompañamiento del director del proyecto de grado.

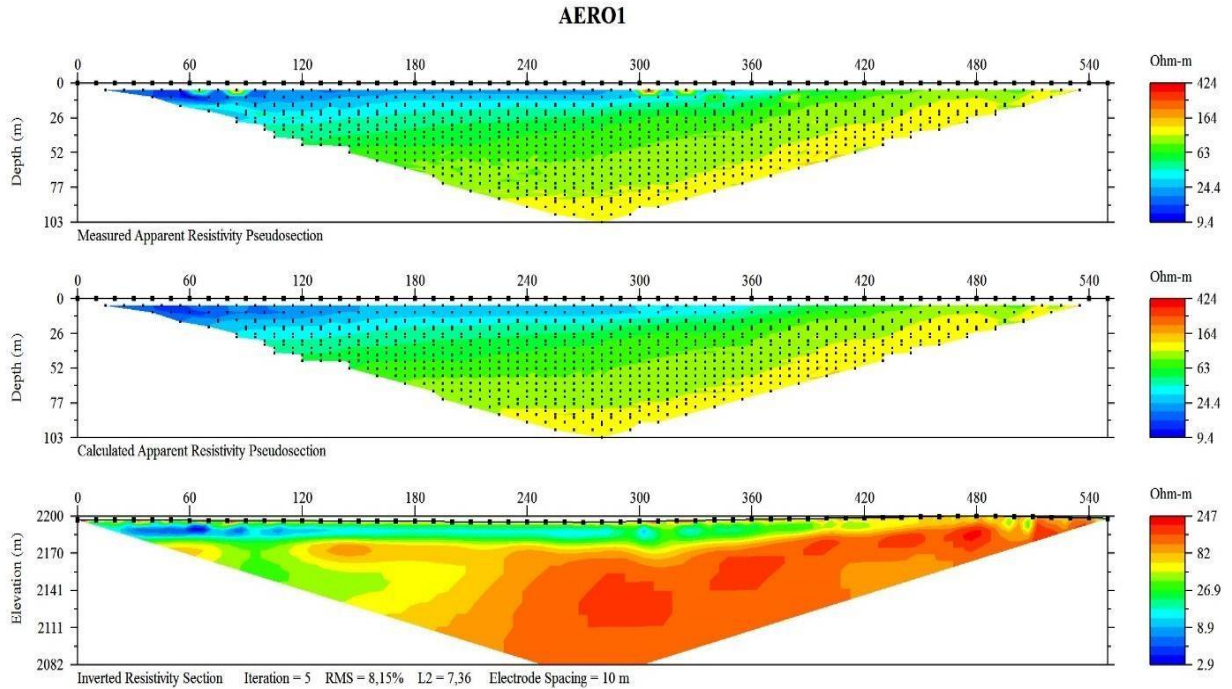


Figura 31. A) Perfil de resistividades aparentes medidas; B) Perfil de resistividades aparentes calculadas y C) Perfil de resistividades reales; ultima iteración (No 5) calculada por el sistema.

El sistema detiene el proceso de iteración en el momento en que el error o la diferencia entre el perfil de resistividades aparentes medidas y el perfil de las calculadas es depreciable como se observa en la Figura 32, o menor al pre definido antes de iniciar el procesamiento.

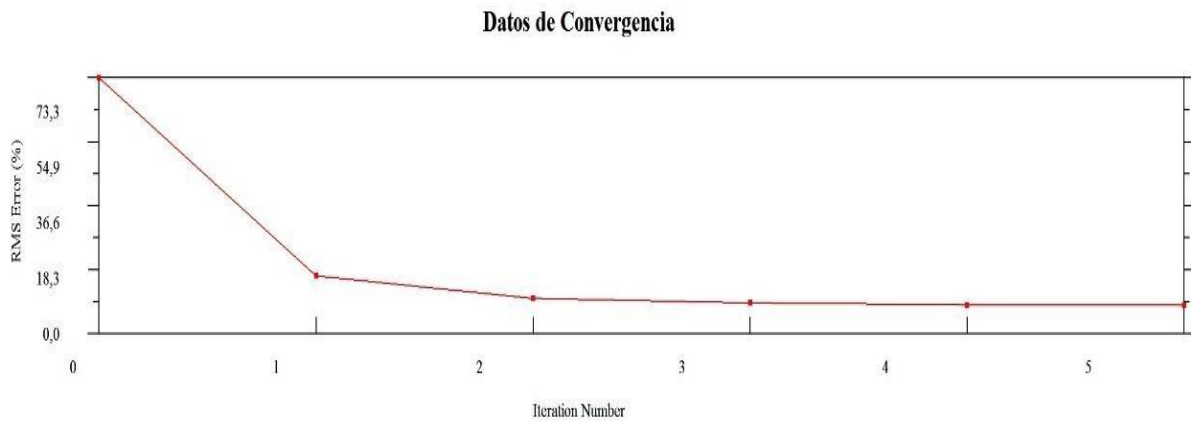


Figura 32. relación entre el error y el número de iteraciones realizadas.

El desfase entre los datos de resistividad aparente medida y calculada puede observarse en el software, en la opción *Data Misfit Crossplot* (Figura 33)

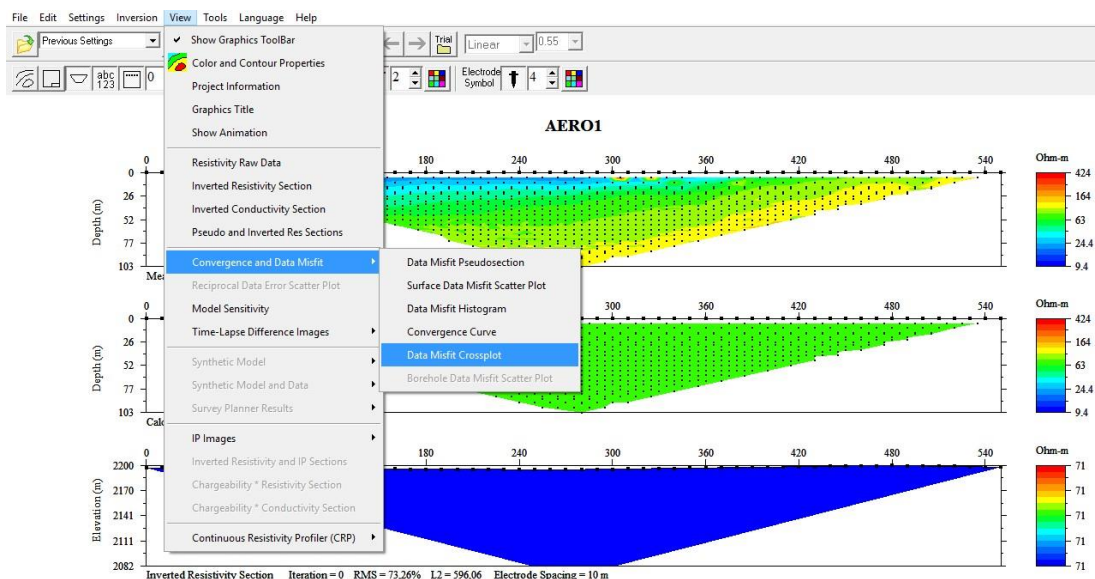


Figura 33. ubicación en el software de la comparación entre los datos aparentes medidos y calculados.

En la Figura 34, se observa la gráfica de resistividades medidas contra calculadas en esta se puede observar el comportamiento de estas dos variables donde la tendencia ideal de esta relación es lineal, las anomalías de datos observadas en los datos dispersos, representan el error mostrado en el procesamiento de las tomografías eléctricas.

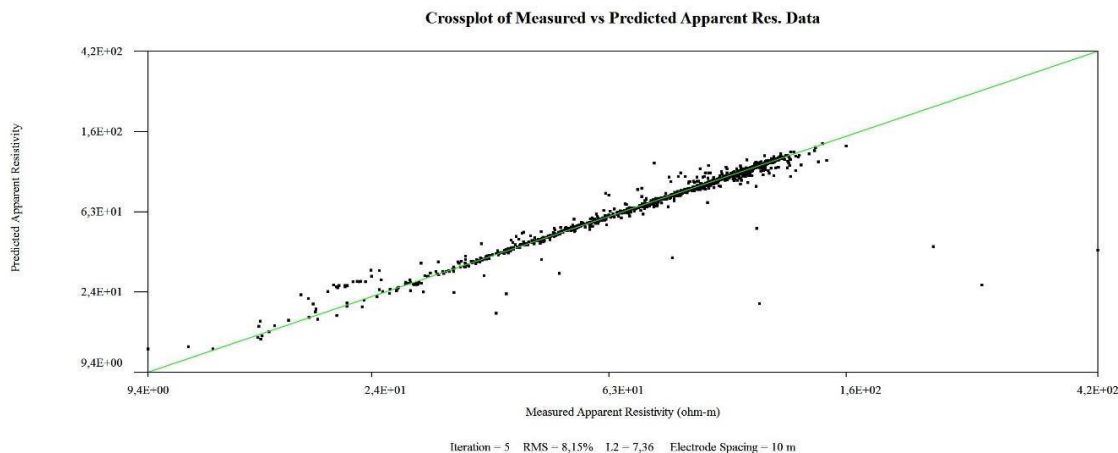


Figura 34. grafica de resistividades medidas contra resistividades calculadas.

8.1.2.3. Interpretación de Datos

AERO 1

Esta tomografía fue ubicada en el borde Norte de la pista aérea de Málaga, se realizó el tendido de todo el cableado del equipo, por tanto, la línea en planta presenta una longitud de 550 m y una profundidad estimada de 110 m.

El aeropuerto Jerónimo de Aguayo de Málaga según la cartografía 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano (SGC) se encuentra perpendicular al eje axial del sinclinal de Málaga. La localización de la tomografía de resistividad eléctrica AERO1 se presenta en la Tabla 9 en coordenadas MAGNA Colombia, su ubicación en planta puede observarse en la Figura 17.

Tabla 9.

Localización tomografía de resistividad eléctrica AERO1.

AERO1	X	Y
Inicio	1'148.896	1'233.639
Fin	1'149.171	1'233.166

Para la interpretación se utiliza la sección de resistividades reales, ya que la geoelectrica se presenta como un método de exploración indirecta solo dará una aproximación del subsuelo por esta razón la información debe ser complementada con geología de campo.

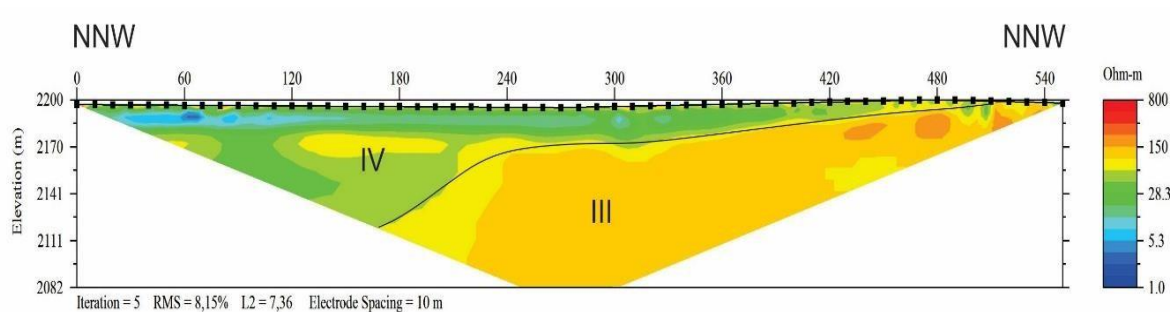


Figura 35. Sección de resistividades reales interpretada. AERO1

A continuación, se presenta la relación entre las características geoelectricas realizada y la geología de la zona a partir de geología de campo, el mapa geológico del EOT 2015 y de la plancha 136 de Málaga-Santander a escala 1:100.000

Tabla 10.

Unidades geoelectricas.

Unidad	Resistividad (ohm*m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Correlación Hidrogeológica
IV	6-65	14 a 60 m	0-14 a 60m	Se estima alta porosidad del material, alto contenido de agua pero baja permeabilidad, posiblemente material fino, lodoso a ese sector está asociado a posibles depósitos de origen aluvial, en la zona norte se encuentra un espesor mayo de esta capa.
III	99-228.5	104	14 a 60-118	Calizas arenosas, con porosidad secundaria, altamente fracturadas, pertenecientes al miembro superior de la formación Tibú-Mercedes, con posible vocación acuifera (nivel freático), núcleo del sinclinal de Málaga.

UIS1

La tomografía de resistividad eléctrica ubicada en los predios adquiridos por la sede Málaga de la Universidad Industrial de Santander en dirección Oeste-Este, la línea tiene una longitud de 110 m, por lo tanto, su profundidad fue de aproximadamente 20m.

Tabla 11.

Localización tomografía de resistividad eléctrica UIS1.

UIS1	X	Y
Inicio	1°149.126	1°233.692
Fin	1°149.232	1°233.675

PERFIL DE RESISTIVIDADES REALES

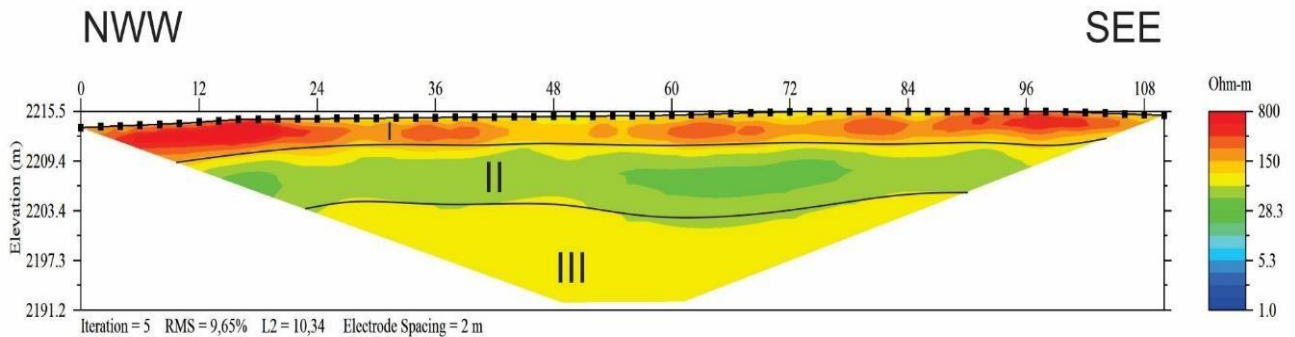


Figura 36. Sección de resistividad real.

A continuación, se presenta la relación entre las características geoelectricas realizada y la geología de la zona a partir de geología de campo, el mapa geológico de la EOT 2015 y de la plancha 136 de Málaga-Santander a escala 1:100.000.

Tabla 12.

Unidades geoeléctricas.

Unidad Geoeléctrica	Resistividad (ohm*m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Correlación Hidrogeológica
I	500-800	4,6	1-4,6	Deposito seco posiblemente arenoso con grandes clastos pertenecientes a la formación Tibú-mercedes.
II	42-65	5,1	4,6-9,7	Capa arcillosa-arenosa con grandes clastos pertenecientes al miembro superior de la formación Tibú-Mercedes, húmedo.
III	99-150	8	9,7-17,7	Caliza arenosa, con porosidad secundaria, altamente fracturadas, pertenecientes al miembro superior de la formación Tibú-Mercedes.

UIS2

La tomografía de resistividad eléctrica ubicada en los predios adquiridos por la sede Málaga de la Universidad Industrial de Santander en dirección Sur-Norte, la línea tiene una longitud de 110 m, por lo tanto, su profundidad fue aproximadamente 20m.

La localización de la tomografía de resistividad eléctrica UIS2 se presenta en la Tabla 13, en coordenadas MAGNA Colombia, su ubicación en planta puede observarse en la Figura 17.

Tabla 13.

Localización tomografía de resistividad eléctrica UIS2.

UIS2	X	Y
Inicio	1°149.193	1°233.752
Fin	1°149.174	1°233.644

PERFIL DE RESISTIVIDADES REALES

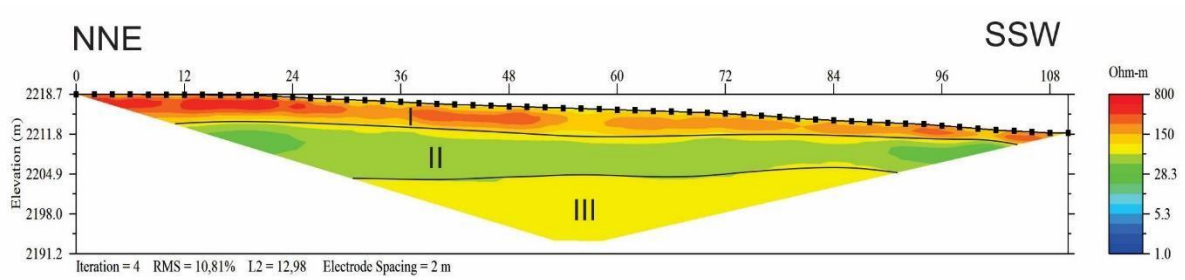


Figura 37. Sección de resistividad real. UIS2

A continuación, se presenta la relación entre las características geoelectricas realizadas y la geología de la zona a partir de geología de campo, el mapa geológico de la EOT 2015 y de la plancha 136 de Málaga-Santander a escala 1:100.000.

Tabla 14.
correlación geoelectrica

Unidad	Resistividad	Espesor	Profundidad	Correlación Hidrogeológica
Geoelectrica (ohm*m)	(m)	(m)		
I	526-600	5	0-5	Deposito seco con una alta resistividad eléctrica .
II	42-65	5,4	5-10,4	Capa arcillosa-arenosa con grandes clastos pertenecientes al miembro superior de la formación Tibú-Mercedes, Humedo.
III	99-150	3,6	24,2-27,8	Caliza altamente fracturada saturada, con posible vocación acuífera (nivel freático).

8.2.GEOLOGÍA

8.2.1. Depósitos Cuaternarios:

8.2.1.1. *Depósitos Coluviales (Qc)*

Depósitos aluviales con fragmentos angulares de roca, presenta depósitos de talud, derrubios y material de avalancha que se acumulan en las partes terminales de fuertes pendientes, generando una suave pendiente. (Vargas et al, 1981)



Figura 38. Deposito coluvi6n, cerca de la sede Málaga de la Universidad industrial de Santander.

Cerca de la sede Málaga se encuentran varios afloramientos de depósitos coluviales, con clastos de la formaci6n Tibú-Mercedes, relacionados con lo encontrado en los primeros metros de las tomografías de resistividad eléctrica.

8.2.1.2. *Depósitos Aluviales (Qal)*

provienden de las quebradas que atraviesan el casco urbano, en la parte sur la quebrada la magnolia y las quebradas agua blanca y bar Málaga (llamada el Molino aguas arriba), en el norte; este depósito se

encuentra bien representado en la pista del aeropuerto, el cual está localizado al lado de la sede Málaga de la Universidad Industrial de Santander. (Vargas et al, 1981)

8.2.2. Formación Tibú y Mercedes

Edad: Aptiano superior a Albiano inferior según Notestein, et al, (1944), en la parte SW del cuadrángulo puede llegar hasta el Hauteriviano (Renzoni, 1967); también llamada formación Apón por (Richards, 1968), datada para Venezuela del Aptiano Superior al Albiano Medio (Sutton, 1946).

Descripción Litológica: La formación Tibú está conformada por areniscas guijosas de grano grueso en su parte basal, en su zona media inferior está representada por calizas fosilíferas y areniscas de grano fino; en la base de la formación Mercedes se encuentra una intercalación de calizas semejantes a las de la formación Tibú con lutitas negras, micáceas y carbonosas, y areniscas grises de grano fino a medio, glauconíticas, localmente muy calcáreas (Vargas et al, 1981).

Presenta un espesor de aproximadamente 250m a 562m según Ward et al. (1973) el límite superior es concordante y gradacional con la formación Aguardiente, el contacto con la formación infrayacente Río Negro no está bien definido (Vargas et al, 1981). Es correlacionable con las formaciones Rosablanca, Paja y Tablazo de la cuenca del Valle Medio del Magdalena (Ward et al.,)

En la zona de estudio se encuentran presentes dos de las facies descritas por Caballero y Sierra en 1991, las cuales corresponden a facies micríticas y biomicríticas:

FACIES DE MICRITAS (MC).

Descritas como micritas de color gris oscuro, sin fósiles correspondiente a un depósito no bioturbado, formados en ambientes tranquilos con escaso aporte de oxígeno (Caballero y Sierra, 1991).



Figura 39. Micritas de la formación Tibú-Mercedes, encontradas en el barrio barzal, metros más debajo del área de estudio.

Las micritas de la formación Tibú-Mercedes, se observan en la parte basal de las tomografías de resistividad eléctrica y base de los sondeos eléctricos verticales, se encuentran altamente fracturados como se observa en la Figura 39, las cuales se encuentran rellenas de calcita, en algunos sectores se encuentran altamente meteorizados.

FACIES DE BIOMICRITAS (BMC).

Biomicrocritas gris azulado, composicionalmente biomicrocritas ralas con conchas y partes de braquiópodos, equinodermos, moluscos, esponjas y corales; algas, braquiópodos, foraminíferos,

corales, etc; con un bajo porcentaje de terrígenos en algunos estratos con un 40% (Caballero y Sierra, 1991). Depósitos de aguas marinas someras, en un ambiente de baja energía, actividad biológica bastante importante e influencia continental por la presencia de terrígenos. Reading (como se citó en Caballero y Sierra, 1991).



Figura 40. Calizas biomicriticas de la formación Tibú-Mercedes, encontradas en la vía que va del municipio a la vereda el barzal, metros más debajo de la zona de estudio.

Las biomicritas de la formación Tibú-Mercedes se asoció a la parte media de lo encontrado en las tomografías de resistividad eléctrica y los sondeos eléctricos verticales, altamente fracturado con presencia de fósiles, algunos rellenos de calcita y algunas capas altamente meteorizadas.

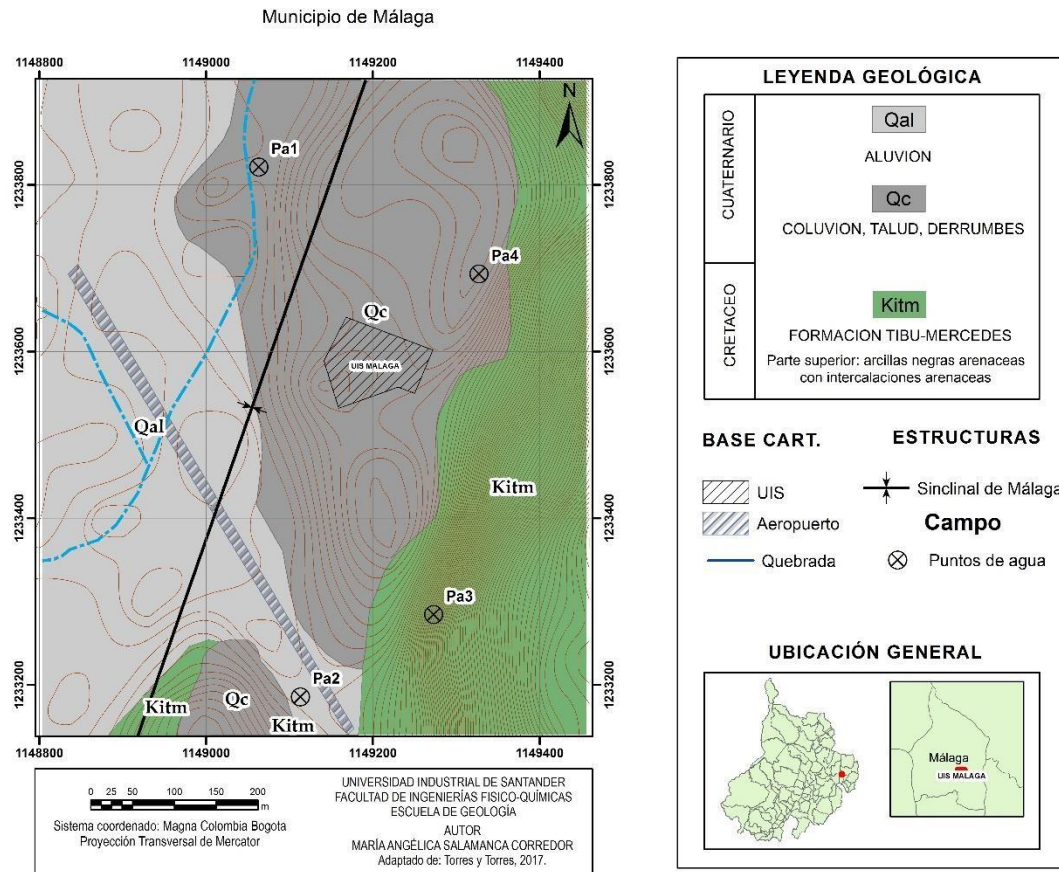


Figura 41. Mapa geológico de la zona de estudio, donde se observa la distribución de los depósitos cuaternarios y formación Tibú-Mercedes, curvas de nivel cada dos metros.

8.3. Modelo Geológico-Geoeléctrico

Vasquez y Bermudez (2004) refiere que el “modelo geológico-geofísico es la representación del estado actual del conocimiento acerca de la correlación espacial entre las características del subsuelo tanto geológicas como físicas y geométricas. Las características geológicas tienen que ver con el tipo de litología, textura, elementos estructurales y ambientes de depositación. Las características físicas se refieren a la distribución de diferentes propiedades físicas tales como la resistividad eléctrica, la conductividad eléctrica, la densidad, etc., tanto hacia profundidad como lateralmente, las cuales se determinan a partir de la aplicación de los métodos geofísicos correspondientes”.

Según lo mencionado por Vásquez y Bermudez, este modelo permite establecer algunas características de la unidad geológica como extensión, espesor y volumen; la distribución litológica en el subsuelo; estructuras tales como fracturas, fallas, cambio de facies, entre otros; y propiedades físicas del subsuelo a profundidad y en la lateral.

La zona de trabajo al ser tan limitada no permitirá tener mucha información respecto a la extensión de las unidades geológicas y donde la distribución en profundidad se hará según sea el alcance de la geoelectrica utilizada. Por esta razón el modelo a realizar llevará por nombre modelo geológico-geoelectrico, donde se utilizará la resistividad como propiedad física a correlacionar.

La geología del municipio de Málaga se encuentra bajo el marco de la cuenca del Catatumbo, se encuentra ubicado sobre el sinclinal de Málaga compuesto por la secuencia Cretácica (formación Aguardiente, Tibú-Mercedes, Río Negro). En el sector norte de la zona urbana (zona de estudio) predomina depósitos cuaternarios y la formación Tibu-Mercedes.

En la zona de estudio se correlacionarán los depósitos recientes y algunas unidades de la formación Tibú-Mercedes.

Tabla 15.

características estratigráficas.

Formación	Litología	Espesor estimado (m)
Deposito Coluvial	Arenas conglomerata, blocosa.	6-10 m
Deposito Aluvial		10-40 m
Biomicitas de la Fm. Tibú-Mercedes	Calizas color gris oscuro, fosilífera Venas rellenas de calcita	20-50 m
Micitas de la Fm Tibú-Mercedes	Calizas color gris, fracturas rellenas de calcita	50-100 m

8.3.1. Parámetros físicos

El **Parámetro** físico utilizado y medido para desarrollar el modelo corresponde a la resistividad eléctrica de la roca, determinado a partir de las tres tomografías y cuatro sondeos verticales realizados en la zona de estudio, siendo agrupados en distintos rangos y correlacionados con la geología.

Tabla 16.

Correlación características geológicas y eléctricas.

Unidad Geológica	Resistividad eléctrica $\Omega.m$
Deposito Coluvial, encontrado en las cercanías de la sede Málaga de la UIS	800-40
Deposito Aluvial, sector norte del aeropuerto	6-65
Caliza altamente meteorizada	390
Caliza biomicritica fracturada	20-150
Caliza micritica altamente fracturada	500-950

8.3.2. Modelo geológico-geoeléctrico por TRE

Se elaboraron tres perfiles, mostrando la distribución de los depósitos recientes y las unidades de la formación Tibú-Mercedes, logrando una aproximación del subsuelo en el norte de la zona urbana del municipio de Málaga.

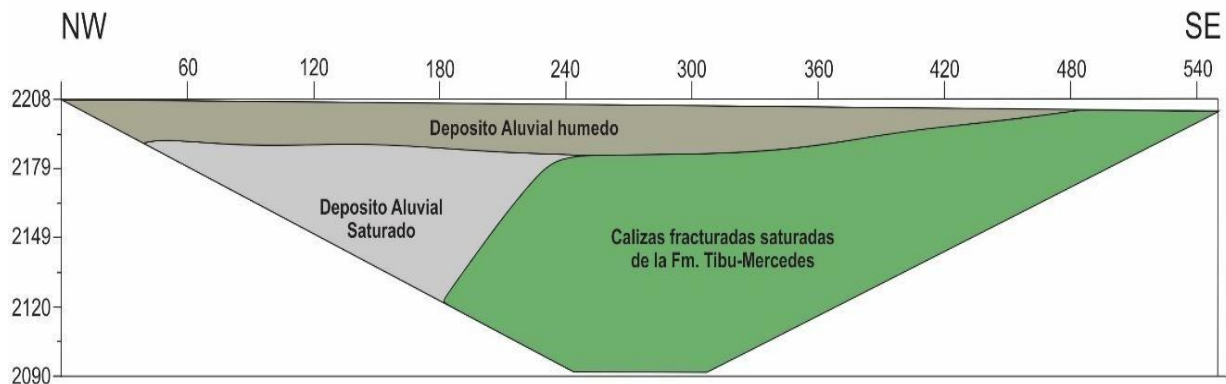


Figura 42. A) Modelo Aero1

El perfil Aero1 (Figura 42), con rumbo NW-SE y ubicado hacia la parte norte de la zona urbana del Municipio de Málaga en la pista del aeropuerto municipal, muestra el depósito aluvial húmedo caracterizado por tener resistividades entre 6 y 30 Ωm , se presenta en forma continua en la zona NW y no es observable hacia la zona SE, posee un espesor de capa entre los 2-20m aproximadamente. Estas resistividades corresponden a rocas con un alto contenido de humedad Figura 42.

La capa infrayacente al costado NW corresponde a un nivel de depósito aluvial saturado con una resistividad entre 28-65 Ωm , y un espesor entre los 30-40 m aproximadamente, este depósito puede relacionarse a las quebradas mayores del municipio por esta razón es observable hacia el costado NW de la pista del aeropuerto.

Hacia el costado SE, se encuentra parte de la secuencia de la formación Tibú-Mercedes, compuesta por calizas altamente fracturadas, saturadas con una resistividad entre 99-228,5 Ωm , con un espesor en este perfil de 90-100 m aproximadamente, su parte más profunda está conformado por calizas asociadas con las encontradas en la vereda Barzal, las cuales se caracterizan por ser micríticas de color gris, altamente fracturadas, con diaclasas rellenas de calcita. Su parte superior compuesta por calizas biomicritas altamente fracturadas, encontradas en la vía Málaga hacia la vereda el Barzal.

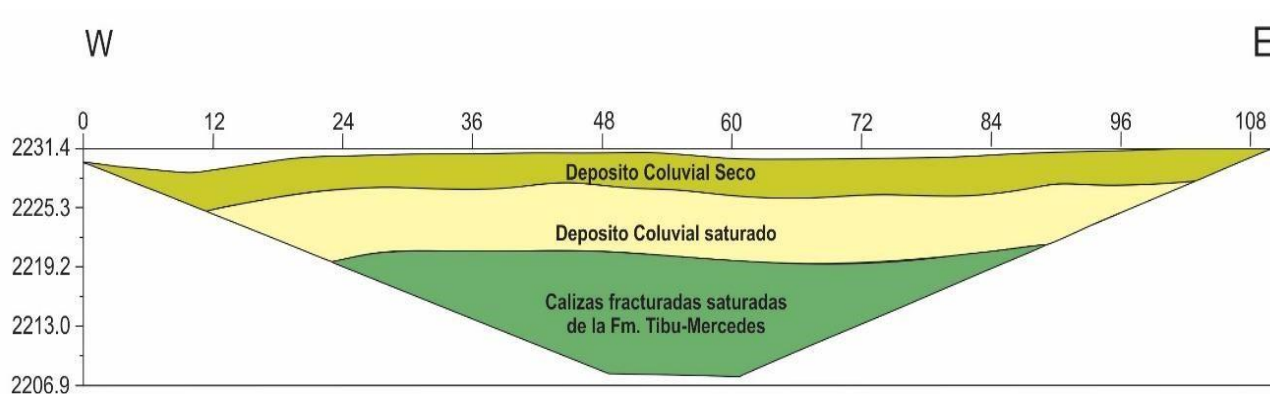


Figura 43. B) Modelo UIS1

El perfil UIS1 (Figura 43) con rumbo W-E está ubicado en los predios adquiridos por la sede Málaga de la Universidad Industrial de Santander, se encuentra compuesto por una primera capa que se caracteriza por ser un depósito coluvial seco de aproximadamente 6m de espesor, esta litología puede ser encontrada a los alrededores de la universidad y en los barrios aledaños (vista Hermosa y el Charquito), presenta una resistividad entre los 500-800 Ωm y se encuentra en forma continua en todo el perfil.

La capa infrayacente es el mismo depósito coluvial, pero saturado, gracias a la saturación que posee su resistividad baja a 42-65 Ωm con un espesor entre 6 a 8m aproximadamente, siendo una capa continua en todo el perfil.

Por último, se encuentra la parte superficial descrita en la geología de la secuencia de la formación Tibú-Mercedes correspondiente a biomicritas altamente fracturadas con venas rellenas de calcita y fósiles como bivalvos, moluscos, etc., con reemplazamiento de calcita. Posee un espesor de 10-15m aproximadamente y es una capa continua en todo el perfil, con una resistividad entre 99 a 150 Ωm ; la resistividad es superior para este caso debido al alto grado de fracturamiento y saturación, estas cualidades hacen que la resistividad disminuya ya que está asociada a la porosidad y al relleno de los poros.

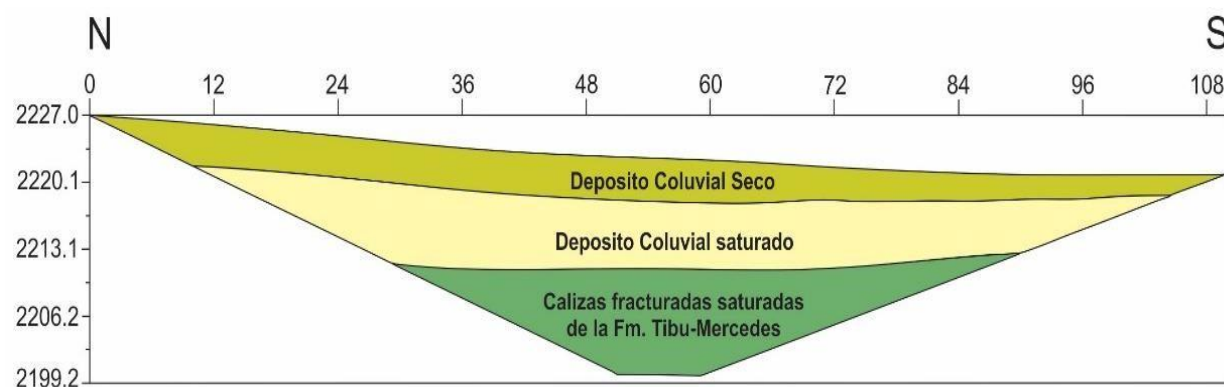


Figura 44. Modelo UIS2

El perfil UIS2 (Figura 44), con rumbo N-S y ubicado en los predios adquiridos por la sede Málaga de la Universidad Industrial de Santander, está compuesto por una primera capa que se caracteriza por tener una resistividad de 526-600 Ωm y un espesor aproximado de 4 a 7m, presentando un espesor menor su costado sur; se relaciona con un depósito coluvial seco que se correlaciona con los afloramientos encontrados a los alrededores de la universidad y en los barrios aledaños, el cual se encuentra descrito en el capítulo de geología de este documento.

La capa infrayacente presenta una resistividad entre 42-65 Ωm con un espesor entre 6 a 11m aproximadamente, mostrando un mayor espesor en su parte norte, correlacionada con el depósito coluvial y su baja resistividad está relacionada con una saturación de agua en la capa.

Por último, se encuentra una capa con resistividades entre 99 a 150 Ωm y un espesor aproximado de 8 metros en este perfil, el cual se encuentra correlacionado con la parte superficial descrita en la geología de la secuencia de la formación Tibú-Mercedes correspondiente a biomicritas altamente fracturadas con venas rellenas de calcita y fósiles como bivalvos, moluscos, etc., con reemplazamiento de calcita. La caliza, al igual que en perfil UIS1, posee una resistividad superior debido al alto grado de fracturamiento y saturación que ocasionan una disminución en dicha resistividad.

Para una mejor visualización espacial, se realizó un modelo 2.5 por medio del software Voxler 4, en donde se observa una distribución uniforme de las capas encontradas en el terreno, en el modelo 1, presentado en la Figura 45

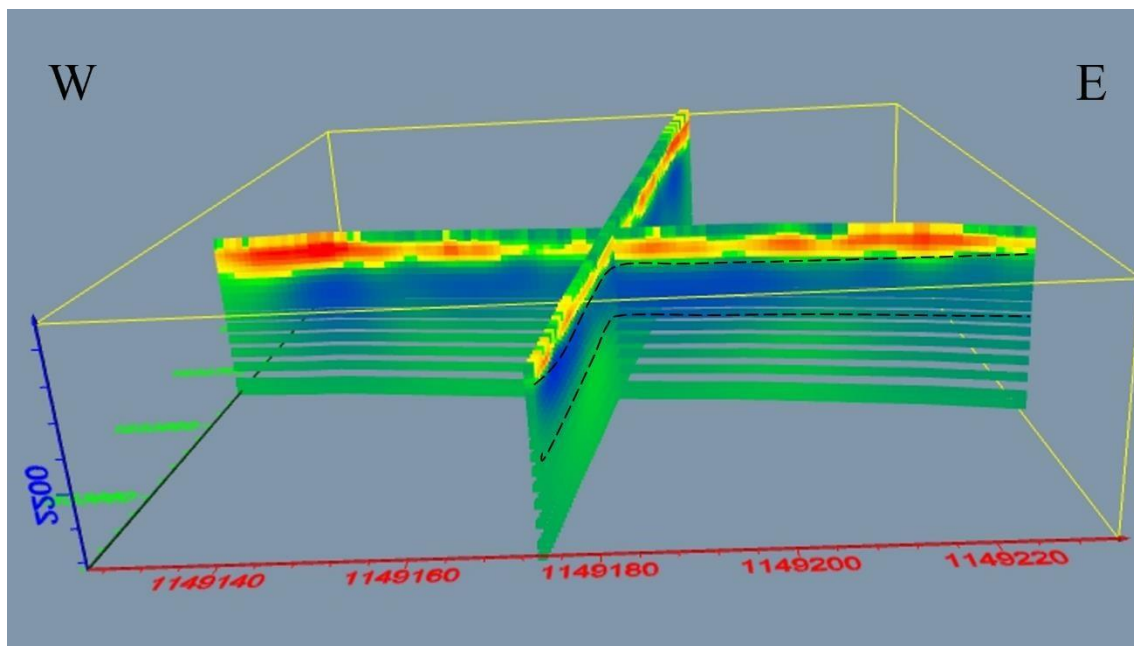


Figura 45. Modelo 1

Estos perfiles permiten tener una visualización espacial del subsuelo, permitiendo tener una idea de la espacialización de las capas en toda la zona, el modelo 1 presenta las tomografías UIS1 y UIS2, capas modeladas a partir de los datos adquiridas y procesados para cada línea tomográfica en la zona de estudio.

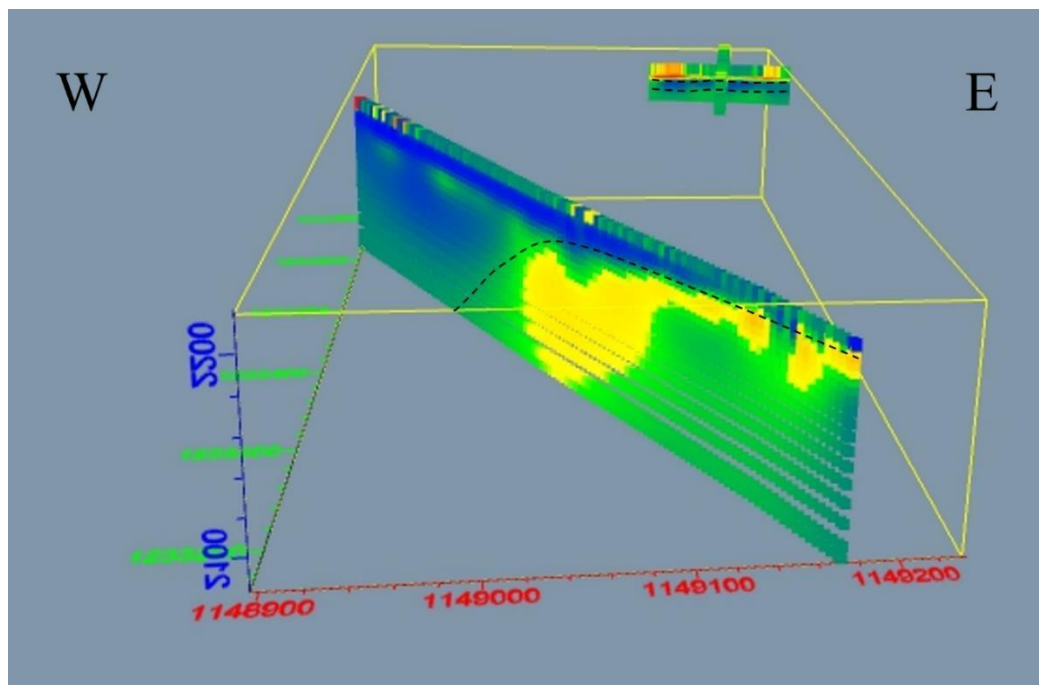


Figura 46. Modelo 2

El modelo 2, incluye la tomografía AERO1 realizada en la pista del aeropuerto municipal; esta tomografía tiene una longitud superficial de 550m, alcanzando una profundidad de 118 más o menos un quinto de la distancia en superficie, por esta razón tendremos un mayor panorama de la distribución a profundidad de la zona.

8.3.3. Modelo geológico-geoelectrico SEV's

Para estos modelos se utilizaron cuatro SEV's distribuidos en la zona de estudio, se realizaron dos perfiles, perfil 1. Se realizó con los SEV RUIS1A y RUIS4A, el perfil 2. Se realizó con los SEV RUIS2A y RUIS3A, estos son utilizados como complemento de las tomografías de resistividad eléctrica, para abarcar una mejor resolución y profundidad en la zona de estudio.

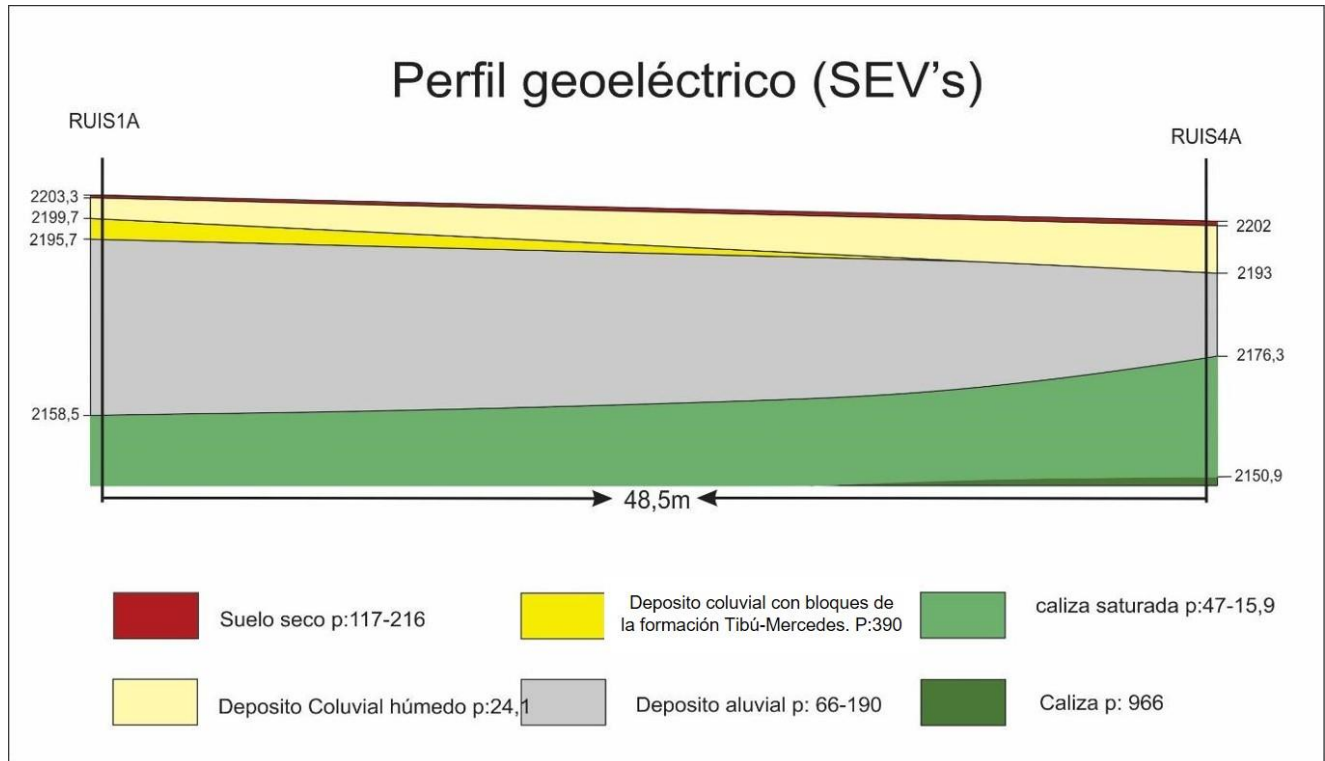


Figura 47. A) Modelo RUIS1A-RUIS4A

El perfil conformado por los SEV's RUIS1A y RUIS4A, tienen un rumbo NE-SW y se encuentra localizado en la parte inferior frente a la Molinera del municipio, junto a los predios adquiridos por la sede Málaga de la Universidad Industrial de Santander, en este se diferencian cinco capas diferentes en una profundidad de 80 metros aproximadamente.

La primera capa posee un espesor de medio a un metro con una resistividad de 117-216 Ωm , asociado a una capa de suelo seco.

La capa infrayacente presenta una resistividad de 24,1 Ωm y un espesor aproximado de 3,6 a 5 metros, por sus características y posición está relacionado con un depósito coluvial húmedo, su baja resistividad puede ser asociada a una saturación de agua en el depósito; en los alrededores de la sede Málaga de la UIS y el barrio Vista Hermosa son observables varios afloramientos de este depósito.

Se encuentra una pequeña capa hacia el costado NE asociado a una pequeña capa de calizas húmeda parcialmente alterada con una resistividad de 390 Ωm y un espesor de 2m, en la zona SW no se encuentra presente esta capa.

La capa infrayacente presenta una resistividad de 66 a 190 Ωm y un espesor aproximado de 37,2 a 17m, el espesor se hace más pequeño hacia el sector SW del perfil, esta capa se encuentra relacionada a un depósito aluvial ligado a las quebradas principales del municipio de Málaga; en el EOT (2015), hacen referencia a que los depósitos aluviales corresponden a un 10,46% del área urbana de este.

Inferior a esta, se presenta una capa de 25,4m al SW y un espesor indefinido al costado Nororiental del perfil con una resistividad de 15,9-47 Ωm , se correlaciona con una caliza altamente meteorizada con una saturación en agua alta, perteneciente a la formación TibúMercedes.

Por último, se presenta una pequeña capa hacia el SW, de espesor indefinido que no es visible en el costado NE, con una resistividad de 966 Ωm , relacionado con una capa de caliza, siguiendo la secuencia geológica de la zona.

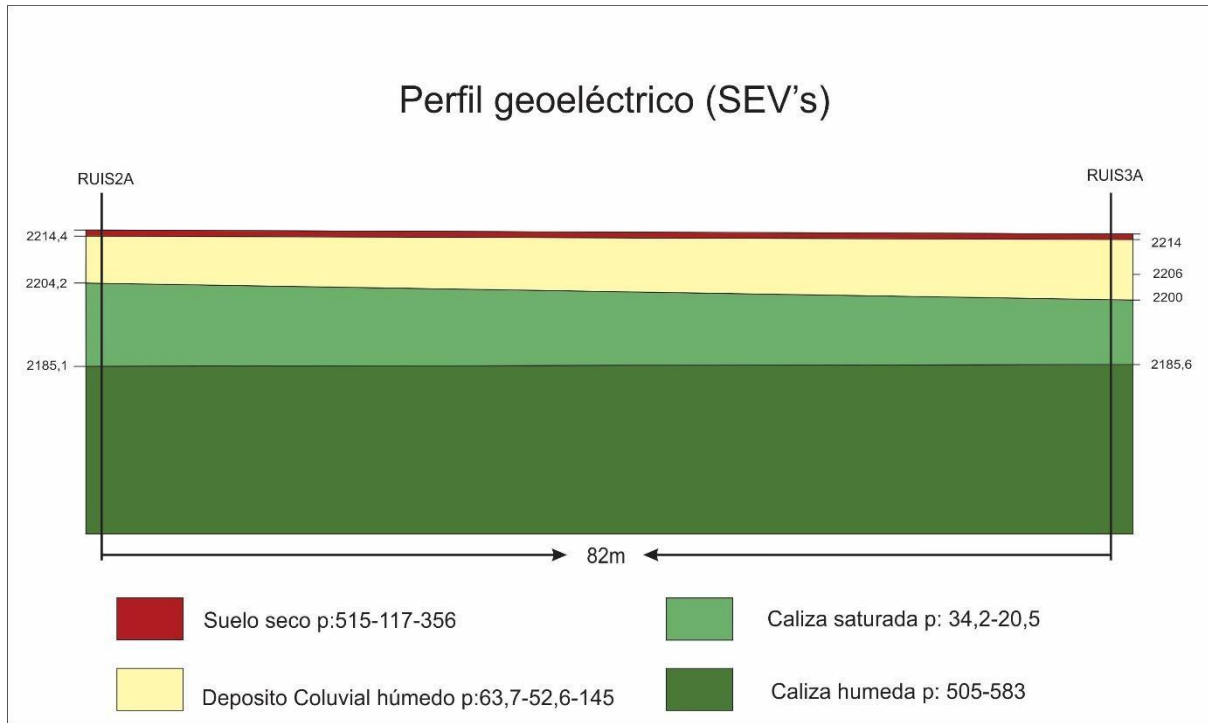


Figura 48. B) Modelo RUIS2A-RUIS3A

El perfil conformado por los SEV's RUIS2A y RUIS3A, tienen un rumbo NE-SW, se encuentra localizado en la parte superior derecha de los predios adquiridos por la sede Málaga de la Universidad Industrial de Santander, en el cual se diferencian cuatro capas diferentes a una profundidad de 80 metros aproximadamente.

La primera capa posee un espesor de medio a un metro con una resistividad de 117-216 Ω m, asociado a una capa de suelo seco.

La capa infrayacente presenta una resistividad de 63,7-52,6-145 Ω m y un espesor aproximado de 10 metros, por sus características y posición está asociado con un depósito coluvial húmedo, su baja resistividad puede ser asociada a una saturación de agua en el depósito, en los alrededores de

la sede Málaga de la UIS y el barrio Vista Hermosa son observables varios afloramientos con este depósito.

Bajo esta se encuentra una capa de aproximadamente 19 metros de espesor y una resistividad de 34,2-20,5 Ωm , el cual se relaciona a un nivel de caliza saturada, altamente fracturada en la Figura 49, se observa una imagen de la posible litología asociada a esta resistividad

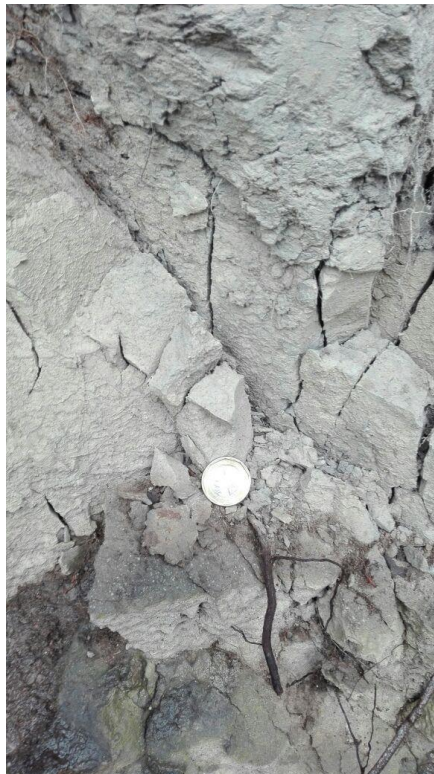


Figura 49. caliza meteorizada, altamente fracturada, ubicada en el barrio Vista Hermosa.

Por último, se presenta una capa con resistividad de 505-583 Ωm , del cual no se conoce el espesor, se correlaciona con una caliza altamente fracturada con una saturación en agua alta, perteneciente a la formación Tibú-Mercedes.

8.4. Inventario de Puntos de Agua

La existencia de agua subterránea en la zona se evidencia en ciertos lugares, litológicamente se asocia, en algunos sectores, con las capas de caliza fracturada de la formación TibúMercedes y otras con el depósito coluvial existente en la zona urbana del municipio.

A continuación, se presentará los puntos de afloramiento de agua subterránea con su respectiva coordenada y ubicación.

El punto de agua número uno se encuentra ubicado en pleno centro de la ciudad, con coordenadas N: 1'232.790,897; E: 1'149.195,276 y de altura 2200 msnm. (Carrera 9 No 1558 Barrio Unión)

El nivel del agua se encuentra a un metro de profundidad en época de lluvia y en tiempo seco también aflora agua en este punto, se presenta como un pozo de gran diámetro o alberca, no se utiliza para el consumo humano, en la Figura 50 se puede observar la tabla de agua muy fácilmente.



Figura 50. punto de agua 1

Una calle más arriba del punto uno, (calle 15 carrera 7a) cerca al hospital del municipio (Hospital Garcia Rovira HGR) se puede observar un pozo con un diámetro aproximado de un metro con veinte cms (1,20m), el agua observada en este lugar se encuentra sucia, no es utilizada para consumo humano, se encuentra a aproximadamente ochenta a cien centímetros de profundidad, la tabla de agua puede ser observada en la Figura 51, este pozo se encuentra restringido por unas rejas, aun así presenta gran cantidad de basura en su interior.

Las coordenadas de este punto son N: 1'232.799,652; E:1'149.308,93 y una altura de aproximadamente 2.254 msnm.



Figura 51. Punto de agua 2

Cerca de las instalaciones de la sede Málaga de la UIS (costado Oriental de la colina llamada la veleta en la finca de la señora Ester Vega), se encuentra el afloramiento de agua observado en la Figura 52, el punto de agua se localiza sobre calizas de la formación Tibú-Mercedes correlacionadas con la parte más baja encontradas en las tomografías de resistividad eléctrica presentadas en el capítulo de geofísica de este documento, el punto de agua es constante durante

los períodos de lluvia y de sequía del año. Se ubica en el camino que va desde el aeropuerto hacia la parte baja de la sede Málaga con coordenadas N: 1'232.948, 084; E: 1'149.649,543 y una altura de aproximadamente 2188 msnm. La diferencia de profundidad con la geoelectrica realizada es de 20m, por esta razón es correlacionable con esta.



Figura 52. Afloramiento de agua 3

Al costado Oeste de la pista del aeropuerto municipal de Málaga se encuentra un pozo abandonado, se observa vegetación dentro de él y una alta contaminación por basuras de origen antrópico, las coordenadas de este punto son, N: 1'232.873,932; E: 1'149.502,28 y una altura aproximada de 2.202 msnm.

Es pozo se encuentra relativamente cerca al punto de agua de la Figura 52, pero a una altura considerablemente alta, lo cual puede indicar que el nivel del agua bajo considerablemente.



Figura 53. Punto de agua 4

En la parte superior de los predios adquiridos por la sede Málaga de la UIS, se presenta uno de los puntos de aguas más someros, se localiza a menos de 20 centímetros de profundidad de la superficie, la vegetación alrededor del punto de agua es abundante y este no presenta interrupción en las épocas de lluvia y sequía del año.

Las coordenadas de este punto son, N: 1'233.698; E: 1'149.327 y altura aproximada de 2218 msnm.



Figura 54. Afloramiento de agua 5

El siguiente pozo de agua se ubica en la carretera que va del barrio Vista Hermosa a el aeropuerto municipal, el pozo es de origen antrópico pero se llena de forma natural, las coordenadas de este punto son, N: 1'233.516, 047; E: 1'149.466,735 y una altura aproximada de 2210 msnm



Figura 55. Afloramiento de agua 6

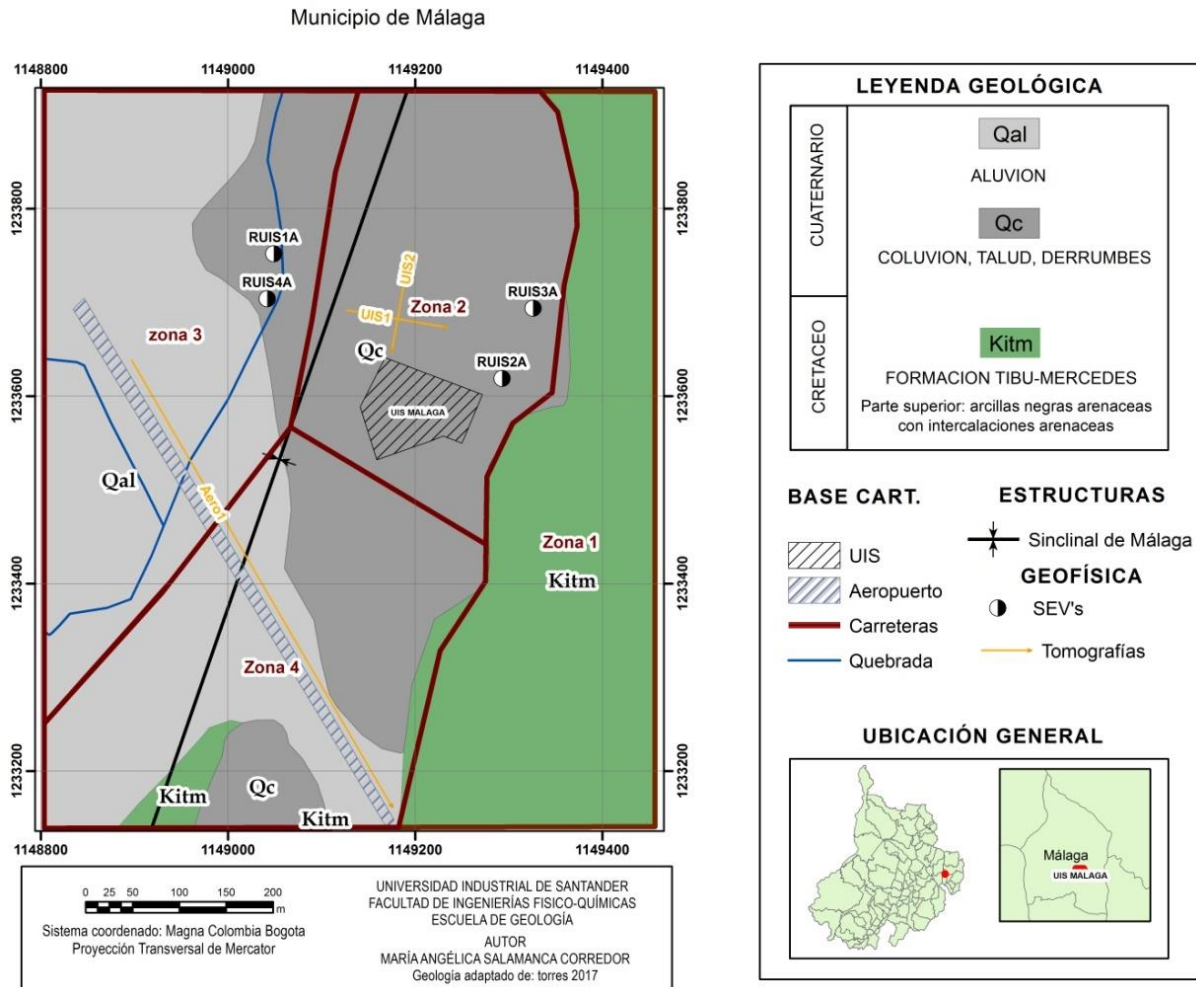
8.4.1. Zonas de mayor potencial acuífero

La zona dos y cuatro mostradas en la figura 56, presentan mayores posibilidades para la vocación acuífera de las unidades infra yacentes, la zona Uno en lo alto del domo donde se localizan los predios adquiridos por la sede Málaga de la UIS, presenta un afloramiento de agua (Figura 54), dicho afloramiento corresponde al flanco Oriente del sinclinal de Málaga, la aparición de agua en éste lugar, está gobernada por la geología estructural del sinclinal, siendo la zona de recarga en la parte alta del Flanco Oeste.

La zona dos (sede UIS) presenta la roca con potencial acuífero a menor profundidad según los resultados de la tomografía de resistividades eléctricas (Figura 36 y Figura 37) y cerca a esta se encuentra un afloramiento (Figura 52) lo que permite contemplar esta zona para exploraciones futuras.

La zona uno se localiza en un sector de alta pendiente, donde afloran rocas de la formación Tibú-Mercedes, se presenta en éste sector un afloramiento de agua (Figura 52).

Se define la zona cuatro como la más apropiada para la explotación de agua subterránea (ubicación de pozos de extracción), ya que se encuentra en un nivel topográfico más bajo, allí, la zona de interés hidrogeológico se presenta a menor profundidad.



9. Conclusiones

La zona de estudio se encuentra sobre el flanco oriental del sinclinal de Málaga, muy cerca de su eje, condición que genera una mayor posibilidad a la acumulación de agua, lo cual se corrobora por medio de la exploración geofísica y geológica realizada donde se observa que la unidad de mayor potencial hidrogeológico, se encuentra a 10m de profundidad en los predios de la Sede UIS Málaga.

Con el control geológico realizado en éste proyecto de investigación se determinó que en la zona de estudio afloran depósitos coluviales recientes con clastos de la Formación TibúMercedes; infrayacen a éstos una capa de estratos calcáreos de la misma formación que varían de caliza micrítica a biomicrítica de base a techo y son observables en la carretera que de Málaga conduce a la vereda el barzal.

El modelo geológico-geoeléctrico permitió realizar la identificación de capas con vocación acuífera, diferenciando como la unidad con mayor potencial hidrogeológico al miembro calcáreo de la Formación Tibú-Mercedes, el cual presenta una resistividad entre 48-960 Ω .m y porosidad secundaria adecuada para el almacenamiento del recurso hídrico.

A partir del modelo geológico-geoeléctrico se diferencian cuatro capas principales donde la capa I, presenta un espesor entre 4,6-5m, con una resistividad de 500-800 Ω m, perteneciente a depósito arenoso conglomerático seco; la capa II, presenta un espesor de 5-11m y una resistividad de 44-140 Ω m, relacionado con suelo húmedo-saturado; la capa III, presenta un espesor de 104m y una resistividad de 48-960 Ω m, perteneciente a calizas de la Formación Tibú-Mercedes y la capa IV, con un espesor de 14-60m y una resistividad de 6 a 65 Ω m, perteneciente a un depósito aluvial reciente.

La distribución de las resistividades tanto en profundidad como en lo lateral (2D) observadas en las tomografías de resistividad eléctrica permitieron la delimitación geométrica de las unidades geológicas de la zona de estudio. El apoyo de la geología de campo permitió definir estratos homogéneos perteneciente a la formación Tibú-Mercedes encontrada a una profundidad de 5-15m al sur y a una profundidad de hasta 40m en el sector norte, en la tomografía realizada en el aeropuerto municipal se observa hacia el norte una zona de depósito aluvial.

En la cancha de futbol (como se indica en la Figura 56,) en el nivel topográfico más bajo de los terrenos de la Sede UIS Málaga se presenta la capa con mayor potencial hidrogeológico a menor profundidad (8 m.), éste lugar corresponde a la mejor ubicación del pozo exploratorio con fines de explotación.

Para le Sede UIS Málaga, el abastecimiento de agua diferente a la dotación suministrada por el acueducto municipal es posible con fuentes de agua Subterránea almacenada en las rocas que infrayacen los predios de la Sede.

10. Recomendaciones

Se recomienda perforar un pozo exploratorio de máximo 2 pulgadas diámetro en la zona de la cancha de la sede Málaga UIS, con el fin de conciliar lo modelado con la realidad geológica, y tener la posibilidad de realizar en dicho pozo un ensayo de bombeo para determinar las propiedades hidráulicas de la capa acuífera al igual que la calidad física, química organoléptica y bacteriológica del Agua subterránea, sin embargo en dicho lugar, las instalaciones eléctricas que se requieran para el funcionamiento de la Bomba, resultan tan costosas como el pozo en si, por tal razón es necesario ejecutar la perforación de un segundo pozo, a mayor profundidad en los terrenos cercanos a las edificaciones como se muestra en el mismo plano de la Figura 56.

El uso directo del agua subterránea puede suplir los servicios sanitarios y de riego de la Sede UIS Málaga, sin embargo, se recomienda que para ser utilizada con usos diferentes se realice la caracterización física, química y bacteriológica para diseñar una planta de tratamiento.

Referencias Bibliográficas

Advanced geosciences, Inc. (2009). *Instruction Manual for Earthimager 2D version 2.4.0*. Austin, Texas.

Auge, M. (2008). *Metodos geoelectricos para la prospeccion de agua subterranea*. Buenos aires.

BAYONA, G., MONTENEGRO, O., CARDONA, A., JARAMILLO, C., LAMUS, F., MORÓN, S., STOCKLI, D. (2010). Estratigrafía, Procedencia, Subsistencia Y Exhumación De Las Unidades Paleógenas En El Sinclinal De Usme, Sur De La Zona Axial De La Cordillera Oriental. *Geología Colombiana*, 35(5).

Caballero, V., Parra, M., & Mora Bohorquez, A. R. (2010). Levantamiento de la cordillera oriental de Colombia durante el Eoceno Tardío-Oligoceno temprano: Proveniencia sedimentaria en el sinclinal de nuevo mundo, cuenca valle Medio del Magdalena. *Boletín de Geología*, 32(1), 45-77.

Caraballo, C., Paula, M., & Montaña Xavier, J. (2012). *Manual de Aguas Subterráneas*. Denad Internacional S.A.

COOPER, M., ADDISON, F., ALVAREZ, R., CORAL, M., GRAHAM, R., HAYWARD, A., TABORDA, A. (1995). Basin Development and tectonic history of the Llanos basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 79, 1421–1443.

CRA. (17 de mayo de 2017). *Comisión de regulación de aguas*. Obtenido de Comisión de regulación de aguas: <http://www.cra.gov.co/es/novedades/noticias/23739-conoce-el-nuevo-consumo>

Custodio, E., & Llamas, M. R. (2001). *Hidrología subterránea*. In *Hidrología subterránea*. Barcelona: Omega.

Davis, S. & De Wiest, R. (1966). *Hydrogeology*. New York: John Wiley and Sons.

Departamento general de irrigación. (10 de mayo de 2017). *Clasificación de los acuíferos*.

Obtenido de Clasificación de los acuíferos: http://aquabook.agua.gob.ar/407_0

EOT. (2003). *Esquema de Ordenamiento Territorial*. Málaga: Municipio de Málaga.

EOT. (2015). *Esquema de Ordenamiento Territorial*. Málaga: Municipio de Málaga.

GARCIA ARIAS, S., & GOMEZ GARCIA, E. (s.f.). *Modelo conceptual hidrogeofísico para evaluar el potencial hidrogeológico de la Formación Los Santos en la Mesa de Los Santos-Santander, Colombia*. Mesa de Los Santos-Santander, Colombia. Trabajo de grado Geólogo. Bucaramanga.: Universidad Industrial.

GARNER, A. H. (1926). Suggested nomenclature and correlation of geological formations in Venezuela. *Amer. Inst. Min. Metall. Eng., Trans.*, 677-684.

IAKUBOVSKII, I. V., & LIAJOV, L. (1980). *Exploración eléctrica*. Traducido por: Juan Gonzales Montero. 3 ed. Moscú: Reverté, S.A.

INGEOMINAS. (2004). *Programa de exploración de aguas subterráneas*. Bogota.

JULIVERT, M. (1968). *Lexique Stratigraphique International Amerique Latine Colombia*

(Premiere Partie). *Centre National de la Recherche Scientifique*, vol. 5, 651.

JULIVERT, M. (2014). Geología de la Vertiente W de la Cordillera Oriental en el Sector de Bucaramanga (Colombia, Sud-América). *Boletín de Geología*, vol. 8, no 1, 39-42.

MIJAILOV, L. (1989). *HIDROGEOLOGIA*. Moscú, Rusia: Mir Moscú.

Moncayo Revelo, J. A. (2015). *Estrategia didáctica para la enseñanza-aprendizaje del concepto de resistividad eléctrica, mediante la aplicación de métodos geoelectricos*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia.

NOTESTEIN, F. B., HUBMAN, C. W., & BOWLER, J. W. (1944). Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America. *Geological Society of America Bulletin*, , vol. 55, no 10, 1165-1216. .

Olivares, L. D. (2015). *Determinación de unidades acuíferas mediante el análisis de sondeos eléctricos verticales y de registros geofísicos en la colonia jardines de Morelos*. Ecatepec, Estado de Mexico.

ORELLANA, E. (1982). *Prospección geoelectrica en corriente continua*. 2 ed. Ediciones paraninfo S.A.

Otálvaro, V., & Victoria., M. (1999). *Hidráulica de Aguas Subterráneas*.

PARASNIS, D. S. (2012). *Principles of applied geophysics*. New York: Springer Science & Business Media.

PERDOMO, S. (2009). *Tomografía eléctrica en apoyo de la investigación arqueológica*.

Ciudad de la plata: rabajo de Doctorado. Universidad Nacional de la Plata. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas.

Renzoni, G. (1967). Geología del Cuadrangulo J-12. Informe 1546. *Bol. Geol. Bogota*. 24 (2), 18.

RICHARDS, H. G. (1968). Cretaceous section in Barco area of northeastern Colombia. *AAPG Bulletin*, vol. 52, no 12, 2324-2336.

SUTTON, F. A. (1946). Geology of Maracaibo Basin, Venezuela: PART 1. *AAPG Bulletin*, vol. 30., 1621-1741.

TELFORD, W. M., GELDART, L. P., & SHERIFF, R. E. (1990). *Applied geophysics*. 2 ed. United Kingdom: Cambridge university press.

TRUMP, G. W., & SALVADOR, A. (1964.). Guidebook to the geology of western Táchira. . *Assoc. Venez. De Geol. Min. Y Petr.* , 25 .

VARGAS, R. A. (1981). Geología De Las Planchas 136 Málaga Y 152 Soatá Cuadrángulo I-13. . *Inst. Col. De Geol. Y Min.* , 83.

Vasquez, L. E., & Bermudes, O. d. (2004). Modelo Geologico-Geofísico para el Área Metropolitana de Bucaramanga. *Ingeominas*.

Vélez Otálvaro, M. V. (1999). *Hidráulica de Aguas Subterráneas*. Medellin: Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.

Víctor, C. O., & Hernando, S. R. (1991). *Estratigrafía del Cretácico en el área de San Andrés Santander*. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander.

Villarroya, F. (2009). *Jornadas Técnicas Sobre Aprovechamiento De Aguas Subterráneas Para Riego*. Madrid.

WARD, D. E. (1973). Geologia de los cuadrángulos H-12 y H13, parte nororiental del Departamento de Santander. *Inst. Nal. De Inv. Geol. Min*, 144.

Anexos

Anexo A. Formato de datos de campo para el sondeo RUIS1A en la sede UIS, Málaga.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERIA FISICO-QUIMICA ESCUELA DE GEOLOGIA			
Fecha: 11 de Febrero de 2017		N° de SEV: RUIS1A	
Equipo: Abem Terrameter		Configuración: Schlumberger	
Coordenadas E: 1'149.049 N: 1'233.752 Elevación: 2.204 msnm		Ubicación Sector superior de la Universidad Industrial de Santander sede Málaga. Hora 10:00 pm	
N°	AB/2	MN/2	Ro
1	1	0.25	91.242
2	2	0.25	48.303
3	3	0.25	34.613
4	4	0.25	33.19
5	5	0.25	33.414
6	7.5	0.25	39.508
7	10	0.25	51.748
8	10	1	58.36
9	12.5	1	74.411
10	15	1	68.819
11	17.5	1	69.243
12	20	1	73.684
13	25	1	67.966
14	25	5	83.142
15	30	5	88.891
16	35	5	92.628
17	40	5	89.981
18	45	5	91.173
19	50	5	84.1
20	60	5	89.779
21	60	10	74.908
23	90	10	70.453
OBSERVACIONES			

Anexo B. Formato de datos de campo para el sondeo RUIS2A en la sede UIS, Málaga.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERIA FISICO-QUIMICA ESCUELA DE GEOLOGIA			
Fecha: 11 de Febrero de 2017		N° de SEV: RUIS2A	
Equipo: Abem Terrameter		Configuración: Schlumberger	
Coordenadas E: 1'149.293 N: 1'233.619 Elevación: 2.224 msnm		Ubicación Sector superior de la Universidad Industrial de Santander sede Málaga. Hora 1:20 pm	
N°	AB/2	MN/2	Ro
1	1	0.25	716.82
2	2	0.25	602.29
3	3	0.25	379.29
4	4	0.25	218.59
5	5	0.25	148.16
6	7,5	0.25	77.973
8	10	1	70.838
9	12,5	1	59.398
10	15	1	60.059
11	17,5	1	55.493
12	20	1	57.601
13	25	1	53.623
14	25	5	53.559
15	30	5	54.302
16	35	5	57.317
17	40	5	58.057
18	45	5	60.422
19	50	5	60.207
20	60	5	66.325
21	60	10	70.512
22	70	10	76.607
23	80	10	87.055
24	90	10	96.333
25	100	10	104.53
26	120	10	117.54
27	140	10	110.75
OBSERVACIONES			

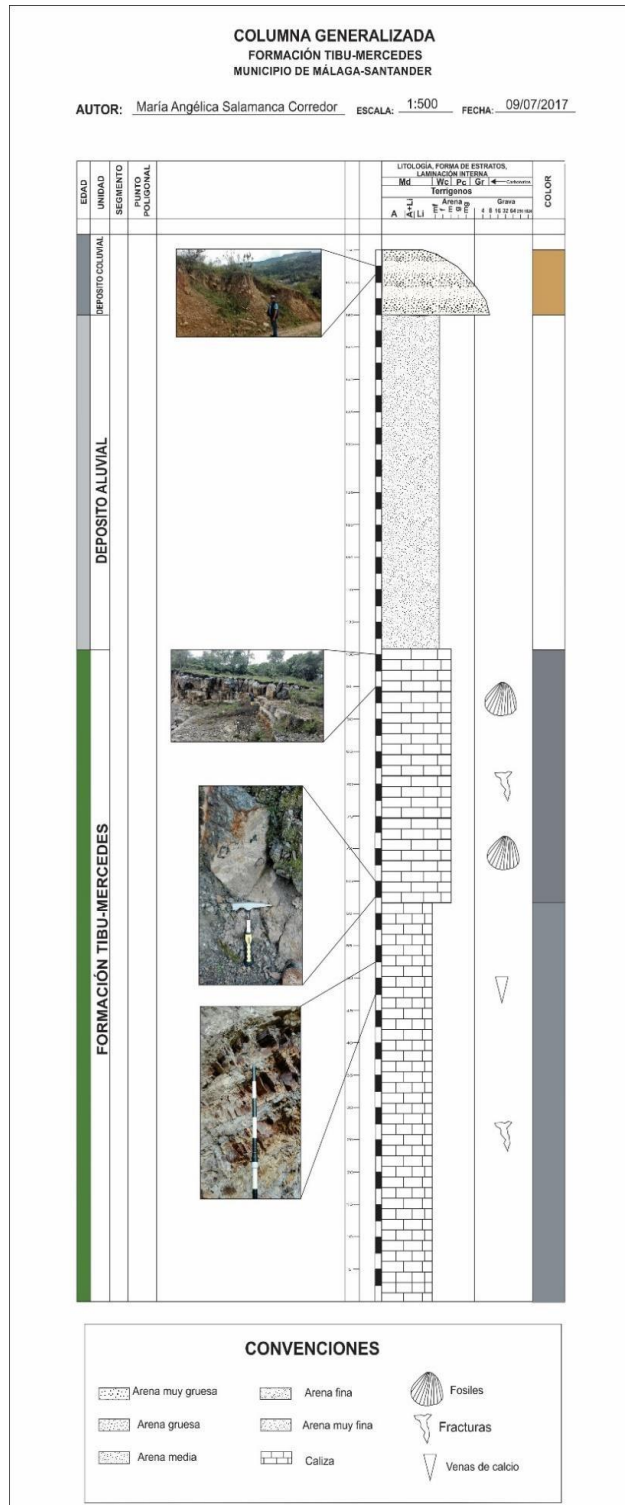
Anexo C. Formato de datos de campo para el sondeo RUIS2A en la sede UIS, Málaga

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERIA FISICO-QUIMICA ESCUELA DE GEOLOGIA			
Fecha: 11 de Febrero de 2017		N° de SEV: RUIS3A	
Equipo: Abem Terrameter		Configuración: Schlumberger	
Coordenadas E: 1'149.326 N: 1'233.692 Elevación: 2.226 msnm		Ubicación Sector superior de la Universidad Industrial de Santander sede Málaga. Hora 3:20 pm	
N°	AB/2	MN/2	Ro
1	1	0.25	347.88
2	2	0.25	296.8
3	3	0.25	233.68
4	4	0.25	173.23
5	5	0.25	121.25
6	7.5	0.25	80.411
7	10	0.25	70.478
9	12.5	1	58.153
10	15	1	56.767
11	17.5	1	50.262
12	20	1	83.086
13	25	1	78.138
14	25	5	68.993
15	30	5	63.338
16	35	5	59.735
17	40	5	60.92
18	45	5	62.431
19	50	5	63.185
20	60	5	71.15
21	60	10	67.069
22	70	10	73.514
24	90	10	99.824
25	100	10	90.859
26	110	10	80.353
OBSERVACIONES			

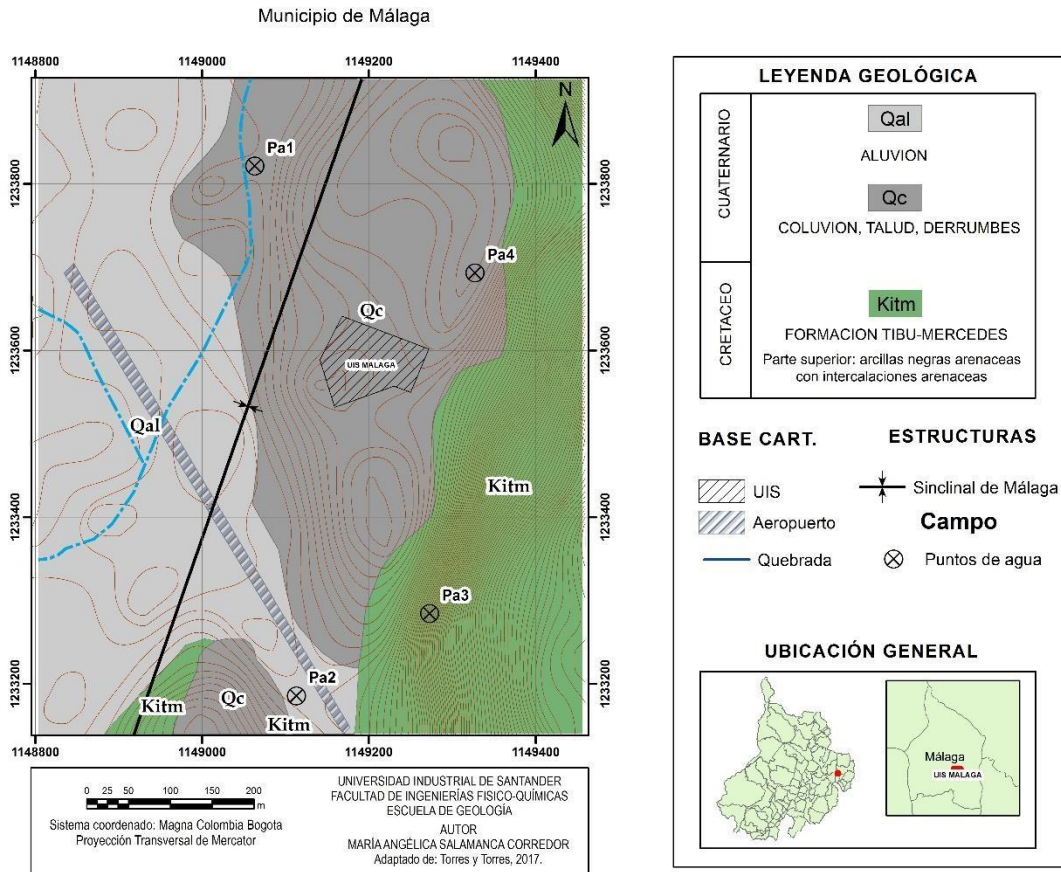
Anexo D. Formato de datos de campo para el sondeo RUIS4A en la sede UIS, Málaga.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERIA FISICO-QUIMICA ESCUELA DE GEOLOGIA			
Fecha: 11 de Febrero de 2017		N° de SEV: RUIS4A	
Equipo: Abem Terrameter		Configuración: Schlumberger	
Coordenadas E: 1'149.042 N: 1'233.709 Elevación: 2.209 msnm		Ubicación Sector Inferior de la Universidad Industrial de Santander sede Málaga. Hora 5:00 pm	
N°	AB/2	MN/2	Ro
1	1	0.25	176.43
2	2	0.25	116.9
3	3	0.25	55.145
4	4	0.25	40.444
5	5	0.25	31.996
6	10	0.25	29.872
7	10	0.25	28.673
8	10	1	29.389
9	30	1	44.339
10	30	5	64.153
11	50	5	67.690
12	70	5	65.782
13	70	10	72.520
14	90	10	71.870
15	110	10	70.032
16	130	10	78.849
17	130	10	81.573
18	130	10	77.198
19	150	10	78.859
OBSERVACIONES			

ANEXO E. Columna estratigráfica generalizada de la formación Tibú-Mercedes en la zona del aeropuerto-Universidad Industrial de Santander del Municipio de Málaga Santander



ANEXO F. Mapa Geológico 1:5000 de la zona de estudio.



ANEXO G. Mapa Geológico 1:2000 de la zona de estudio.

