

**Estudio Para La Prospección De Aguas Subterráneas En La Zona Urbana Y Perimetral Del
Municipio De Málaga, Santander.**

José Miguel Tarazona

Natalia Rocio Rueda

Trabajo de grado – Modalidad pasantía de Investigación para optar al título de Geólogo

Director:

Luis Eduardo Moreno Torres

Ing. Civil.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas.

Escuela de Geología.

Bucaramanga

2018.

DEDICATORIAS

Dedicado a mis padres Mevis Mercado y Jose Euclides Tarazona que, con sus ejemplos, esfuerzos y sacrificios a lo largo de la vida, son los formadores más importantes de la persona que soy hoy en día al momento de escribir estas palabras y seguirán siéndolo.

A mis hermanos Mevis Juliana y Luis Daniel por sus múltiples consejos, paciencia y apoyo que me han brindado, desde las épocas que ya no tengo memoria, para ser un mejor ser humano.

A mis sobrinos, que por pequeñas acciones que nosotros los adultos hagamos sea un mundo mejor para las futuras generaciones.

A mis tíos, primos y amigos a lo largo de este tiempo, que me brindaron su apoyo, risas, consejos y amistad tanto en los momentos difíciles como en los buenos.

También le dedico este proyecto a la existencia, porque que sería sin ella.

José Miguel Tarazona Mercado.

Dedicado a quien fue, es y seguirá siendo siempre el hombre más importante de mi vida,

Ángel Miguel Rueda Gómez, Mi Padre. (Q.E.P.D)

Natalia Rocío Rueda.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi director de Tesis Ingiero Luis Eduardo Moreno que, por su apoyo en todo momento, por sus concejos no solo para el desarrollo del proyecto, tutoría y tiempo de dedicación, permitiendo desarrollar este trabajo no solo para nutrir la información para la Universidad sino permitir tener información disponible para poder ayudar los habitantes del Municipio de Málaga.

Agradezco también a mis compañeros de trabajo de campo Natalia Rueda, Angélica Salamanca y Jesús Rincón, quienes fueron parte importante para el desarrollo del trabajo, brindando apoyo que se necesitó que fue bastante y los buenos momentos.

Agradezco Jenifer Viviana Gonzáles y Diana Lucia Serrano por sus concejos, apoyo e información bibliográfica que fueron muy enriquecedores.

A la alcaldía de Málaga por su apoyo durante la fase de campo.

A Alfonso Palacio por el apoyo, al permitir la disponibilidad de tiempo para desarrollar las labores de este proyecto e información brindada.

A Daren Rodriguez por los concejos y guías durante el desarrollo del proyecto.

José Miguel Tarazona Mercado

Agradezco profundamente a las 3 personas que básicamente hicieron esto realidad, a mi director de tesis Luis Eduardo Moreno Torres, quien con sus enseñanzas nos enriqueció, de forma académica y personal, gracias nuevamente por ser ese profesor y ese ser humano especial que es.

Agradezco a Elkin Yesid Báez Suarez, por creer en mí, por su ayuda incondicional, y por darme fuerza para continuar, ya son 14 años desde que entraste a mi vida, para mal o para bien, doy las gracias porque has estado a mi lado.

Agradezco a mi compañero de tesis y amigo, José Miguel Tarazona, por su paciencia y comprensión en todas las situaciones que esta aventura nos trajo, y finalmente, agradezco a todas las personas y entidades que nos brindaron, su apoyo de diversas maneras facilitando la finalización de este proyecto.

Natalia Rocío Rueda.

Contenido

INTRODUCCIÓN _____	34
OBJETIVOS _____	35
OBJETIVO GENERAL. _____	35
OBJETIVOS ESPECÍFICOS. _____	35
LOCALIZACIÓN _____	35
1. MARCO TEÓRICO _____	36
1.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE GEOELÉCTRICA _____	40
1.1.1 DEFINICIÓN Y MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD. _____	42
1.1.2 MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUBSUELO _____	45
1.2 MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUBSUELO _____	52
1.2.1 SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES (SEV) _____	52
1.2.2 TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS (ERT O TRE). _____	58
1.2.3 PLANIFICACIÓN ESTÁNDAR PARA INICIAR UNA CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO. _____	66
1.2.4 PROCEDIMIENTO ESTÁNDAR PARA LA UBICACIÓN DEL DISPOSITIVO Y ADQUISICIÓN DE LOS DATOS. _____	67
1.2.5 PROCEDIMIENTO ESTÁNDAR PARA EL PROCESAMIENTO DE DATOS DE CAMPO. _____	68
1.2.6 PROCEDIMIENTO ESTÁNDAR PARA LA INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS. _____	70
2. MARCO GEOLÓGICO _____	71
2.1 LOCALIZACIÓN GEOLÓGICA _____	71
2.2 ASPECTOS ESTRATIGRÁFICOS. _____	72
2.3 TECTÓNICA _____	77
2.4 HIDROGRAFÍA _____	86
2.4.1 CUENCA HIDROGRÁFICA. _____	86
2.5 ASPECTOS DE HIDROGEOLÓGICOS _____	89
2.5.1 NUBOSIDAD Y TIEMPO DE LUZ SOLAR _____	89

2.5.2 HUMEDAD RELATIVA	90
2.5.3 EVOTRANSPIRACIÓN	91
2.5.4 CLASIFICACIÓN DEL CLIMA	92
2.5.5 ESCORRENTÍA MEDIA	93
2.6 GEOMORFOLOGÍA	96
3. METODOLOGÍA	99
3.1 ADQUISICIÓN DE DATOS CON TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS	99
3.1.1 EQUIPO DE REGISTRO	100
3.1.2 METODOLOGÍA DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS	101
3.2 ADQUISICIÓN DE DATOS CON SONDEOS VERTICALES ELÉCTRICOS.	103
3.2.1 EQUIPO DE REGISTRO	103
3.3 PROCESAMIENTO DE DATOS:	105
3.3.1 PROCESAMIENTO DE LAS TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS RESISTIVAS	105
4. TRABAJO DE CAMPO	112
4.1 DESCRIPCIÓN DE AFLORAMIENTOS ENCONTRADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO	112
4.1.1 AFLORAMIENTO 1: NORTE DEL MUNICIPIO	116
4.1.2 AFLORAMIENTO 2: SUR DEL MUNICIPIO	118
4.1.3 AFLORAMIENTO 3: CARRETERA HACIA LA VEREDA EL BARZAL	120
4.1.4 AFLORAMIENTO 4: LA VIRGEN, VÍA A SAN JOSÉ DE MIRANDA	123
4.2 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DONDE SE EVIDENCIA LA EXISTENCIA DE AGUA SUBTERRÁNEA	127
4.2.1 HUMEDAL EL MOLINO:	129
4.2.2 UIS:	131
4.2.3 AFLORAMIENTO AEROPUERTO (EXTREMO ORIENTAL):	132
4.2.4 POZO SECO Y SUMIDERO:	133
4.2.5 POZO DE AGUA CASTILLA REAL:	135
4.2.6 ALIIBE:	136
4.3 ADQUISICIÓN DE DATOS CON TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS DEL SUBSUELO	137

4.3.1 REGISTRO DE LOS PERFILES TOMOGRÁFICOS _____	137
4.3.1.1 Línea 1(El Estadio) _____	140
4.3.1.2Línea 2 (Aeropuerto) _____	141
4.3.1.3 Línea 3 (Guácimo). _____	142
4.3.1.4 Línea 4 (Laguna Seca). _____	142
4.3.1.5 Línea 5 (UIS 1). _____	143
4.3.1.6 Línea 6 (UIS 2). _____	144
4.3.2 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO. _____	145
4.4 ADQUISICIÓN DE DATOS CON SONDEOS VERTICALES ELÉCTRICOS. _____	147
4.4.1 LOCALIZACIÓN DE LOS SONDEOS VERTICALES ELÉCTRICOS _____	147
4.4.1.1Sondeos Verticales RCREA. _____	148
4.4.1.2 Sondeos Verticales RHOVI. _____	151
4.4.1.3 Sondeo Vertical RYERB. _____	154
5. TRATAMIENTO DE DATOS OBTENIDOS _____	155
5.1 PROCESAMIENTO Y TRATAMIENTO DE LA MUESTRA OBTENIDA EN CAMPO. _____	155
5.2 PROCESAMIENTO E INVERSIÓN DE DATOS OBTENIDOS CON TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS DEL SUBSUELO _____	160
5.2.1. LÍNEA 1: EL ESTADIO. _____	160
5.2.2 LÍNEA 2: AEROPUERTO _____	165
5.2.3 LÍNEA 3: GUÁCIMO _____	169
5.2.4 LÍNEA 4: LAGUNA SECA _____	173
5.2.5 LÍNEA 5: UIS1 _____	176
5.2.6 LÍNEA 6: UIS2 _____	180
5.3 TRATAMIENTO DE DATOS OBTENIDOS CON SONDEOS VERTICALES ELÉCTRICOS _____	183
5.3.1 SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL RCREA _____	183
5.3.2 SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL RHOVI _____	189
5.3.3 SONDE ELÉCTRICO VERTICAL RYERB _____	194
6. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS _____	197

6.1 MODELO GEOLÓGICO-ELÉCTRICO	197
6.1.1 INTERPRETACIÓN DE SEVS	198
6.1.1.1 Hacienda Oviedo	198
6.1.1.2 Sector norte del casco urbano de Málaga (Cartilla Real)	200
6.1.1.3 Sondeo Eléctrico Vertical Yerba Buena (RYERB)	202
6.1.2 INTERPRETACIÓN DE TOMOGRAFÍAS	205
6.1.2.1 Línea 1 (Estadio)	205
6.1.2.2 Línea 2 (Aeropuerto)	208
6.1.2.3 Línea 3 (Guácimo)	210
6.1.2.4 Línea 4 (Laguna Seca)	212
6.1.2.5 Línea 5 (UIS1)	214
6.1.2.6 Línea 6 (UIS2)	215
7.CONCLUSIONES	217
8.RECOMENDACIONES.	218
REFERENCIAS	219

Lista de Ilustraciones

- Ilustración 1: Localización del área de estudio.(1,2,3 y 4 , corresponden a las coordenadas que delimitan el área de estudio) 1148100 E – 1234704 N(1), 1149550 E - 1234704 N(2), 1148100 E - 1231048 N (3) y 149550 E - 1231048 N(4), arreglo elaborado por los autores con imágenes tomadas de Google Earth, las líneas rojas corresponden a las vías nacionales. 36
- Ilustración 2: Concepto de la unidad Hidrogeológica, teniendo en cuenta un acuífero confinado en la parte inferior una capa no muy permeable el cual se considera un acuitardo y en la parte superior un acuífero libre, la zona de recarga del acuífero libre, la zona de recarga del acuífero libre, la zona de recarga principal del acuífero confinado, y finalmente podemos observar tanto el nivel freático del acuífero libre como el nivel piezómetro del acuífero confinado. 40
- Ilustración 3:Metodos geoelectricos para prospección hidrogeológica.modificado de:(Auge 2008)
Modificado de: Miguel Auge, Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea, Universidad de Buenos Aires,Buenos Aires 2008..... 41
- Ilustración 4: Representación gráfica de la ley de Ohm tomado y modificado de CALVETTY AMBONI, B. 2004..... 42
- Ilustración 5: Se indica la variación en la resistividad de una solución en función de su concentración en CINA, observándose que para una concentración de 0,01 g/L (10 mg/L) la resistividad es de 400 ohm.m y para 100 g/L (100.000 mg/L) la resistividad disminuye a 0,01 g/L (10 mg/L) la resistividad es de 400 ohm.m y para 100 g/L (100.000 mg/L) la resistividad disminuye a 0,08 ohm.m, lo que implica una diferencia de unos 4 órdenes de magnitud. Tomado y modificado de CALVETTY AMBONI, B. 2004 44
- Ilustración 6: Distribución del agua en el subsuelo 45

Ilustración 7: Disposición electródica para la medición de la resistividad de una muestra en laboratorio.	46
Ilustración 8: Esquematación del flujo eléctrico de una corriente continua, a través de un medio isótropo y homogéneo de resistividad ρ , que se inyecta en el terreno por A, con una intensidad IA y sale del mismo por B (IB). tomado y modificado de CALVETTY AMBONI, B. 2004.	47
Ilustración 9: Líneas de corriente y superficies equipotenciales en las proximidades del electrodo A.....	48
Ilustración 10: flujo eléctrico en medio natural tomado y modificado de CALVETTY AMBONI, B. 2004.....	48
Ilustración 11: Configuración del dispositivo Schlumberger MODIFICADO DE (CALVETTY AMBONI, B. 1984).	49
Ilustración 12: Configuración del dispositivo Wenner (CALVETTY AMBONI, B. 1984).	50
Ilustración 13: Configuración dispositivos dipolares	50
Ilustración 14: Configuración dispositivos Polo – Dipolo. Tomado de Lascano et al 2005.	51
Ilustración 15: Configuración dispositivo Cuadrado. Tomado de Lascano et al 2005.....	52
Ilustración 16: Tipos de SEV para un dispositivo Schlumberger con sus longitudes y principal aplicación. CALVETTY AMBONI, B. 1984.	53
Ilustración 17: Paralelepípedo geológico afectado por la corriente en un dispositivo Schlumberger (CALVETTY AMBONI, B. 1984).....	55
Ilustración 18: La distribución de la corriente en el subsuelo, para una separación inicial A1B1 de corta distancia, lo que hace que esta circule sólo por la capa de resistividad ρ_1 y espesor h.	

En esta condición la resistividad aparente ρ_a es igual a la resistividad específica ρ_e . Al incrementar la distancia de los electrodos de corriente a $A_2 B_2$, ésta va a circular por las capas de resistividades ρ_1 y ρ_2 , por lo que en el valor de ρ_2 también incidirá ρ_1 y por ende la resistividad aparente de ρ_2 será distinta de su resistividad específica.. En el sector inferior de la figura se representa en relación logarítmica en el eje de las y a la resistividad aparente y en el de las x a $AB/2$, apreciándose una disminución de la resistividad en profundidad, por lo que $\rho_1 > \rho_2$, con valores que se obtienen a partir de las líneas asintóticas a las formas curvas.

(CALVETTY AMBONI, B. 1984).....	56
Ilustración 19: Esquema del “electrical imaging” tomado de (Serrano,2003).....	60
Ilustración 20: esquema del "Electrical tomography” tomado de (Serrano,2003).....	61
Ilustración 21: secuencia con dispositivo wenner tomado de (Serrano,2003).....	64
Ilustración 22: Esquema del dispositivo requerido. tomado de (Serrano,2003).....	64
Ilustración 23: Mapa geológico del área circundante de Málaga, la zona de color verde corresponde a rocas sedimentarias de edad cretácea, las zonas amarillas corresponden con rocas de edad “terciaria” (termino en desuso) lo que corresponde con la era cenozoica y depósitos cuaternarios en gris, arreglo elaborado por los autores utilizando imágenes tomadas del servicio geológico colombiano (plancha 136) y de google earth	71
Ilustración 24. Columna generalizada de la cuenca Catatumbo-Maracaibo, cuenca sedimentaria correspondiente al origen de la formación que compone la roca en donde está construido el municipio de Málaga.....	72
Ilustración 25:Se presenta el ambiente diagenético para la Formación Tibú Mercedes. Tomado de principios de sedimentación (Friedman and Sanders, 1978).	77

- Ilustración 26: Mapa de las provincias y bloques en el departamento de Santander según el Mapa Geológico Generalizado de Santander, modificado de Mapa de las provincias y bloques en el departamento de Santander, Royero y Clavijo, 2001. 79
- Ilustración 27: Representación en el mapa Geológico plancha 136 Málaga del área río Congreso-Málaga-Confluencia río Servitá-Chicamocha con el Sinclinal Málaga-Miranda (Vargas et al., 1981). Modificado por los autores de Mapa Geológico Plancha 136 Málaga..... 81
- Ilustración 28: Corte esquemático del área río Congreso-Málaga-Confluencia río Servitá-Chicamocha limitado al oeste por el río Guaca y al este por el río Servitá, y parte del Macizo de Santander. Todos los cortes van de este a oeste. Parte A modificado de Caballero y Sierra (1991), parte B obtenido de Julivert 1960. 82
- Ilustración 29: Mapa de geológico del Municipio de Málaga, contiene la litología y las fallas que están en el municipio .Tomado y modificado del Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Málaga (2015). 85
- Ilustración 30: Sistema de drenaje del municipio de Málaga. Fuente: revisión EOT (2015) 87
- Ilustración 31: fotografías de quebrada la Magnolia.(1) Quebrada Magnolia a su entrada al casco urbano municipal, el día 4 de mayo de 2015. (2) Canal de la quebrada Magnolia. Tramo inicial.(3) Canal de la quebrada Magnolia en su tramo inicial. Medidas: ancho 3.0 metros, profundidad del canal 1.60 m(4) Canal de la quebrada Magnolia a su paso por la carrera 9. Vista aguas arriba.(5). Canal de la quebrada Magnolia a su paso por la carrera 9. Vista aguas abajo. (6) Quebrada Magnolia a su salida del municipio de Málaga, en la confluencia con la Quebrada Seca. (Tomado y modificado del E.O.T(2015))..... 88

Ilustración 32: Fotografías tomadas de la quebrada molinos.(1) Quebrada Molinos a la entrada del área municipal. (2) Quebrada Molinos a su paso por el área municipal. Vista aguas bajo (3) Canal de la quebrada Molinos en el sector medio del casco urbano (4) Altura del agua, en la casa del aeropuerto, alcanzada por la creciente de la quebrada Molinos del día jueves 30 de abril de 2015.(5) Muro derribado por la creciente de la quebrada Molinos del día jueves 30 de abril de 2015, al frente de la casa del aeropuerto (6)Canal, en el cruce de la pista del aeropuerto, con las aguas de las quebradas Molinos y Tajamar, tomado y modificado del E.O.T.(2015)	88
Ilustración 33:. Valores de horas de brillo solar y la concentración de nubosidad (Octas) en la estación meteorológica Granja Tinagá. Fuente EOT Málaga 2015.....	90
Ilustración 34: Grafica de concertaciones de humedad relativa (%) en las estaciones de Granja Tinagá (municipio del Cerrito) y Capitanejo con la relación obtenida por los estudios del EOT Málaga 2015. Fuente EOT Málaga 2015.....	91
Ilustración 35:Tipos de clima según Caldas-Lang en el municipio de Málaga. Fuente EOT Málaga 2015.....	93
Ilustración 36: Geoformas de tipo estructural ubicados en el municipio de Málaga, la foto pertenece al trabajo de grado de Rueda y Tavera, 2016.....	98
Ilustración 37: Componentes del equipo utilizado (tomógrafo). Fotografías tomadas en campo	101
Ilustración 38: Fotografías del montaje de los electrodo.....	102
Ilustración 39:Electrodos pasivos tipo “Take-outs”. Estacas de acero inoxidable diseñadas para sostener los electrodos.Tomado de Página web de la Advanced Geosciences, Inc.....	102

Ilustración 40:Equipo de registro utilizado para La adquisición de los sondeos eléctricos verticales se realizó con el instrumento ABEM Terrameter SAS 1000 desarrollado por la compañía ABEM Instrument AB.	104
Ilustración 41: Realización del montaje en campo del equipo de registro para los sevs.	105
Ilustración 42: Selección de la característica del archivo a importar.....	106
Ilustración 43: Selección de parámetros para procesar la adquisición en el software Earthimager 2D.....	107
Ilustración 44: Selección de Opción para importar la topografía de la extensión de la tomografía.	108
Ilustración 45: Selección de Archivo XXX.trn donde se encuentra la topografía.....	109
Ilustración 46: Resultado de la inversión de la topografía en la inversión de datos en la tomografía.	109
Ilustración 47:Grafica en donde se observa la relación de interacción en contra del error que tenía la sección invertida durante esa interacción, a medida que avanza se observa que disminuye.	110
Ilustración 48:A). Se observa una sección que utiliza los puntos para crear zonas que no están en armonía en la pseudosección, observándose a medida que cambian el color verde por zonas a razón que el error incrementa positivamente o negativamente. B). Se observa los datos en los puntos tomados por el tomógrafo no acordes o que varían en comparación con la sección resultante del proceso por puntos que presentan el error a medida que cambian de color.	111
Ilustración 49: Gráfica que muestra la relación entre la resistividad aparente medida y resistividad aparente predicha o calculada ideal y obtenida en el procesamiento.....	112

Ilustración 50. Ubicación de Afloramientos y Puntos de agua.	113
Ilustración 51: Columna generalizada de la zona.	114
Ilustración 52: Fotografías correspondientes al Afloramiento 1 donde podemos observar el tamaño de las muestras fósiles encontradas.	117
Ilustración 53: Fotografía panorámica del Afloramiento 2, la roca se presenta de forma masiva y muy diaclasada, por lo tanto no se puede diferenciar estratificación.	118
Ilustración 54: Fotografía de las evidencias fósiles del Afloramiento 2.	119
Ilustración 55: Fotografías donde podemos evidenciar bivalvos encontrados en pequeños afloramientos encontrados en la parte este de la sede de la universidad industrial en Málaga.	119
Ilustración 56: Fotografía del Afloramiento 3, haciendo un acercamiento para poder evidenciar la intercalación de material compacto y disgregado.	121
Ilustración 57: Foto de la calcita encontrada.	122
Ilustración 58: Fotografía panorámica del Afloramiento 4, siendo la base en el extremo izquierdo (naranja) y el tope hacia el lado derecho (amarillo).	124
Ilustración 59: Fotografía de la evidencia fósil encontrada en el afloramiento 4.	125
Ilustración 60: Columna estratigráfica del afloramiento 4.	126
Ilustración 61: Mapa de los puntos de agua en el municipio de Málaga.	128
Ilustración 62: Humedal El Molino.	129
Ilustración 63: Fotografía que delimita el humedal (Azul) y muestra la cercanía de esta área a la línea tomográfica 2 ubicada en el aeropuerto del Municipio de Málaga (amarillo).....	130

Ilustración 64: Afloramiento de agua aledaño a la Universidad Industrial de Santander sede Málaga, denominado Punto de agua UIS.....	131
Ilustración 65:Punto denominado Afloramiento Aeropuerto (Extremo Oriental). A la Izquierda se observa el nacimiento o donde surge el agua. A la derecha se observa la acumulación del agua que surge y parte del caudal.....	132
Ilustración 66:Pozo seco observable a la derecha de la foto y el sumidero observable al fondo en la parte inferior de la foto, donde se encuentra la concentración de basura.	133
Ilustración 67:Pozo visiblemente seco con vegetación dentro. A la derecha la quebrada que desaparece a pocos metros del punto donde se tomó la foto en la pared de suelo.....	134
Ilustración 68: Pozo de agua Castilla Real.	135
Ilustración 69: Aljibe.	136
Ilustración 70:Ubicación de las tomografías en el municipio de Málaga, Santander, imagen tomada y modificada de Google Earth.	137
Ilustración 71:Ubicación de la tomografía eléctrica resistiva Estadio en el municipio de Málaga, Santander. El eje del sinclinal se obtuvo a partir de la Geología de la Plancha 136 Málaga del Servicio Geológico Colombiano 1984. La imagen de fondo se obtuvo de Google Earth. .	140
Ilustración 72: Ubicación de la tomografía eléctrica resistiva Aeropuerto en el municipio de Málaga, Santander. El eje del sinclinal se obtuvo a partir de la Geología de la Plancha 136 Málaga del Servicio Geológico Colombiano 1984. La imagen de fondo se obtuvo de Google Earth.....	141

Ilustración 73:Ubicación de la tomografía eléctrica resistiva Guasimo en el municipio de Málaga, Santander. El eje del sinclinal se obtuvo a partir de la Geología de la Plancha 136 Málaga del Servicio Geológico Colombiano 1984. Imagen de fondo tomada de Google Earth.....	142
Ilustración 74:Ubicación de la tomografía eléctrica resistiva Laguna Seca en el municipio de Málaga, Santander. El eje del sinclinal se obtuvo a partir de la Geología de la Plancha 136 Málaga del Servicio Geológico Colombiano 1984.....	143
Ilustración 75:Ubicación de la tomografía eléctrica resistiva UIS 2en el municipio de Málaga, Santander. El eje del sinclinal se obtuvo a partir de la Geología de la Plancha 136 Málaga del Servicio Geológico Colombiano 1984. La imagen de fondo se obtuvo de Google Earth. .	144
Ilustración 76:Ubicación de la tomografía eléctrica resistiva UIS 2 en el municipio de Málaga, Santander. El eje del sinclinal se obtuvo a partir de la Geología de la Plancha 136 Málaga del Servicio Geológico Colombiano 1984. La imagen de fondo se obtuvo de Google Earth. .	145
Ilustración 77: Toma de datos topográficos utilizando los electrodos como referencia.	146
Ilustración 78:Ubicación de los sondeos eléctricos verticales realizados durante la campaña de geofísica en el municipio de Málaga, Santander.	147
Ilustración 79:Ubicación en el municipio de Málaga del sondeo eléctrico vertical RCREA.....	148
Ilustración 80: Adquisición de datos del sondeo eléctrico vertical RHOVI.	151
Ilustración 81: Fotografía del Afloramiento 2 en el sector Sur del Municipio de Málaga.	155
Ilustración 82: Bloque de muestra cortado para analizar.....	156
Ilustración 83: Equipo y bloque adecuado en un contenedor para su análisis.....	157
Ilustración 84: Inicio de la prueba en condiciones secas.	158
Ilustración 85:Prueba de resistividad en roca caliza en condiciones húmedas.	159

Ilustración 86:Prueba de resistividad en roca caliza en condición saturada.	160
Ilustración 87: Procesamiento de la tomografía del sector del Estadio. La imagen superior corresponde con la pseudisección aparente de resistividad medida, la imagen del medio corresponde con la pseudosección aparente de resistividad calculada y la imagen inferior corresponde con la sección de resistividad invertida siendo el resultado del proceso.....	161
Ilustración 88: Curva de interacción versus error de inversión.	161
Ilustración 89: Secciones Misfit” de la tomografía del sector del Estadio. A). Se observa los puntos que no están en armonía en la pseudosección. B). Se observa los datos no acordes en la gráfica de dispersión de la tomografía.	162
Ilustración 90: Relación entre la resistividad aparente medida y la resistividad aparente predicha o calculada en la tomografía realizada en la zona del estadio.	163
Ilustración 91:Seccion eléctrica invertida de la tomografía en el sector del Estadio. 1). Sección de resistividad invertida con la escala de colores desde la resistividad más baja leída a la más alta. 2). Sección de resistividad invertida con la escala de colores unificada para todas las tomografías hechas en el municipio de Málaga.....	164
Ilustración 92:Tomografía eléctrica resistiva del sector del Aeropuerto. A) se observa la pseudosección de resistividad aparente obtenida en campo. B) se observa la pseudosección obtenida al calcular la resistividad aparente. C) Se observa la sección de resistividad invertida.	165
Ilustración 93: Gráfica de interacciones versus error del procesamiento de la tomografía echa en el sector del Aeropuerto.	166

Ilustración 94: Graficas que muestra zonas y puntos que se alejan entre el modelo teórico y obtenido en campo, presentando variación a medidas que menos concuerdan en la tomografía eléctrica resistiva del Aeropuerto.	166
Ilustración 95: Relación entre los puntos obtenidos en campo con los puntos calculados o predichos.	167
Ilustración 96: Sección de resistividad invertida de la zona del aeropuerto, siendo la imagen 1 la obtenida por el programa desde el dato de resistividad más alto al más bajo y la imagen 2 la sección unificada en la escala de colores.	168
Ilustración 97: Datos procesados de la tomografía eléctrica resistiva del sector vía Guácimo. A) Pseudosección de datos obtenidos en campo. B) Pseudosección de datos obtenidos por cálculo del software EarthImager 2D. C) Sección de resistividad invertida obtenida.	169
Ilustración 98: Gráfica de interacciones versus error, del procesamiento de la tomografía eléctrica resistiva del sector vía Guácimo.	170
Ilustración 99: Zonas y puntos obtenidos que no se ajustan al modelo obtenido o diferencian del modelo teórico aumentando su error del procesamiento la sección obtenida de adquisición realizada en el sector vía Guácimo.	170
Ilustración 100: Grafica puntos medidos versus datos de puntos obtenidos en el procesamiento de la tomografía del sector vía Guácimo.	171
Ilustración 101: Sección de resistividad invertida de la zona de la vía Guasimo-Naranjitos, siendo la imagen 1 la obtenida por el programa desde el dato de resistividad más alto al más bajo y la imagen 2 la sección unificada en la escala de colores.	172

- Ilustración 102: Datos procesados de la tomografía eléctrica resistiva del sector de Laguna Seca.
 A) Pseudosección de datos obtenidos en campo. B) Pseudosección de datos obtenidos por cálculo del software EarthImager 2D. C) Sección de resistividad invertida obtenida..... 173
- Ilustración 103: Gráfica de interacciones versus error, del procesamiento de la tomografía eléctrica resistiva del sector de Laguna Seca. 173
- Ilustración 104: Datos anómalos o no acordes del procesamiento de datos de la tomografía del sector de Laguna Seca. A). Se observa los puntos que no están en armonía en la pseudosección. B). Se observa los datos no acordes en la gráfica de dispersión de la tomografía. 174
- Ilustración 105: Relación entre los puntos obtenidos en campo con los puntos calculados o predichos en el procesamiento de la tomografía realizada en el sector de Laguna Seca. ... 174
- Ilustración 106: Sección de resistividad invertida de la zona de Laguna Seca, siendo la imagen 1 la obtenida por el programa desde el dato de resistividad más alto al más bajo y la imagen 2 la sección unificada en la escala de colores. 175
- Ilustración 107: Datos procesados de la tomografía eléctrica resistiva UIS 1 en los predios al norte de la Universidad Industrial de Santander sede Málaga. A) Pseudosección de datos obtenidos en campo. B) Pseudosección de datos obtenidos por cálculo del software EarthImager 2D. C) Sección de resistividad invertida obtenida. 177
- Ilustración 108: Gráfica de interacciones versus error, del procesamiento de la tomografía eléctrica resistiva UIS1 en la Universidad Industrial de Santander sede Málaga. 177
- Ilustración 109: Datos anómalos o no acordes del procesamiento de datos de la tomografía UIS1 en la Universidad Industrial de Santander sede Málaga. A). Se observa las zonas que no están

en armonía en la pseudosección. B). Se observa los datos por cada punto no acordes en la gráfica de dispersión de la tomografía.	178
Ilustración 110:Relación entre los puntos obtenidos en campo con los puntos calculados o predichos en el procesamiento de la tomografía UIS1 realizada en la Universidad Industrial de Santander sede Málaga.....	178
Ilustración 111: Datos procesados de la tomografía eléctrica resistiva UIS1 del sector en la Universidad Industrial de Santander sede Málaga. A) Pseudosección de datos obtenidos en campo. B) Pseudosección de datos obtenidos por cálculo del software EarthImager 2D. C) Sección de resistividad invertida obtenida.....	179
Ilustración 112: Datos procesados de la tomografía eléctrica resistiva UIS 2 en los predios al norte de la Universidad Industrial de Santander sede Málaga. A) Pseudosección de datos obtenidos en campo. B) Pseudosección de datos obtenidos por cálculo del software EarthImager 2D. C) Sección de resistividad invertida obtenida.....	180
Ilustración 113: Gráfica de interacciones versus error, del procesamiento de la tomografía eléctrica resistiva UIS2 en la Universidad Industrial de Santander sede Málaga	181
Ilustración 114: Datos anómalos o no acordes del procesamiento de datos de la tomografía UIS2 en la Universidad Industrial de Santander sede Málaga. A). Se observa las zonas que no están en armonía en la pseudosección. B). Se observa los datos por punto no acordes en la gráfica de dispersión de la tomografía.	181
Ilustración 115:Relación entre los puntos obtenidos en campo con los puntos calculados o predichos en el procesamiento de la tomografía UIS2 realizada en la Universidad Industrial de Santander sede Málaga.....	182

Ilustración 116: Datos procesados de la tomografía eléctrica resistiva UIS2 del sector en la Universidad Industrial de Santander sede Málaga. A) Pseudosección de datos obtenidos en campo. B) Pseudosección de datos obtenidos por cálculo del software EarthImager 2D. C) Sección de resistividad invertida obtenida.....	182
Ilustración 117: procesamiento del SEV RCREA1 utilizando el IP2Win con un error del 0.745% entre las líneas obtenidas	184
Ilustración 118: Curva obtenida a partir de los datos obtenidos en campo en color negra, curva teórica obtenida a partir del proceso hecho por el programa IP2Win en color roja y capas obtenidas a partir de la curva teórica vistas en la línea azul para RCREA2.	185
Ilustración 119: Corte de resistividades RCREA obtenido del sondeo eléctrico vertical RCREA1 a la derecha y RCREA2 a la izquierda.	187
Ilustración 120: Pseudosección RCREA obtenido por los sondeos eléctricos verticales RCREA1 y RCREA2.	188
Ilustración 121: Se observa la curva con los datos obtenidos en campo de color negro en contra de la curva teórica obtenida por el programa a partir de método numérico de color rojo y la escala de color azul con los espesores de las capas resistivas y así obtener una sección geolétrica del subsuelo para RHOVI1.	189
Ilustración 122: Curva teórica para RHOVI2.	191
Ilustración 123: Capas identificadas por la curva teórica a partir de las resistividades encontradas a profundidad de los puntos RHOVI1 a la izquierda y RHOVI2 a la derecha.	192
Ilustración 124: Pseudosección realizada por el programa IP2WIN a partir de las curvas teóricas de los sondeos eléctricos verticales RHOVI1 y RHOVI2.	193

Ilustración 125: Curva obtenida con los datos recolectados en campo (negra), curva teórica obtenida según el mejor ajuste a la curva de puntos obtenidos en campo y división por capas resistivas obtenida a partir de la curva teórica (azul).....	194
Ilustración 126: Sección resistiva del Sondeo Eléctrico Vertical realizado en la zona de Yerba Buena al Sur del Municipio de Málaga originado a partir del procesamiento de los datos obtenidos de campo en el Software IP2Win versión 7.01.03 de la Universidad estatal de Moscú.....	196
Ilustración 127: Perfil sugerido del subsuelo en el sector de la Hacienda El Oviedo.	198
Ilustración 128: posible Columna litológica a partir de la interpretación de los sondeos eléctricos verticales RCREA_1 y RCREA_2.....	200
Ilustración 129: Sección geo-eléctrica de la zona Yerba Buena al sur del municipio de Málaga.	203
Ilustración 130: Rocas y suelos que componen la sección en la que fue hecha la tomografía Estadio.	205
Ilustración 131: Suelo y rocas que compone la tomografía del Aeropuerto.	208
Ilustración 132: Rocas y suelos que componen la sección en la que fue hecha la tomografía denominada Guácimo.	210
Ilustración 133: Rocas y suelos que componen la sección en la que fue hecha la tomografía denominada Laguna Seca.	212
Ilustración 134: Rocas y suelos que componen la sección en la que fue hecha la tomografía denominada UIS 1.....	214

Ilustración 135:Rocas y suelos que componen la sección en la que fue hecha la tomografía denominada UIS 2.....	215
--	-----

Lista de tablas

Tabla 1: Balance hídrico del suelo a 2300 m.s.n.m. en el municipio de Málaga. Fuente EOT Málaga 2015.....	91
Tabla 2: Datos de esorrentía media en l/s por hectárea. Tomado del E.O.T. Málaga 2015.....	94
Tabla 3: Caudales máximos en la quebrada Magnolia para un periodo de retorno de 2,10, 20, 50, 100 años, con un periodo de duración de 24, 6 y 4 horas. Tomado del E.O.T Málaga, 2015.	95
Tabla 4: Tabla. Caudales máximos en la quebrada Molinos para un periodo de retorno de 2,10, 20, 50, 100 años, con un periodo de duración de 24, 6 y 4 horas. Tomado del E.O.T Málaga, 2015.....	96
Tabla 5: Importancia de cada formación.	115
Tabla 6: Cuadro comparativo de las rocas calcáreas encontradas en los afloramientos de norte a sur del municipio de Málaga.	115
Tabla 7: Datos estructurales de familias de diaclasas encontradas.	117
Tabla 8: Información estructural de diaclasas y estratificación del afloramiento 3	123
Tabla 9: Datos estructurales de diaclasas y estratificación en el afloramiento 4.....	126
Tabla 10: Resumen con los datos más importantes de cada línea.	138
Tabla 11: Coordenadas del punto inicial punto medio y punto final de cada línea topográfica.	139
Tabla 12: Registro del sondeo vertical eléctrico RCREA1.....	149
Tabla 13: Registro del sondeo vertical eléctrico RCREA2.	150
Tabla 14: registro del sondeo vertical eléctrico RHOVI1	152

Tabla 15:Registro del sondeo vertical eléctrico RHOVI2 a 49 metros de distancia del RHOVI1	153
Tabla 16: registro del sondeo vertical eléctrico RYERB.....	154
Tabla 17: Resultados de resistividad en roca caliza en condiciones secas.	157
Tabla 18: Resultados de resistividad en roca caliza en condición húmeda.	158
Tabla 19:Resultados de resistividad en roca caliza en condición saturada.....	159
Tabla 20: rangos de resistividad usados para la diferenciación de zonas en las secciones eléctricas invertidas para la línea 1.	163
Tabla 21: Rangos de resistividad usados para la diferenciación de zonas en las secciones eléctricas invertidas para la línea 2.	168
Tabla 22:rangos de resistividad usados para la diferenciación de zonas en las secciones eléctricas invertidas para la línea 3.	172
Tabla 23: Rangos de resistividad usados para la diferenciación de zonas en las secciones eléctricas invertidas para la línea 4.....	175
Tabla 24: Rangos de resistividad usados para la diferenciación de zonas en las secciones eléctricas invertidas para la línea 5.....	179
Tabla 25:Rangos de resistividad usados para la diferenciación de zonas en las secciones eléctricas invertidas para la línea 6.	183
Tabla 26:Tabla de resultado del procesamiento en el Software IP2Win (Lite) Versión 7.01.03 para el SEV RCREA1.....	184
Tabla 27:Resultado del procesamiento en el Software IP2Win (Lite) Versión 7.01.03 para el SEV RCREA1.....	184

Tabla 28: Taba de resultado del procesamiento en el Software IP2Win (Lite) Versión 7.01.03 para el SEV RCREA2.....	186
Tabla 29: Resultado del procesamiento en el Software IP2Win (Lite) Versión 7.01.03 para el SEV RCREA2.	186
Tabla 30: Taba de resultado del procesamiento en el Software IP2Win (Lite) Versión 7.01.03 para el SEV RHOVI1 donde se muestran las capas resultantes según la curva teórica.	190
Tabla 31: Resultado del procesamiento en el Software IP2Win (Lite) Versión 7.01.03 para el SEV RHOVI1	190
Tabla 32: Taba de resultado del procesamiento en el Software IP2Win (Lite) Versión 7.01.03 para el SEV RHOVI2	191
Tabla 33: Resultado del procesamiento en el Software IP2Win (Lite) Versión 7.01.03 para el SEV RHOVI2, basados en Cárdenas y Galvis (2011).	192
Tabla 34: Secuencias resistivas obtenidas al procesar en el software IP2Win versión 7.01.03 del sondeo eléctrico vertical en la zona de Yerba Buena – Laguna Seca en el municipio de San Jose de Miranda al sur del municipio de Málaga.....	195
Tabla 35: Resultado del procesamiento en el Software IP2Win (Lite) Versión 7.01.03 para el SEV RYERB.	195

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO PARA LA PROSPECCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA ZONA URBANA Y PERIMETRAL DEL MUNICIPIO DE MÁLAGA, SANTANDER^{1*}

AUTOR: JOSE MIGUEL TARAZONA MERCADO, NATALIA ROCIO RUEDA^{2**}

PALABRAS CLAVES: Geoeléctrica, Agua subterránea, Acuífero.

DESCRIPCION:

Cerca de dos mil millones de personas, aproximadamente una tercera parte de la población mundial, dependen del aprovisionamiento de aguas subterráneas y extraen cerca del 20 por ciento del agua total del planeta (entre 600 y 700 km³) por año, del cual gran parte proviene de acuíferos superficiales. El Municipio de Málaga históricamente ha presentado problemas en el abastecimiento de agua especialmente porque no cuenta con la oferta ambiental que supla la dotación mínima para cubrir los requerimientos del total de su población y sus necesidades industriales, comerciales e institucionales en general. Con el fin de localizar fuentes alternas para el abastecimiento de agua, se realizó una caracterización del subsuelo por medio de tomografías eléctricas y sondeos verticales eléctricos, correlacionando la información de las resistividades obtenidas y de la información existente, se estimó, la zona con potencial hidrogeológico existente. Después del análisis de los datos compilados, se caracterizó una roca con capacidad de almacenamiento y transporte de agua entre los 50 y 70 metros de profundidad bajo el perímetro del casco urbano del municipio de Málaga, por lo tanto, esta capa de roca tiene altísimas posibilidades de ser utilizada en futuras captaciones de agua para el acueducto municipal de Málaga.

***Trabajo de Grado**

**** Facultad De Ingenierías Físico Químicas, Escuela De Geología. Director: Luis Eduardo Moreno Torres. Ingeniero Civil.**

ABSTRACT

TITLE: STUDY FOR THE PROSPECTION OF UNDERGROUND WATERS IN THE URBAN AND PERIMETRIC AREA OF THE MUNICIPALITY OF MÁLAGA, SANTANDER1*

AUTHOR: JOSE MIGUEL TARAZONA MERCADO, NATALIA ROCIO RUEDA2**

KEY WORDS: Geoelectric, Groundwater, Aquifer.

DESCRIPTION:

Nearly two billion people, approximately one third of the world's population, depend on the supply of groundwater and extract about 20 percent of the planet's total water (between 600 and 700 km³) per year, much of which comes from surface aquifers and Many people in rural areas are completely dependent on groundwater. During the course of history the Municipality of Malaga has presented problems with its water provision especially since it does not count with the environmental supply of the liquid required to meet the needs of its population and its industrial, commercial and institutional sectors in general. In order to locate alternative sources for water supply, a characterization of the subsoil was made by means of electrical topographies and vertical electrical sounding; A potential hydrogeological zone in the studied area was estimated by correlating the obtained information of the resistivities and the existing information. After the analysis of the compiled data, a rock with storage capacity and water transport was characterized between 50 and 70 meters deep under the perimeter of the urban area of the municipality; this layer of rock has very high possibilities of being used in future water catchments for the municipal aqueduct of Malaga.

Introducción

El Municipio de Málaga históricamente ha presentado problemas en el abastecimiento de agua especialmente porque no cuenta con la oferta ambiental que supla la dotación mínima para cubrir los requerimientos del total de su población y sus necesidades industriales, comerciales e institucionales en general. Con el fin de localizar fuentes alternas para el abastecimiento de agua, se realizó una caracterización del subsuelo por medio de tomografías eléctricas y sondeos verticales eléctricos, correlacionando la información de las resistividades obtenidas y de la información existente, se estimó, la zona con potencial hidrogeológico existente. Después del análisis de los datos compilados, se caracterizó una roca con capacidad de almacenamiento y transporte de agua entre los 50 y 70 metros de profundidad bajo el perímetro del casco urbano del municipio de Málaga, por lo tanto, esta capa de roca tiene altísimas posibilidades de ser utilizada en futuras captaciones de agua para el acueducto municipal de Málaga.

Cerca de dos mil millones de personas, aproximadamente una tercera parte de la población mundial, dependen del aprovisionamiento de aguas subterráneas y extraen cerca del 20 por ciento del agua total del planeta (entre 600 y 700 km³) por año, del cual gran parte proviene de acuíferos superficiales. Muchos habitantes de zonas rurales dependen completamente de las aguas subterráneas (UNEP 2002).

EXPLORACIÓN o PROSPECCIÓN, son términos similares que significan búsqueda y en relación a la Hidrogeología, se refieren a la ubicación de reservorios de agua subterránea con características tales que resulten apropiadas para una posterior explotación o aprovechamiento del recurso. Los métodos de exploración hidrogeológica se pueden clasificar en forma general, como aquellos que emplean técnicas de aplicación directa o indirecta. (AUGE, 2008)

Objetivos

Objetivo General.

Aplicación de métodos Geo Eléctricos (Sev`s y TRE) para caracterizar los miembros con vocación acuífera en el subsuelo, en la periferia del casco urbano del municipio de Málaga, Santander

Objetivos específicos.

- Realización del mapa hidrográfico a escala 1:2000 de la zona de estudio con ubicación de afloramientos y puntos de agua.
- Ejecución e interpretación de una campaña de prospección geoelectrica con tomografías para la zona de estudio.
- Ejecución e interpretación de una campaña de prospección geoelectrica con sondeos eléctricos verticales para la zona de estudio.
- Identificación de zonas en el subsuelo con vocación acuífera.

Localización

El área de estudio se encuentra en el cuadrángulo formado por las coordenadas (ver Ilustración 1), alrededor del casco urbano del municipio de Málaga en la provincia García Rovira, en el departamento de Santander, con una superficie aproximada de 3 km², geológicamente en el bloque Andes del norte o Norandino según los trabajos de Kellog (1984); Case et al.(1984); James (1985) y Boinet (1985) citados en Royero y Calvijo (2001) de la Placa Suramericana, estructuralmente compleja.

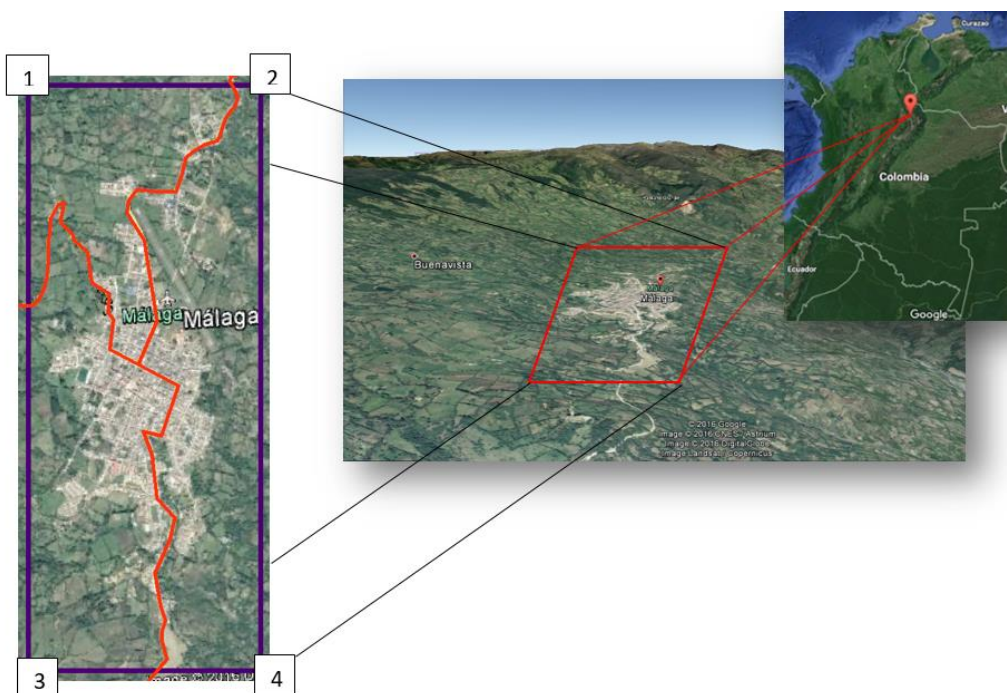


Ilustración 1: Localización del área de estudio.(1,2,3 y 4 , corresponden a las coordenadas que delimitan el área de estudio) 1148100 E – 1234704 N(1), 1149550 E - 1234704 N(2), 1148100 E - 1231048 N (3) y 149550 E - 1231048 N(4), arreglo elaborado por los autores con imágenes tomadas de Google Earth, las líneas rojas

1. Marco Teórico

El ciclo hidrológico contempla por un lado, el movimiento ascendente por evaporación de la superficie de la tierra ya sean cuerpos de vapor de agua, retenida en hojas por el fenómeno de interceptación por lluvias sobre áreas vegetales o transpiración de la vegetación, y descendiente por precipitaciones seguida de escorrentía superficial, sub superficial, y subterráneas siguiendo gradientes hidráulicos regionales.

El agua Subterránea se origina por el agua superficial que se infiltra a través de grietas, poros de las rocas y sedimentos que yacen debajo de la superficie de la tierra, acumulándose en las capas no consolidadas, rocas porosas del subsuelo o lugar donde reúna las condiciones para su

retención. El agua se almacena y mueve en las formaciones geológicas que tienen poros o vacíos a estas formaciones, si almacenan agua en gran cantidad, la transmiten en gran cantidad y la drenan en condiciones iguales las llamamos acuíferos, capas en las que podemos encontrar materiales muy variados como gravas de río, limos, calizas muy agrietadas o cavernosas, areniscas porosas poco cementadas, arenas de playa, algunas formaciones volcánicas, depósitos de dunas e incluso ciertos tipos de arcilla en rocas sedimentarias. (INGEOMINAS 2011)

El nivel superior del agua subterránea que se encuentra a presión atmosférica se denomina nivel freático. Los diferentes depósitos de agua y el medio que lo contienen, se pueden clasificar según el comportamiento hidrodinámico (acuífero, acuitardo, acuícludo, acuífugos) o según el comportamiento hidráulico, como acuífero libre, semi libre, acuífero confinado o semi-confinado según corresponda. El término *Acuífero* se define como una formación geológica la cual permite la fácil circulación del agua a través de ella y por ende su drenaje, usualmente un acuífero se presenta en rocas sedimentarias de tamaño de grano grueso que permita que haya porosidad efectiva (comunicación continua entre poros que participa realmente en la circulación del agua) y en rocas metamórficas o rocas ígneas altamente fracturadas. El *acuitardo* se refiere a una formación geológica con cantidades almacenadas de agua considerablemente altas pero de difícil circulación y por ende pésimo drenaje; el *acuícludo* es una formación geológica con contenidos de agua altos pero el agua no circula a través de ella por ende no drena, estos casos se asocian a formaciones con contenido de arcillas o limos; y por último, los *acuífugos* son formaciones geológicas que no contienen agua ya que no reúne las condiciones para que el agua este presente a través de él, se presenta en rocas ígneas y metamórficas masivas o que no estén fracturadas (Sánchez, 2011).

En el contexto geológico, una *unidad hidrogeológica* comprende todas las formaciones donde atraviesa el mismo mecanismo de flujo hídrico tanto en entrada de agua, salida y balance, sea en su totalidad un acuífero o reúna varios tipos de acuíferos, acuitardos o acuíclados de tal manera que se debe estudiar conjuntamente, aunque según las características de cada tipo de unidad hidrogeológica se subdivide en unidades menores.

La *porosidad* es uno de los parámetros más importantes que conforman los acuíferos, se dividen de acuerdo a su naturaleza y características, estas son la porosidad total que involucra todos los espacios vacíos o que no contienen material mineral en una muestra de roca o suelo, la *porosidad eficaz* corresponde entonces a los espacios dentro de la roca que almacenan agua pero que no la retienen por la adhesión a los granos o capilaridad y la *porosidad efectiva* la cual es la porosidad interconectada entre sí que permite el flujo hídrico como si fuese un ducto desde el punto de recarga hasta la salida del acuífero o zona donde se almacena (Sánchez, 2011). Adicionalmente se puede generar porosidad o conductos por donde se desplaza el agua debido a acciones posteriores después de la formación de la roca, a esto se le denomina *porosidad secundaria*, un ejemplo de esto es el diaclasamiento producido por esfuerzos que fracturan la roca formando fisuras por las cuales dependiendo de las características del medio y la roca puede convertirse en conductos por el cual viaja y se almacena el agua.

Los suelos en forma general tienen un nivel de saturación de agua, este punto donde el agua alcanza su nivel de saturación máxima se denomina nivel freático, en donde la presión del agua y la atmosférica es igual, a cambio, cuando dichas presiones no corresponden, se le denomina nivel piezométrico, propio de los depósitos de agua aislados de la atmósfera por capas de roca o suelos sello (muy finos o masivos).

Los tipos de acuíferos son los libres, los confinados y los semiconfinados, los semi libres son en forma general poco comunes. Los acuíferos libres son aquellos en que el nivel freático y el nivel piezométrico corresponden, lo que quiere decir que la presión atmosférica afecta directamente al acuífero afectando su espesor (espesor freático, napas freáticas o tabla de agua). En cambio los acuíferos confinados su límite superior (nivel de saturación) se encuentra a una presión superior a la atmosférica ya que está ésta aislado y su espesor equivale a la competencia de la la unidad geológica que lo contenga. Los acuíferos semiconfinados son acuíferos que cumplen con las condiciones de un acuífero confinado pero parte de su sistema actúa como acuitardo permitiendo filtraciones de agua que provienen de un acuífero libre supra yacente.

La *conductividad hidráulica* (parámetro que introdujo Darcy al promulgar la ley empírica que rige el movimiento de las aguas subterráneas) comúnmente se confunde con la *permeabilidad* y se entiende como el caudal ($m^3/día$, basado en la Ley de Darcy) y el gradiente hidráulico (variación en altura piezométrica del acuífero/ variación de la longitud del acuífero, basado en la Ley de Darcy), actuando como el volumen de agua que pasa por unidad de Área dependiendo de la porosidad eficaz del medio cuando el gradiente piezométrico también es unitario. La *transmisividad* es la cantidad de agua que circula horizontalmente por formaciones geológicas teniendo en cuenta tanto el espesor como la permeabilidad. (Sanchez, 2014).

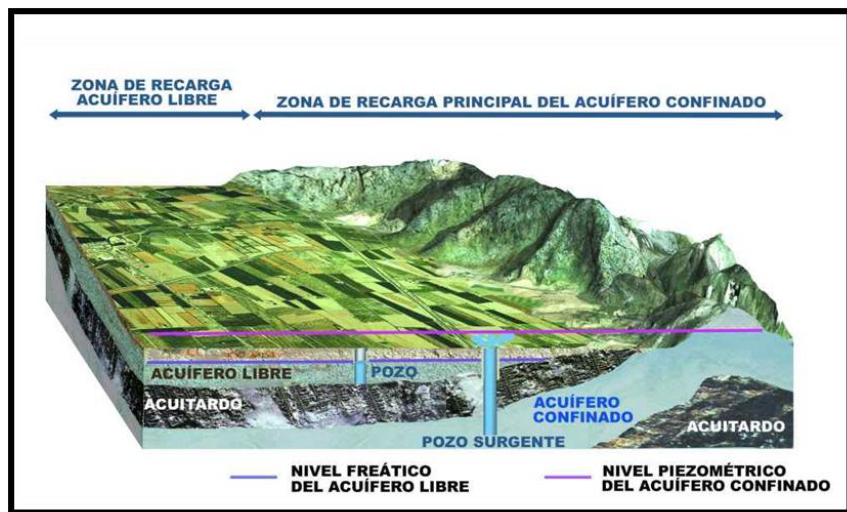


Ilustración 2: Concepto de la unidad Hidrogeológica, teniendo en cuenta un acuífero confinado en la parte inferior una capa no muy permeable el cual se considera un acuitardo y en la parte superior un acuífero libre, la zona de recarga del acuífero libre, la zona de recarga principal del acuífero confinado, y finalmente podemos observar tanto el nivel freático del acuífero libre como el nivel piezómetro del acuífero confinado.

1.1 Conceptos Básicos De Geoelectrica

La GEOELÉCTRICA conforma la rama de la Geofísica que trata sobre el comportamiento de rocas y sedimentos en relación a su respuesta cuando se inyecta en ellos una corriente eléctrica. Los métodos geoelectricos más empleados en Hidrogeología se basan precisamente en la inyección artificial de una corriente eléctrica (sondeos eléctricos verticales SEV y calicatas ecléticas CE); de menor utilidad son la polarización inducida (PI) y el potencial espontáneo (PE), este último basado en la medición de campos eléctricos naturales. (AUGE, 2008).

Hasta hace poco, se les prestaba bastante menos atención a las cuestiones de aprovechamiento y calidad de las aguas subterráneas (especialmente en algunas regiones en desarrollo) que a las de aguas superficiales, y los datos sobre las reservas y circulación de las aguas

subterráneas son todavía menos fidedignos. En general, los recursos hídricos subterráneos son vulnerables a diversas amenazas, como el abuso y la contaminación. (UNEP 2002).

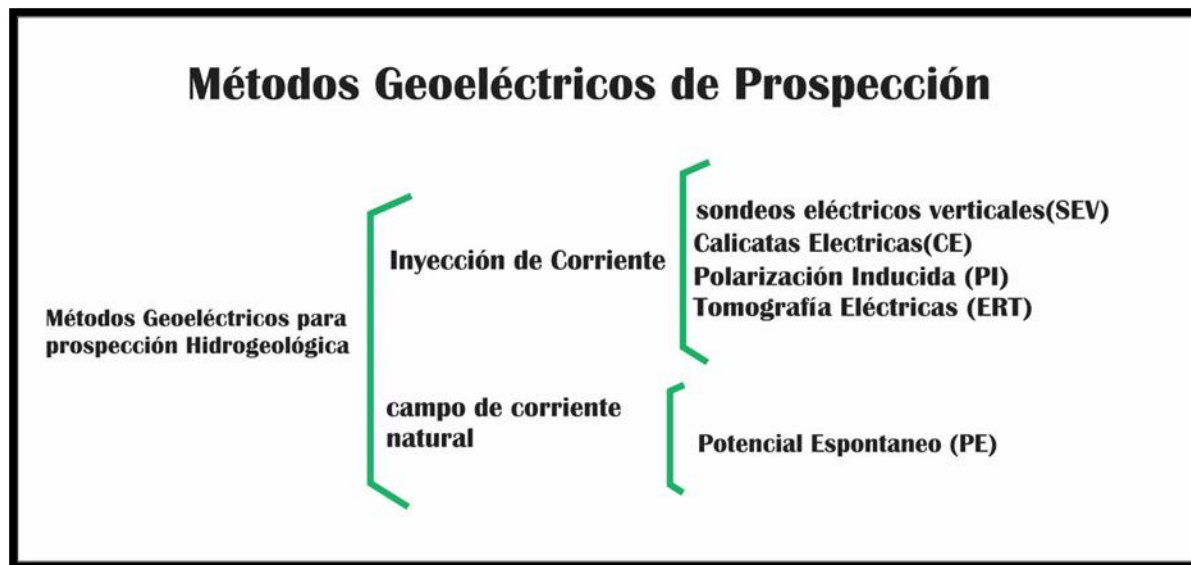


Ilustración 3: Métodos geoelectricos para prospección hidrogeológica. modificado de: (Auge 2008)
Modificado de: Miguel Auge, Métodos Geoelectricos para la Prospección de Agua Subterránea, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires 2008.

En el caso específico de la prospección sólo pueden lograrse buenos resultados cuando existen contrastes espaciales y/o temporales marcados de la propiedad investigada; por ejemplo, en la conductividad eléctrica, o en la densidad de las rocas, o en la velocidad con que se propagan las ondas sísmicas, o en distorsiones del campo magnético, etc. También resulta importante señalar que cualquiera sea el método geofísico empleado, su éxito está directamente relacionado al conocimiento, aunque sea general, de las características y el comportamiento geológico del subsuelo en la zona estudiada.

1.1.1 Definición Y Medida De La Resistividad.

El flujo de una corriente eléctrica a través de las rocas o los sedimentos, puede explicarse mediante la Ley de Ohm que establece que la caída de potencial ΔV entre 2 puntos por los que circula una corriente eléctrica de intensidad I , es proporcional a ésta y a la resistencia R que ofrece el medio al pasaje de la corriente (Ilustración 4) CALVETTY AMBONI, B. 2005

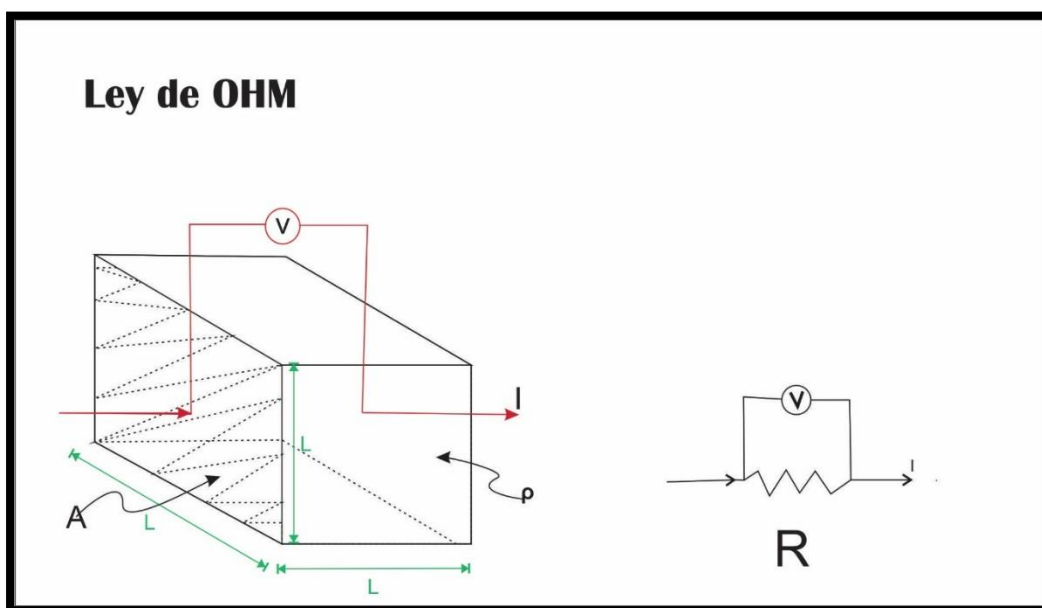


Ilustración 4: Representación gráfica de la ley de Ohm tomado y modificado de CALVETTY AMBONI, B. 2004.

$$\Delta V = I \cdot R \quad (1)$$

La resistencia es función de la naturaleza y la geometría del conductor y si esta puede asimilarse a un cilindro de longitud L y sección S : $R = \frac{\rho \cdot L}{S} \quad (2)$

Ecuación en la que ρ representa la naturaleza del conductor y se denomina resistividad.

En el caso de la prospección geoelectrica, es la resistividad de las rocas o sedimentos. Reemplazando R de (1) por su equivalente de (2) si tiene que:

$$\Delta V = I * \frac{\rho \cdot L}{S} \quad (3)$$

La resistividad es una propiedad inversa a la conductividad eléctrica y generalmente se expresa en ohm por metro ($\Omega \cdot m$). Tomado de CALVETTY AMBONI, B. 2004.

La resistividad de la mayoría de las rocas y sedimentos secos es elevada, por lo que actúan como semiconductores, o conductores de baja capacidad. Este comportamiento cambia significativamente cuando las fisuras o los poros están ocupados por agua, lo que genera una disminución de la resistividad, o lo que es lo mismo en aumento en la capacidad de conducción de la corriente eléctrica. Además del grado de saturación también incide en la resistividad del medio, el contenido salino del agua; a mayor salinidad menor resistividad y viceversa (CALVETTY AMBONI, B. 2004).

Los contrastes en las resistividades permiten aplicar exitosamente los métodos de prospección geoelectrica mediante la inyección de corrientes continuas.

Son pocos los componentes geológicos sub saturados o secos, que presentan baja resistividad o alta conductividad entre los que pueden mencionarse a minerales metálicos como calcopirita, pirita, magnetita, hematita especular, carbón, pirita y sulfuros metálicos (Fundación Centro Internacional de Hidrogeología Subterránea), y algunas rocas lodosa como lutitas que en forma general presentan intercalaciones muy pequeñas y de poco espesor de precipitaciones salinas. El grafito presenta al contrario elevada conductividad eléctrica, pero la mayoría de los minerales no metálicos, al igual que las rocas, tienen resistividades significativamente mayores, en general entre

2 y 6 órdenes de magnitud superiores. En la ilustración 5 se indican las resistividades que caracterizan a los minerales, a las rocas y a los sedimentos, dentro de estos últimos también se aprecian diferencias notorias entre los de grano fino (margas, limos, arcillas), los de grano mediano (arenas) y los de grano grueso (gravas). Tomado de CALVETTY AMBONI, B. 2004.

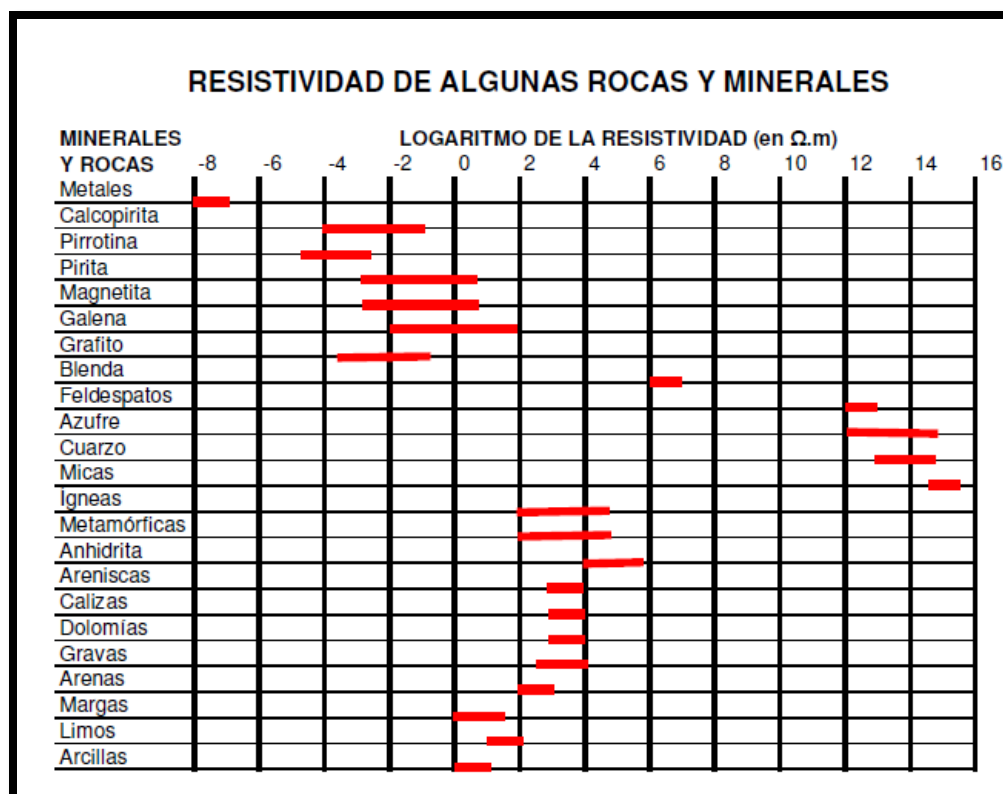


Ilustración 5: Se indica la variación en la resistividad de una solución en función de su concentración en ClNa, observándose que para una concentración de 0,01 g/L (10 mg/L) la resistividad es de 400 ohm.m y para 100 g/L (100.000 mg/L) la resistividad disminuye a 0,01 g/L (10 mg/L) la resistividad es de 400 ohm.m y para 100 g/L (100.000 mg/L) la resistividad disminuye a 0,08 ohm.m, lo que implica una diferencia de unos 4 órdenes de magnitud. Tomado y modificado de CALVETTY AMBONI, B. 2004

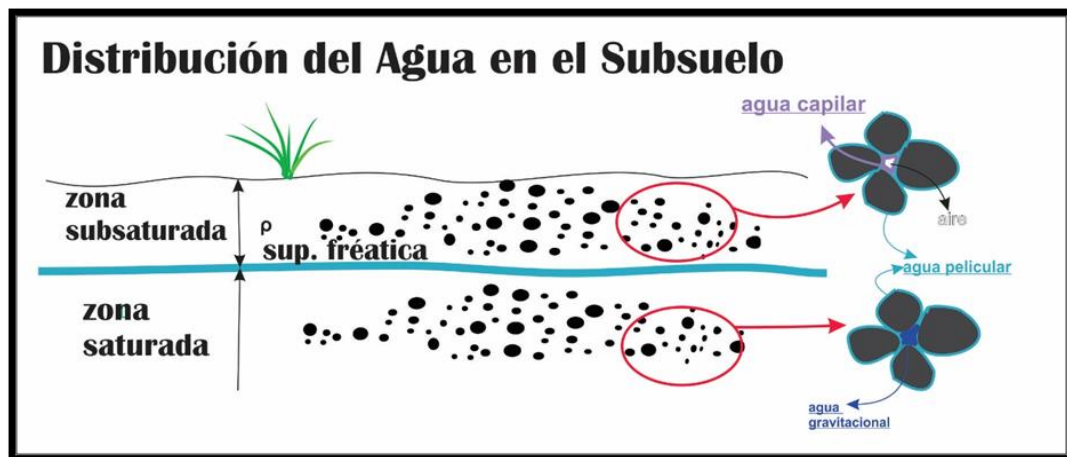


Ilustración 6: Distribución del agua en el subsuelo.

Si además del contenido salino del agua, se analiza el comportamiento del componente geológico en su conjunto como un modelo de fases; material sólido + poros + agua (Ilustración 6) se tiene que la resistividad de una arena en la zona sub saturada, o sea por encima de la superficie freática será:

$$\rho_a = F * \frac{\rho_w}{I_s} \quad (4)$$

Y por debajo de la superficie freática: $\rho_a = F * \frac{\rho_w}{\emptyset} \quad (5)$

ρ_a : resistividad arena F : forma y tamaño de los poros (coeficiente que generalmente varía entre 1,5 y 3) ρ_w : resistividad del agua I_s : índice de saturación \emptyset : porosidad total.

1.1.2 Medición De La Resistividad Eléctrica Del Subsuelo

Las mediciones se realizan sobre muestras de rocas o sedimentos extraídos de afloramientos, canteras, calicatas, trincheras o perforaciones.

Como todas las determinaciones litológicas de laboratorio, su mayor limitación radica en el tamaño reducido de la muestra respecto al del medio natural y a la alteración en las propiedades

físicas (porosidad, permeabilidad) e hidráulicas (grado de saturación y composición química del agua poral) al efectuar la extracción, el almacenamiento y el transporte hasta el laboratorio. Su mayor ventaja es el bajo costo y la rapidez en la obtención de resultados que por lo expresado, son sólo orientativos (CALVETTY AMBONI, B. 2004).

En campo las mediciones se realizan directamente en el terreno, abarcando un volumen significativamente mayor del medio a investigar, que el logrado en laboratorio o en perforación. Además, con los registros de campo, no se genera alteración en las propiedades físicas e hidráulicas de las rocas o sedimentos. Su mayor limitación es el costo, el tiempo y la interpretación, que se complica a medida que el medio natural se aparta de los requisitos teóricos (homogeneidad e isotropía) que tipifican al medio ideal (CALVETTY AMBONI, B. 2004).

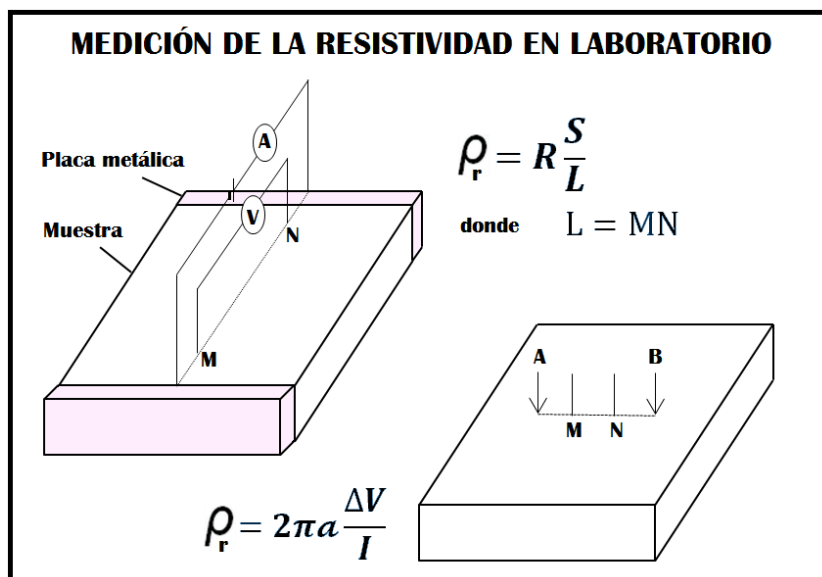


Ilustración 7: Disposición electródica para la medición de la resistividad de una muestra en laboratorio.

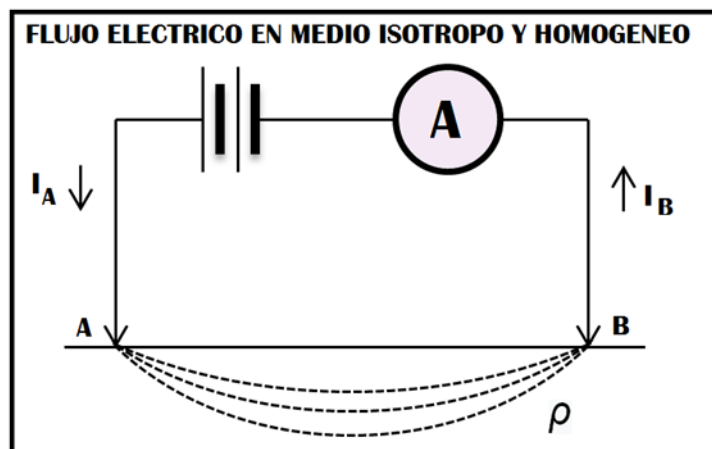


Ilustración 8: Esquematación del flujo eléctrico de una corriente continua, a través de un medio isótropo y homogéneo de resistividad ρ , que se inyecta en el terreno por A, con una intensidad I_A y sale del mismo por B (I_B). tomado y modificado de CALVETTY AMBONI, B. 2004.

En condiciones de régimen estacionario (sin pérdidas ni ganancias entre A y B), resulta que:

$$I_A = I_B \quad (6)$$

Si los electrodos A y B están separados por una distancia considerable y el subsuelo es homogéneo e isótropo, las líneas de corriente son radiales y divergentes y las superficies equipotenciales semiesféricas (Ilustración 9) En este caso la resistividad del subsuelo será:

$$\rho = 2\pi * \frac{[r_2 - r_1]}{r_1 \cdot r_2} * \frac{\Delta V}{I} = K * \frac{\Delta V}{I} \quad (7)$$

Donde K se denomina constante geométrica, porque depende directamente de la geometría de la configuración dispositivo empleado para inyectar y medir la corriente y tiene las dimensiones de una distancia.

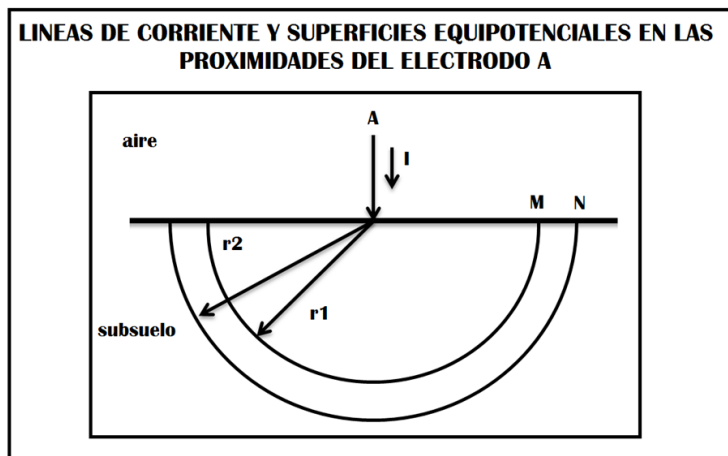


Ilustración 9: Líneas de corriente y superficies equipotenciales en las proximidades del electrodo A.

El componente geológico natural no es isótropo ni homogéneo, por lo que las superficies equipotenciales y las líneas de corriente no son regulares y rectas (Ilustración 10) y la resistividad obtenida de la ecuación 7, corresponderá a una integración de los valores medios, en los que inciden la anisotropía y la heterogeneidad del terreno y la posición relativa de los electrodos; a esta resistividad se la denomina aparente (ρ_a). Tomado de CALVETTY AMBONI, B. 2004.

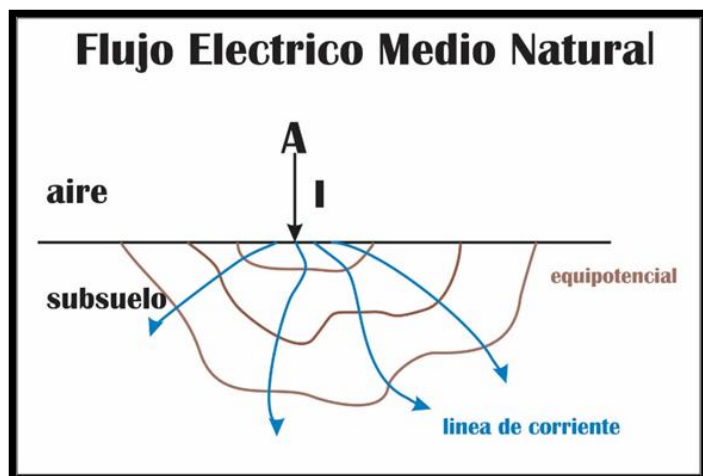


Ilustración 10: flujo eléctrico en medio natural tomado y modificado de CALVETTY AMBONI, B. 2004.

En la práctica, lo que se mide es la resistividad aparente (ρ_a) para lo cual se emplean dos tipos de dispositivos (lineales y dipolares).

En los dispositivos lineales los electrodos de inyección de corriente (A y B) y los de medición del potencial (M y N) se disponen alineados, de acuerdo a las configuraciones propuestas por Schlumberger y Wenner.

La Configuración Schlumberger es un dispositivo simétrico que debe cumplir con la condición de que la distancia que separa a AB debe ser mayor o igual que $5MN$ (Ilustración 11).

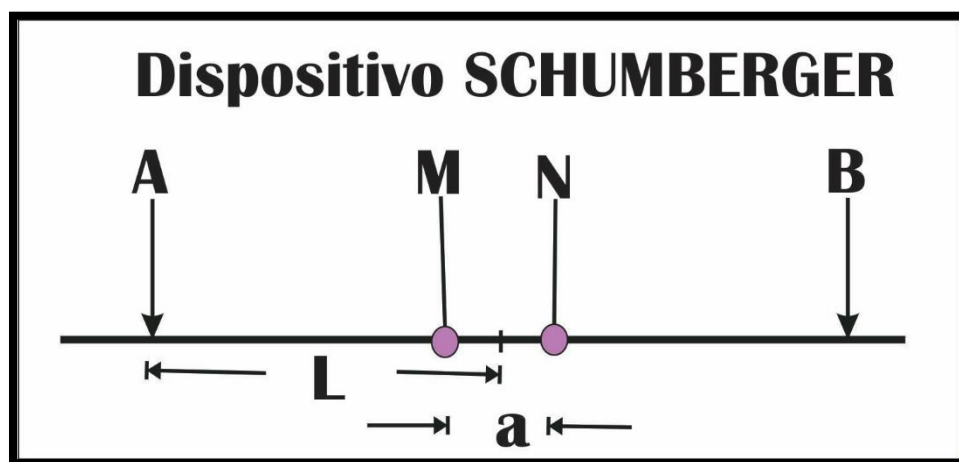


Ilustración 11: Configuración del dispositivo Schlumberger MODIFICADO DE (CALVETTY AMBONI, B. 1984).

Los valores de resistividad aparente se representan en función de $AB/2$ y la constante geométrica es:

$$K = \frac{\pi (AB^2 - MN^2)}{4MN} \approx \frac{\pi \cdot L^2}{a} \quad (8)$$

La Configuración Wenner también es un dispositivo simétrico pero los elementos se mantienen equi-espaciados (Ilustración 12) La constante geométrica es:

$$K = 2 \cdot \pi a$$

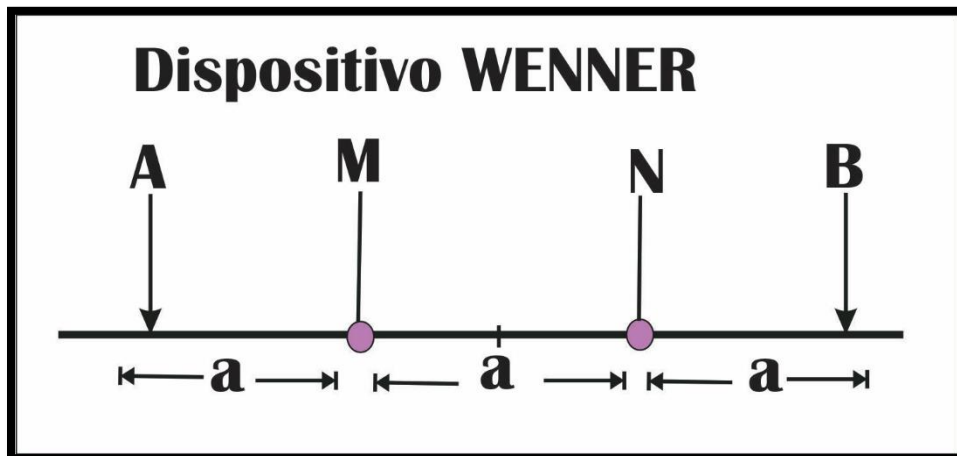


Ilustración 12: Configuración del dispositivo Wenner (CALVETTY AMBONI, B. 1984).

En la disposición dipolar, AB y MN se ubican mucho más cerca de la distancia que los separa entre sí. En la práctica, las configuraciones más frecuentes son la ecuatorial y la axial (Ilustración 13). Tomado de CALVETTY AMBONI, B. 1984.

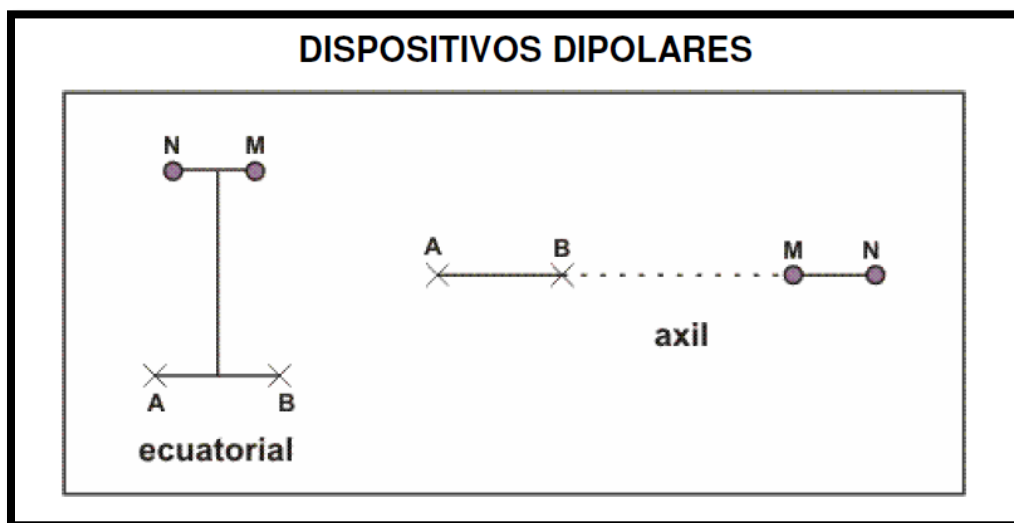


Ilustración 13: Configuración dispositivos dipolares.

La distribución Polo-Dipolo el electrodo B se coloca una distancia alejada de los electrodos A, M y N (Ilustración 14), debido a su alejamiento pueden colocarse de manera aleatoria y no es necesario que estén alineados (Lascano et al., 2005). La constante geométrica es:

$$K = \frac{2 \pi a (a + b)}{b} \quad (9)$$

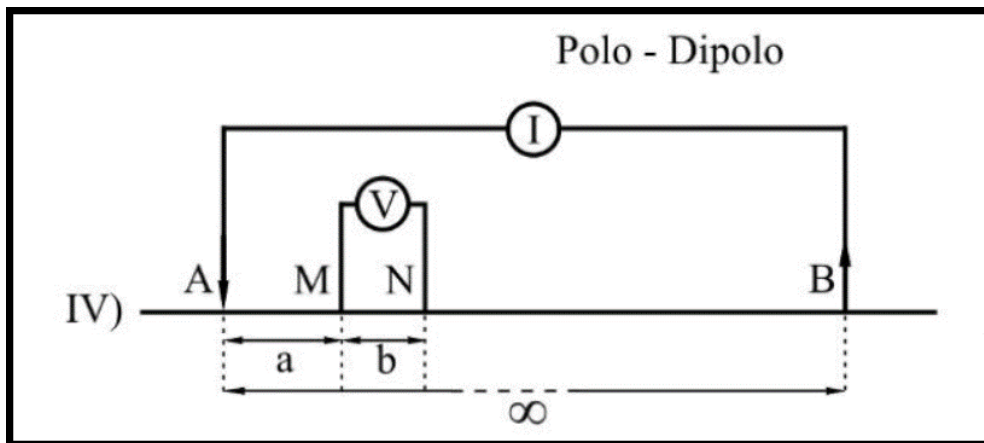


Ilustración 14: Configuración dispositivos Polo – Dipolo. Tomado de Lascano et al 2005.

La distribución Cuadrada los electrodos no se encuentran alineados estos siguen un patrón cuadrado como lo indica su nombre (Ilustración 15). Su constante geométrica es: $K = \pi a (2 + \sqrt{2})$

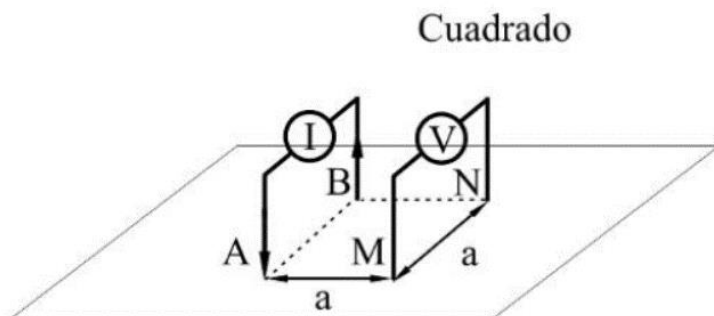


Ilustración 15: Configuración dispositivo Cuadrado. Tomado de Lascano et al 2005.

Los dispositivos dipolares (DD) requieren intensidades de corrientes mucho mayores que los lineales (SEV), por lo que son menos empleados. Solamente se los utiliza para investigaciones geoelectricas profundas.

1.2 Medición de la resistividad eléctrica del subsuelo

En este estudio se utilizaron solo dos métodos para medir la resistividad del subsuelo: SEV y ERT, o TRE.

1.2.1 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)

El sondeo eléctrico vertical consiste en un conjunto de determinaciones de la resistividad aparente, efectuadas con el mismo tipo de dispositivos lineal y separación creciente entre los electrodos de emisión y recepción. Considerando el dispositivo Schlumberger, los SEV se pueden clasificar en función de la separación final entre A y B de la siguiente manera (Ilustración 15).

Tomado de CALVETTY AMBONI, B. 1984.

TIPO DE SEV - DISPOSITIVO SCHLUMBERGER		
TIPO DE SEV	LONGITUD	PRINCIPAL APLICACIÓN
corto	AB hasta 250 m	Geotecnia y Arqueología
normal	250 m < AB < 2.500 m	Hidrogeología
largo	2.500 m < AB < 25.000 m	Prospección petrolera
muy largo	hasta 1.200 km	Investigación geofísica

Ilustración 16: Tipos de SEV para un dispositivo Schlumberger con sus longitudes y principal aplicación. CALVETTY AMBONI, B. 1984.

El objetivo de un SEV es la obtención de un modelo de variación de la resistividad aparente en función de la profundidad, a partir de mediciones realizadas en superficie. La profundidad alcanzada por la corriente aumenta a medida que crece la distancia AB, aunque generalmente no existe una relación de proporcionalidad entre ambas.

Los sondeos eléctricos verticales (SEV) se utilizan para estudiar las zonas superficiales de la de la tierra con el objetivo de identificar por medio de la resistividad, capas de rocas sedimentarias horizontales, sub horizontales y estructuras o demás generalidades que se encuentren a poca profundidad y que marque diferencia en la resistividad (Lascano et al, 2005). El SEV es útil para identificar acuíferos en rocas sedimentarias analizando el potencial aluvial sobre roca forme, espesor y profundidad de la capa, tipo de roca que compone la capa y extensión lateral; en rocas ígneas y metamórficas es útil la detección de fallas, zonas fracturadas y zonas alteradas. El SEV resulta útil para identificación de salinidad de agua, posición de interfaces entre agua dulce, salada y plumas de contaminación “a excepción de contaminación por fertilizantes no detectables por métodos geofísicos” (Plata, J., 2000).

Para generar y registrar un SEV se requiere:

- Circuito de emisión, integrado por una fuente de energía, un amperímetro para medir la intensidad de la corriente, puntos de emisión (A y B) consistentes en clavos metálicos de 0,5 a 1 m de largo, 20 mm de diámetro y cables de transmisión. En sondeos normales se utiliza una batería de 12 voltios en serie con un convertidor de unos 250 W de potencia. El amperímetro permite registrar hasta 10 A, con una precisión del 1% y resolución de 0,1 mA. El cable de transmisión tiene una sección de 1 mm², para transportarlo y extenderlo se enrolla a un carrete de unos 500 m de capacidad.
- Circuito de recepción, compuesto por un mili-voltímetro electrónico de alta impedancia y dos electrodos para la medición del potencial (M y N) impolarizables, constituidos por vasos con fondo poroso que contienen una solución saturada de sulfato de cobre, en los que se sumerge una varilla de cobre que está conectada al cable de medición del circuito.

Para la realización de un SEV normal (distancia entre A y B de 250 a 2.500 m) se requiere de un operador y 3 a 4 ayudantes para mover los electrodos. Pueden efectuarse entre 3 y 6 por día, en función de la longitud final, la distancia entre uno y otro y las características topográficas.

Luego de establecer la ubicación del sondeo, la dirección de sus alas e instalar el instrumental de medición en el centro, se colocan los 4 electrodos (A M N B) de acuerdo al dispositivo a utilizar. Se compensa el potencial natural del terreno y se lo energiza con una corriente continua de intensidad I en mA (electrodos AB) y se lee la diferencia de potencial ΔV en mV (electrodos MN). Los valores se vuelcan en una tabla y se calcula la resistividad aparente (ρ_a en $\Omega.m$).

La finalidad del SEV es establecer la distribución vertical de la resistividad específica o real por debajo del sondeo, tomando como base la curva de resistividad aparente (CRA).

Esto no resulta sencillo pues la profundidad de investigación no es igual a $AB/2$ (Schlumberger) ni al parámetro a (Wenner), debido a que depende de la geometría de estos dispositivos y de los cambios de resistividades en el subsuelo. Con el objeto de disponer de órdenes de magnitud de los volúmenes involucrados, puede decirse que la mayor parte de la corriente inyectada queda dentro de un paralelepípedo geológico de un ancho $AB/2$, de un largo $3AB/2$ y de un espesor $AB/4$ (Ilustración 17). Tomado de CALVETTY AMBONI, B. 1984.

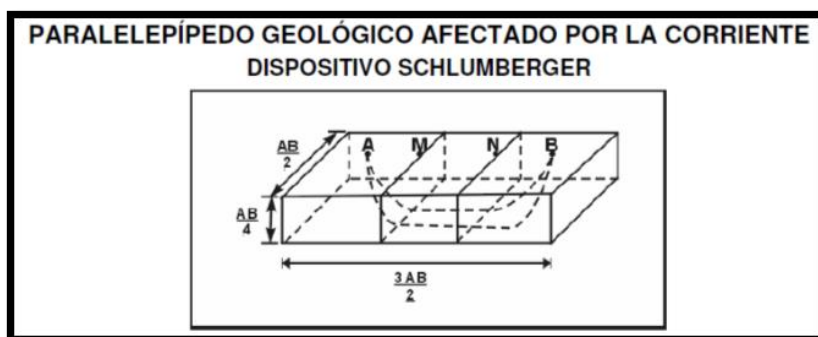


Ilustración 17: Paralelepípedo geológico afectado por la corriente en un dispositivo Schlumberger (CALVETTY AMBONI, B. 1984).

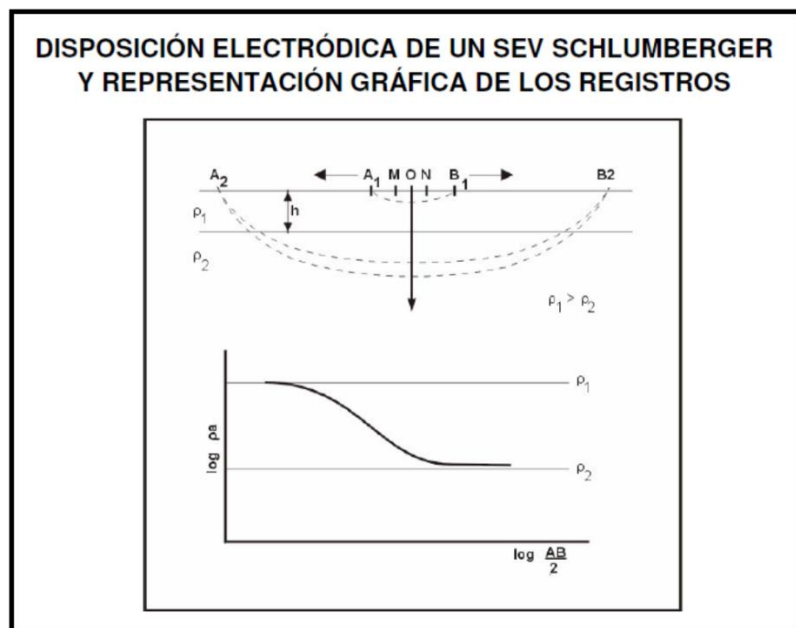


Ilustración 18: La distribución de la corriente en el subsuelo, para una separación inicial A_1B_1 de corta distancia, lo que hace que esta circule sólo por la capa de resistividad ρ_1 y espesor h . En esta condición la resistividad aparente ρ_a es igual a la resistividad específica ρ_e . Al incrementar la distancia de los electrodos de corriente a $A_2 B_2$, ésta va a circular por las capas de resistividades ρ_1 y ρ_2 , por lo que en el valor de ρ_2 también incidirá ρ_1 y por ende la resistividad aparente de ρ_2 será distinta de su resistividad específica.. En el sector inferior de la figura se representa en relación logarítmica en el eje de las y a la resistividad aparente y en el de las x a $AB/2$, apreciándose una disminución de la resistividad en profundidad, por lo que $\rho_1 > \rho_2$, con valores que se obtienen a partir de las líneas asintóticas a las formas curvas. (CALVETTY AMBONI, B. 1984).

El objetivo de la prospección geoelectrica pretende establecer la conformación del subsuelo mediante la ubicación espacial de las capas resistivas (perfil geo eléctrico) para posteriormente transformar el perfil geo eléctrico en otro practico o entendible, que represente los caracteres geológicos subterráneos (perfil geológico).

Para identificar las profundidades de las capas con diferentes resistividades, deben compararse las curvas obtenidas en el campo con otras confeccionadas previamente que se denominan curvas teóricas, mediante un procedimiento similar al que se emplea comúnmente para calcular los parámetros hidráulicos de los acuíferos por ensayos de bombeo.

La comparación entre curvas de campo y teóricas puede realizarse en forma manual, cuando las capas involucradas son 2 o 3. Este procedimiento se usó hasta la década de 1970, mediante el empleo de catálogos de curvas teóricas de resistividad como las elaboradas por: Compagnie Générale de Géophysique (1955) con 480 curvas de 3 capas; Orellana y Mooney (1966) con 25 curvas para 2 capas , 912 para 3 y 480 para 4 capas (CALVETTY AMBONI, B. 1984).

El procedimiento manual se complica cuando la cantidad de capas involucradas es 4 o más, pero esta limitación puede mejorarse sensiblemente mediante el uso de programas cibernéticos preparados para las computadoras personales a partir de 1970.

Los softwares actuales realizan una rápida comparación de las curvas de campo con las teóricas y por ende también permiten una rápida solución del problema minimizando el error. Entre estos, los empleados con más frecuencia son los desarrollados por Johansen (1975) que requiere de un corte geoelectrico inicial aproximado y el de Zodhy (1989), éste último es el más utilizado en la actualidad y se basa en la interpretación automática de los SEV (Schlumberger o calicatas de Wenner), mediante un método iterativo para ajustar las resistividades aparentes y los espaciamentos o configuración electrodica, a las resistividades específicas o reales y a las profundidades de las capas involucradas (CALVETTY AMBONI, B. 1984).

Al momento de interpretar los resultados de las resistividades obtenidas en campo (aparentes) transformadas ahora en reales, se puede caer en error, un caso puede deberse “a las variaciones aleatorias de los valores de resistividad aparente que depende de pequeñas variaciones de las resistividades superficiales del suelo y un mal contacto entre de este con los electrodos”

(Lascano et al, 2005). Otros errores son las variaciones en el material que compone las capas y la anisotropía que genera errores en las estimaciones o lecturas de las resistividades de los estratos, su profundidad o espesor (Lascano et al, 2005); adicionalmente las variaciones topográficas alteran las lecturas de los instrumentos ya sean por depresiones o elevaciones aumentando o disminuyendo los valores obtenidos respectivamente. La presencia de contactos geológicos verticales puede también tomarse erróneamente como un suelo estratificado.

Los principios de equivalencia y de la supresión pueden también alterar los resultados. Por ejemplo, el principio de equivalencia puede ser “imposible de distinguir entre dos capas altamente resistivas de diferente profundidad y espesor si el producto de ambas magnitudes es el mismo” (Telford et al. 1990) lo que quiere decir es que dos secciones diferentes pueden tener las mismas curvas de resistividades iguales. Ahora, el principio de supresión asegura y con razón; que si una capa es de espesor pequeño en comparación con las adyacentes la curva de resistividad aparente será insignificante a no ser que su resistividad sea muy diferente al de las capas circundantes.

1.2.2 Tomografías Eléctricas (ERT o TRE).

Las tomografías son una herramienta basta, poderosa y útil al momento de reconocer el subsuelo, permite recolectar información de manera simultánea en una misma línea con resistividades múltiples para tener una lectura de dos dimensiones; al utilizar varias distribuciones se puede analizar el método más eficaz dependiendo del estilo o dispositivo eléctrico que mejor se adapte a la complejidad geológica del lugar.

Utiliza de la misma manera que el SEV y dispositivos eléctricos, ellos están el Wenner-Schlumberger, Wenner, Polo-Dipolo, Dipolo-Dipolo y Polo-Polo (Díaz, 2010)

Las tomografías por resistividad eléctrica (ERT o TRE por sus siglas en inglés) conforman un método de ensayo eléctrico donde la corriente se introduce en el suelo utilizando dos electrodos de corriente, la caída del potencial eléctrico se lee después usando otros dos electrodos. Existen muchas configuraciones diferentes de electrodos disponibles, pero todas las configuraciones están dirigidas a recolectar datos que pueden usarse para estimar variaciones laterales y verticales en los valores de resistividad de los materiales geológicos del subsuelo. La ERT puede usarse para mapear variaciones geológicas incluyendo: litología del suelo (por ejemplo, arcilla versus grava), presencia de agua subterránea, zonas de fractura, variaciones en la saturación del suelo, áreas de salinidad aumentada o, en algunos casos, contaminación del agua subterránea. ERT puede usarse para mapear las profundidades y geometría de la roca madre; Aunque en la mayoría de los ajustes geológicos MASW o SRT son más adecuados para cartografiar la base y el tope de una roca. ERT es a menudo la mejor opción para la cartografía de cavidades como cuevas, karst y / o disipación de disolución de evaporitas. Al igual que el sísmico, el método eléctrico tiene la capacidad de producir imágenes 1D (sonar), 2D (perfil) o 3D (volumen). Olson utiliza la matriz de electrodos adecuada y la elección de 1D, 2D o 3D sobre la base de objetivos y presupuesto. Los métodos eléctricos son los más afectados por la geoquímica de la sub superficie; esto es, la distribución del grano, la química del agua subterránea y / o la presencia de contaminación, y es aplicable sobre suelo, roca y agua subterránea para probar zonas saturadas, paleocanales, litología del suelo, contaminación de aguas subterráneas y karts.

La Tomografía eléctrica es un método de resistividad multielectrónico, basado en la modelización 2-D de la resistividad del terreno mediante el empleo de técnicas numéricas

(elementos finitos o diferencias finitas). Destacar que actualmente se está avanzando en la modelización 3-D. (Serrano,2003)

De uso generalizado tanto en Europa como en EE.UU, en la resolución de un amplio abanico de problemas ingenieriles e hidrogeológicos, en España continúa siendo una técnica poco extendida y conocida bajo el nombre genérico de Tomografía eléctrica. (Serrano,2003)

No obstante destacar que en la bibliografía anglosajona, se distinguen dos nomenclaturas en función de la disposición de los electrodos en el terreno: “Electrical imaging” en el caso que se dispongan en superficie (Ilustración 17), o “Electrical tomography” si se hallan en el interior de sondeos verticales. (Ilustración 18). (Serrano,2003)

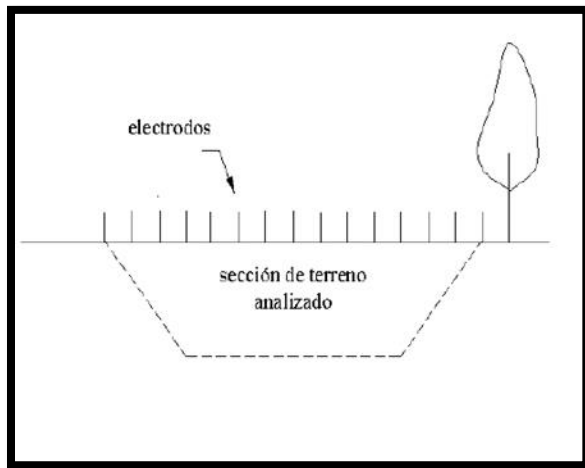


Ilustración 19: Esquema del “electrical imaging” tomado de Serrano, (2003)

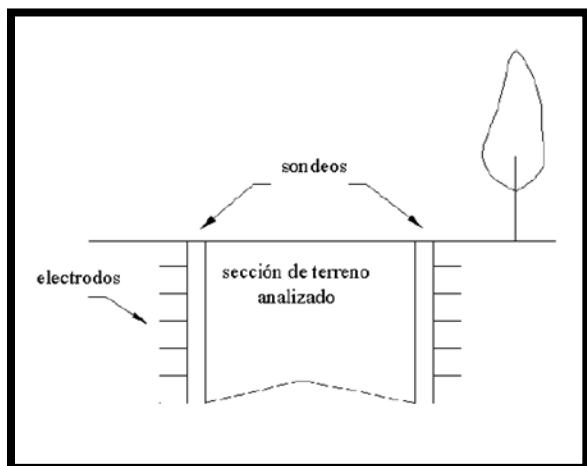


Ilustración 20: esquema del "Electrical tomography" tomado de Serrano, (2003)

Si bien a nivel teórico no existen diferencias significativas entre ambas variantes, en este documento solo nos centraremos en la descripción del “Electrical imaging”, ya que además de ser la técnica más adecuada para su aplicación en campañas de Prospección de aguas subterráneas (en donde se precisan perfiles de gran longitud), es también la variante más económica, fácil y rápida de implementar en el campo. (Serrano,2003)

La aparición de la Tomografía eléctrica ha supuesto un salto cualitativo espectacular con respecto a los métodos de resistividad convencionales, técnicas que aunque se han estado utilizando durante varias décadas, su limitada resolución 2-D les confería en general un papel secundario frente a otras técnicas (p.e. Potencial espontáneo). (Serrano,2003)

Este avance se debe fundamentalmente a dos razones:

1. En primer lugar, porque estos métodos convencionales SEV`s solo utilizan 4 electrodos, siendo necesario para cada medida variar manualmente sus posiciones en el terreno (proceso relativamente lento y pesado). En cambio el método de Tomografía

eléctrica es una técnica multi electródica, en el que todo el proceso de adquisición de datos está totalmente automatizado. Esto nos permitirá poder realizar un gran número de mediciones, tanto en profundidad como lateralmente, en un breve espacio de tiempo (del orden de 500 o más mediciones en una hora y media), obteniendo por tanto modelos 2-D de gran resolución.

2. En segundo lugar porque el empleo de técnicas numéricas nos permitirá poder procesar eficazmente todo este gran volumen de información obtenida en campo, en un tiempo relativamente corto.

(Serrano,2003)

El objetivo de este método se basa en obtener una sección 2-D de resistividades reales del subsuelo, modelo a partir del cual podremos determinar la presencia o no de agua en profundidad, mediante la localización de áreas en donde tengamos una disminución anómala del valor de la resistividad del terreno. Para ello será preciso el empleo de un programa de inversión, con el que transformar las resistividades aparentes obtenidas de la campaña de campo, a valores de resistividad real, para su posterior interpretación. (Serrano,2003)

Independientemente de que la Tomografía eléctrica sea una técnica multi electródica, la base teórica de su funcionamiento es análoga al de los métodos de resistividad convencionales.

Existen diferentes configuraciones a la hora de ubicar los electrodos, siendo las más utilizadas Wenner (en su variante α) y Schlumberger. También tenemos la denominada configuración Wenner-Schlumberger (muy utilizada en Tomografía eléctrica). (Serrano,2003)

Partiendo de estos conceptos básicos, la gran innovación del método de Tomografía eléctrica con respecto a los métodos convencionales, reside en que ahora todas las medidas se realizarán de forma totalmente automatizada, es decir sin necesidad de mover manualmente ningún electrodo. Ello se debe a que por un lado trabajaremos con un gran número de electrodos en el terreno (dispuestos equiespaciadamente), y por otro lado a que nuestro dispositivo de medida de resistividades, se encargará de realizar automáticamente toda la secuencia de medidas preestablecida sin posibilidad de error, formando para ello y según las especificaciones predefinidas, todas las posibles combinaciones de 4 electrodos. De esta forma se obtendrá la variación de la resistividad del subsuelo tanto en profundidad como lateralmente. En la Ilustración 21 se observa un ejemplo de la secuencia de medición utilizando el dispositivo Wenner. (Serrano,2003)

El equipo que se precisa para la ejecución del método consta de:

- Electrodo: no son más que unas barras metálicas cuyo número variará en función del problema
- Cable: es de gran longitud, con conexiones cada cierto intervalo a fin de poder conectar los electrodos.
- Conectores: son unos pequeños cables de cobre con pinzas en los extremos. Son los que se encargan de conectar los electrodos al cable.
- Ordenador portátil: en él tenemos el software que nos permite por un lado determinar las variables de trabajo: tipo de dispositivo electrónico, número de electrodos, espaciado entre ellos, número de medidas a realizar, etc., y por otro lado procesar y visualizar los resultados obtenidos.

- Unidad central (resistivímetro): es el cerebro de todo el dispositivo. Se encarga de ejecutar de forma automática toda la secuencia de medidas predeterminada, verificar el buen estado de las conexiones, así como almacenar digitalmente todos los resultados de campo.
- Una batería: es la fuente de alimentación de todo el sistema. (Serrano,2003)

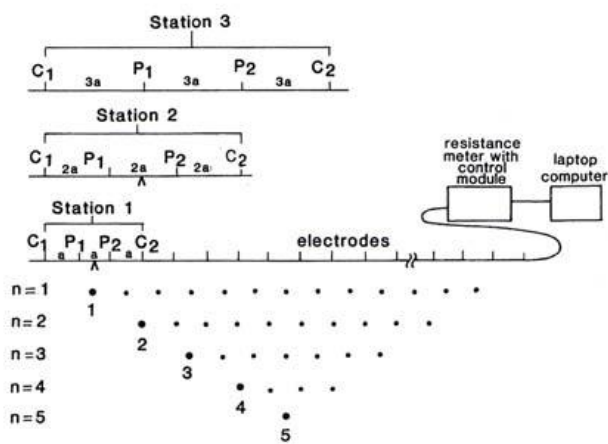


Ilustración 21: secuencia con dispositivo wenner tomado de (Serrano,2003)

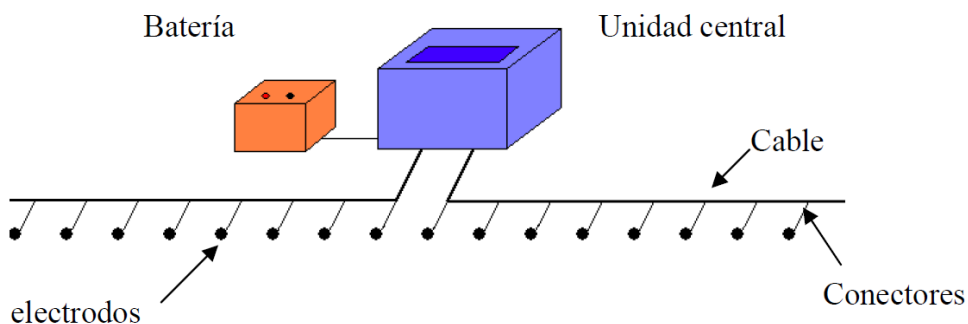


Ilustración 22: Esquema del dispositivo requerido. tomado de (Serrano,2003)

Las ventajas que presenta este método son las siguientes:

- Gracias a que el proceso de captura de los datos está totalmente automatizado, se puede realizar un gran número de medidas, de forma que obtendremos secciones 2-D de excepcional resolución tanto en profundidad como lateralmente. Gracias a esta visión bidimensional de alta resolución, el método de Tomografía eléctrica nos permitirá:
 1. Detectar zonas susceptibles de presentar focos de filtración, así como caracterizar geoméricamente el problema (i.e. estimar la profundidad del flujo).
 2. Abordar de forma eficaz problemas en terrenos con elevada complejidad estructural.
 3. Ubicar con gran eficiencia otro tipo de procedimientos (i.e. sondeos o piezómetros), dado que nos marca lugar y profundidad a la que se encuentra la anomalía.
- El procesamiento de los datos se puede realizar en el propio campo, mediante la ayuda de un portátil y en un tiempo muy reducido. Esta manera de actuar, casi a tiempo real, le confiere al método una gran versatilidad a la hora de resolver posibles problemas surgidos durante todo el proceso de campo, o decidir la ejecución de nuevos perfiles que inicialmente no estaban proyectados
- Se puede controlar la profundidad máxima de estudio.
- Es un método no destructivo.

(Serrano,2003)

Las principales limitaciones de este método son:

- Disponer del material requerido. A diferencia de otros métodos, la Tomografía eléctrica precisa de un equipo bastante caro.
- Como pasa en todos los métodos de resistividad eléctrica, la presencia de material muy resistivo en superficie imposibilita un buen funcionamiento del método, siendo necesario la utilización de otras técnicas, en este caso las electromagnéticas, en los que no se precisa un contacto físico con el suelo.

(Serrano, 2003)

1.2.3 Planificación estándar para iniciar una campaña de reconocimiento.

Los aspectos más importantes que definen en la fase de planificación de la campaña de campo son:

- Delimitar los objetivos perseguidos.
- Definir el número de perfiles a realizar y su ubicación.
- Determinar la profundidad máxima de investigación.
- Definir el dispositivo electródico a utilizar, número y separación de los electrodos.
- Asumir las medidas preventivas que se deben adoptar para asegurar la calidad de los datos.

(Serrano,2003)

El “Electrical imaging” se basa en la obtención de perfiles 2-D de resistividad del terreno (ver Ilustración 19), por lo que en el caso de analizar posibles filtraciones en alguna estructura lineal (i.e. presa), bastará simplemente con disponer el perfil (o perfiles) de electrodos lo más paralelo posible a la traza de la estructura. (Serrano,2003)

En cuanto definir al número de electrodos, éste es muy variable, si bien un número cercano a 50 electrodos es bastante frecuente estos se disponen de forma equidistante oscilando de 1 a 10 m para problemas ingenieriles, si bien para problemas de filtraciones de agua un espaciado entre 1 y 2 metros es lo más aconsejable.

En cuanto a la profundidad máxima de investigación, ésta depende esencialmente de la longitud del perfil (a mayor longitud mayor profundidad), si bien el dispositivo electródico utilizado también influirá en cierta medida. (Serrano,2003)

1.2.4 Procedimiento estándar para la Ubicación del dispositivo y adquisición de los datos.

En primer lugar se procede a colocar los electrodos en superficie de forma equiespaciada, intentando siempre que formen una línea recta. Se deben definir cuál es el origen y final del perfil a fin de no tener problemas en la fase de interpretación. Se intentará además que la topografía del terreno sea lo más plana posible para evitar tener anomalías en las mediciones de resistividad. En el caso que esto sea inevitable, la mayoría de los softwares permiten minimizar este fenómeno mediante el ajuste de la malla a la topografía real del lugar.

Los electrodos se introducen en el terreno en longitud suficiente como para garantizar un buen contacto electrodo-suelo. Una vez colocados, se conectan al cable por medio de los conectores. (Serrano,2003)

Ahora se configuran las variables del dispositivo: número de electrodos utilizados, distancia entre ellos, dispositivo electródico de medida, así como el número de medidas que se

desea realizar (cabe destacar que se puede suprimir aquellas medidas dudosas, aspecto que supone un ahorro de tiempo significativo y mejora en la calidad de los datos de entrada). (Serrano,2003)

Concluida la configuración, se transfieren estas especificaciones a la unidad central para que ésta pueda realizar automáticamente toda la secuencia de mediciones prefijada.

Sin embargo, antes de iniciar las mediciones y también mediante la unidad central, se procede previamente a la verificación de que todas las conexiones funcionan correctamente, y que la resistividad entre electrodo-suelo es suficientemente baja como garantizar unos buenos resultados (en el trabajo práctico se impuso como valor máximo de potencial aceptable 2mV). En el caso de tener valores superiores generalmente basta con clavar un poco más los electrodos, o humedecer el terreno para mejorar la conductividad. (Serrano,2003)

Una vez está todo dispuesto, se inicia la secuencia de medidas predeterminadas, proceso que tardará más o menos tiempo en función del número de medidas a realizar. En general obtener del orden de 500 medidas requerirá un tiempo de toma cercano a la hora y media. Una vez terminado todo el proceso de captura de datos, toda la información almacenada digitalmente se transfiera al ordenador, a fin de proceder a su procesado e interpretación con el programa correspondiente. (Serrano,2003)

1.2.5 Procedimiento estándar para el Procesamiento de datos de campo.

Nuestro objetivo es obtener un modelo 2-D de resistividades reales a partir de la pseudosección de resistividades aparentes obtenida del terreno. Para ello se precisará un programa de inversión. (Serrano,2003)

Estas técnicas de inversión se basan en realizar todo un proceso iterativo con el que obtener un modelo de resistividades reales, tal que el modelo de resistividades aparentes que generaría, sea lo más similar posible a la pseudosección de resistividades aparentes medida en el campo. (Serrano,2003)

Las técnicas de inversión que existen hoy en día se pueden clasificar en dos grandes Grupos

1. Block inversion method
2. Smoothness-constrained inversion method

Aparte de las cuestiones de implementación y funcionamiento interno, el aspecto diferenciador más significativo entre estos dos métodos de inversión, reside en el tipo de problemas en el que cada una de estas técnicas es más eficiente. (Serrano,2003)

El “Block inversion method” ofrece buenos resultados para aquellas situaciones en las que el terreno presente grandes contrastes de resistividades, es decir que tengamos regiones en donde la resistividad sea homogénea en su interior, y a su vez muy diferenciada con respecto a las regiones adyacentes. Esto lo convierte en un método ideal para la delimitar con bastante precisión la geometría de cuerpos con resistividades muy diferenciadas entre sí. El principal inconveniente reside en la necesidad de introducir un modelo previo, a partir del cual el ordenador procederá a iterar hasta ajustar el modelo calculado al de campo.

No obstante y dado que en problemas de filtración de agua en el subsuelo, las variaciones de resistividad del terreno serán graduales (en especial en los suelos), esta técnica no es eficiente. (Serrano,2003)

El “Smoothness-constrained inversion method”, es en realidad el método de inversión óptimo para el análisis de problemas en donde tengamos variaciones graduales de resistividad en el terreno, como por ejemplo en filtraciones de agua o vertidos de contaminantes. Además este método (basado en el “Gauss-Newton least-squares method”), presenta la gran ventaja de que no requiere de un modelo inicial, a partir del cual empezará el proceso iterativo. Dado su excesivo coste computacional, junto a la poca capacidad de los ordenadores de la época, se desarrolló el método “Quasi-Newton least-squares ”que es aproximadamente unas 10 veces más rápido que el método convencional, si bien éste precisa que la variación de los valores de resistividad sean más suaves, a fin de poder obtener unos buenos resultados. (Serrano,2003)

1.2.6 Procedimiento estándar para la Interpretación de resultados.

La detección de depósitos de agua en el subsuelo, se basa en localizar disminuciones anómalas del valor de la resistividad en el modelo real. Sin embargo, que valores de resistividad podemos considerar que son suficientemente bajos como para considerar que puede existir un flujo de agua, dependerá de cada problema en concreto, y en especial de la litología del terreno. (Serrano,2003)

En consecuencia es interesante tener un previo conocimiento de la geología de la zona, ya que de esta forma regiones de similar geología pero con disminuciones de resistividad significativas, podrán arrojar resultado.

2. Marco Geológico

2.1 Localización Geológica

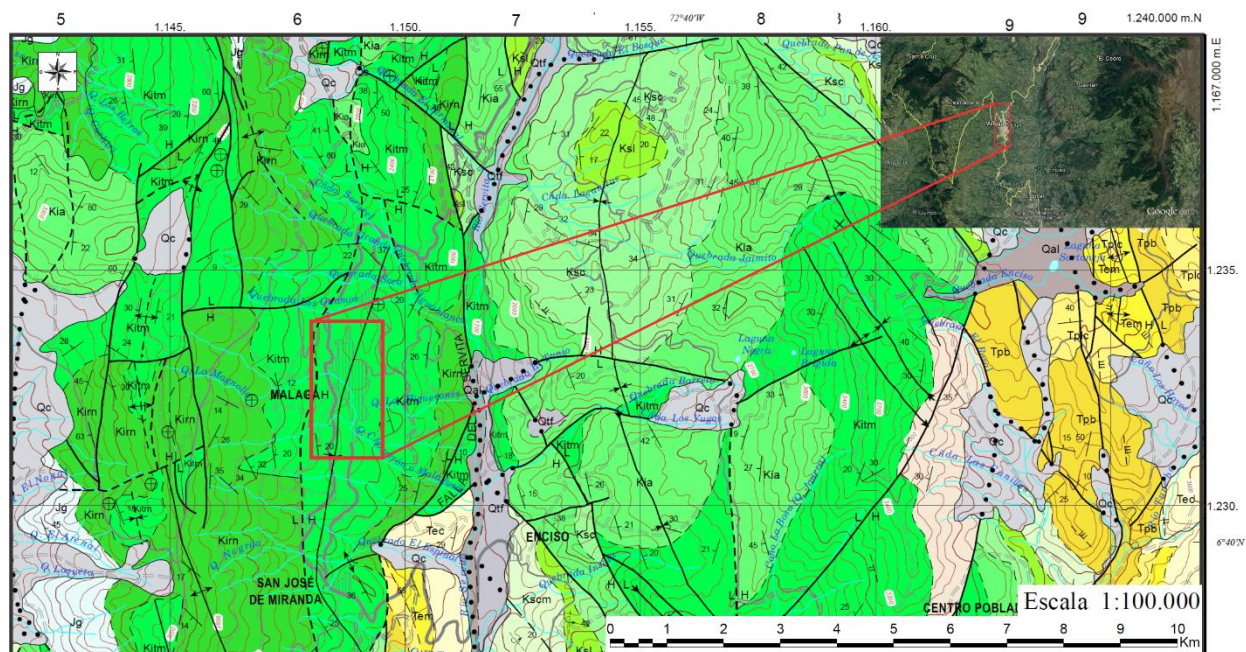


Ilustración 23: Mapa geológico del área circundante de Málaga, la zona de color verde corresponde a rocas sedimentarias de edad cretácea, las zonas amarillas corresponden con rocas de edad “terciaria” (termino en desuso) lo que corresponde con la era cenozoica y depósitos cuaternarios en gris, arreglo elaborado por los autores utilizando imágenes tomadas del servicio geológico colombiano (plancha 136) y de Google Earth.

La zona circundante al río Servita, se encuentra compuesta por roca sedimentaria de edad jurásica hasta el “Cuaternario”, según Ward (1973), indica que el área corresponde a una cuenca estructural, relacionada con la secuencia estratigráfica de la cuenca de Maracaibo. Iniciando con la Formación Giron descrita inicialmente por Hettner en 1892 (Tomado de Ward, etl al. 1973 y visto en Caballero y Sierra, 1991), descritas por Juliver como una secuencia de areniscas, arcillas y conglomerados que intercalan con areniscas claras y arcillas gris verdosas, predominando las facies rojas de edad Juratriásicas.

2.2 Aspectos Estratigráficos.

SISTEMA	UNIDAD LITOESTRATIGRAFICA	SIM-BOLO	LITOLOGIA	DESCRIPCION	
CUATERNARIO		Gal Qtt		Depósitos aluviales, glaciares y fluvioglaciares. Terrazas y abanicos aluviales.	
T E R C I A R I O	O L I G O C. E O C E N O	FM. CARBONERA		Alternancia de lodolitas grises, moteadas y areniscas arcillosas, con intercalaciones de capas de carbón. Espesor: 375 - 560 m.	
		FM. MIRADOR		Areniscas blancas, finas a conglomeráticas, con lodolitas hacia la parte media. Espesor: 210 - 235 m.	
	P A L E O C E N O	FM. LOS CUERVOS		Lodolitas grises carbonosas, con intercalaciones de areniscas arcillosas y capas de carbón económicamente explotables. Espesor: 265 - 420 m.	
		FM. BARCO		Areniscas cuarzosas, localmente arcillosas, con intercalaciones de lodolitas y delgadas capas de carbón. Espesor: 150 - 275 m.	
		FM. CATATUMBO		Lodolitas grises oscuras, nodulares y lentes de areniscas arcillosas. En la parte superior capas de carbón. Espesor: 100 - 210 m.	
	C R E T A C I C O	S U P E R I O R		FM. COLON-MITO JUAN	Lodolitas grises a gris oscuras, fosilíferas, localmente calcáreas. En la base areniscas glauconíticas y hacia el tope calizas glauconíticas y fosilíferas. Espesor: 325 - 500 m.
				FM. LA LUNA	Calizas fosilíferas, en capas delgadas, lodolitas calcáreas, con concreciones calcáreas, chert y rocas fosfóricas. Espesor: 100 - 250 m.
		I N F E R I O R		FM. CAPACHO	Lodolitas grises a negras, con algunas intercalaciones de calizas fosilíferas, areniscas y limolitas. Espesor: 175 - 435 m.
				FM. AGUARDIENTE	Areniscas cuarzosos finas a conglomeráticas, glauconíticas. Espesor: 200 - 400 m.
	JURASICO	S U P E R I O R		FM. TIBU-MERCEDES	Alternancia de calizas grises, lodolitas y areniscas glauconíticas, localmente calcáreas. Espesor: 600 - 800 m.
FM. RIO NEGRO			Areniscas y conglomerados, con guijos de cuarzo. Espesor: 40 - 80 m.		
FM. GIRON			Areniscas y lodolitas rojas, localmente conglomerados. Espesor: 200 - 500 m.		

Ilustración 24. Columna generalizada de la cuenca Catatumbo-Maracaibo, cuenca sedimentaria correspondiente al origen de la formación que compone la roca en donde está construido el municipio de Málaga.

La Formación Río Negro está compuesta por capas conglomeráticas y limolitas con areniscas pardo rojizas, continuando con la Formación Tibú-Mercedes descrita inicialmente por Nostestein (1944) y agrupada como se conoce actualmente por Wardt et al. (1973), Vargas et al. (1976) y Fabre (1981), compuesta principalmente por roca caliza, cemento calcáreo en areniscas y lodo calcáreo en lodolitas. Continúa la Formación Aguardiente, estudiada inicialmente por Nostestein (1944) y agrupada como se conoce en la bibliografía actualmente por los estudios de Wardt et al. (1973), Vargas et al. (1976) y Fabre (1981), en la que predomina principalmente la arenisca cuarzosa de color blanco, con fracturas rellenas de material micáceo y carbonoso.

La Formación Capacho, descrita como se encuentra en la bibliografía es hecha por Fabré (1981), compuesta principalmente por intercalación de lodolitas, biomicritas, cuazoareniscas y bioesparitas con presencia de niveles de areniscas y calizas fofáticas; la Formación La Luna descrita inicialmente por Nostestein (1944), en el área de estudio esta formación se caracteriza en dos miembros, uno teniendo principalmente chert, y la otra zona compuesta por caliza y shale, teniendo concreciones en su parte inferior; la Formación Colon y Mito Juan, descrita por Sutton (1946), está compuesta en su parte inferior por arcillas laminadas negras, bancos de areniscas gris de grano fino micáceas, calizas y bancos de areniscas glauconíneas, la zona media compuesta por areniscas de grano fino a medio, conglomerados intercaladas con arcillas negras laminadas, y la zona superior compuesta por arcillas negras laminadas, areniscas de grano fino micáceas, areniscas verdes y capas delgadas de carbón (Vargas et al. 1984). Por últimos encontramos aluviones y coluviones, de procesos erosivos y sedimentación. (Vargas et al. 1984).

En la zona de estudio no aflora la Formación Río Negro, pero se encuentra infrayaciendo la formación Tibú-Mercedes que si aflora. (Richard, 1968), la cual según Fabre 1981, corresponde

a un ambiente de alta energía, de sedimentación asociado a deltas, corrientes fluviales y lagunas costeras generando secuencias estratigráficas compuestas por areniscas grises, verdosas o moteadas, granos de areniscas finos a gruesos, arcosas que pasan a cuarzoareniscas grises a verdosas, en algunas zonas levemente calcáreas (Sutton, 1946).

La formación Rio Negro data a edades Berriasiano o Berriasiense que data según la comisión de estratigrafía internacional estas edades corresponden a 145 millones de años, hasta finales del Barremiano o Barremiense hace 125 millones de años aproximadamente, esto pone en evidencia alto dominio continental o marino transicional (Royero y Clavijo, 2001). La Formación Rio Negro varia de espesor a lo largo de su extensión (Caballero y Sierra, 1991), pero en la zona de la confluencia del rio Servita con el rio Chicamocha y el rio Cámara tiene un espesor de 150 m (Julivert, 1960).

Suprayace a la Formación Rio Negro, la Formación Tibú-Mercedes (Notestein, et al., 1944), encontrándose en la zona de estudio como la única formación que aflora, corresponde a un elevamiento del nivel del mar con respecto a la posición de la edad anterior, en el registró una sola formación, pero se diferencian la Tibú de la Mercedes. Al acabar la Formación Rio Negro inicia de manera concordante lo que corresponde con Tibú, parte de la Formación Tibú-Mercedes con una secuencia de areniscas guijosas (que podría interpretarse como una acción directa de la cercanía al continente o un nivel del mar con poca variación respecto de las era anterior en la que dominó un tipo de sedimentación similar por el tamaño de los guijarros que oscila entre 2mm a 64mm) seguida por calizas fosilíferas grises con capas de shale y arenisca de grano fino (Ward et al., 1973) que se manifiesta un descenso en la energía del ambiente de sedimentación que podría estar sujeto a un elevamiento del nivel del mar. Continuamente está la parte de Tibu-Mercedes

que consiste en calizas biomicríticas, shale gris con abundante mica en la sección basal, y arenisca gris de grano fino a medio glauconítica y sectores calcáreos (Ward et al., 1973).

Según Julivert (1960) al describir la secuencia en la congruencia del río Servita con el río Chicamocha la Formación en la parte inferior con “rocas calizas arenosas, lumaquelas (calizas fosilíferas), capas arenosas con cemento calcáreo alterado con niveles lutíticos y hacia el tope lutitas oscuras con intercalación de areniscas” (Tomado de Caballero y Sierra, 1991). Caballero y Sierra (1991) en su tesis de pregrado hacen un estudio estratigráfico en el sector oriental de la provincia García Rovira, ellos dividen la Formación Tibu-Mercedes en 7 intervalos; el primer intervalo con 110m con rocas clásticas calcáreas, micritas con venas rellenas de calcita, lodolitas calcáreas con alto contenido de azufre, lodolitas carbonaceas, areniscas lodosas calcáreas y basalmente conglomerados polimicríticos de guijas lodosas; en el segundo intervalo con un espesor de 46 metros se compone de una sección de roca bioesparita rala maciza gris clara a amarillenta, con fragmento de bivalvos recristalizados en calcita grandes; la sección tres tiene un espesor de 50 metros constituida por arenisca de grano fino lodosa con secciones locales carbonosas de color gris oscuro y cemento calcáreo, lodolitas arenosas calcáreas físciles con algo de materia orgánica y lodolitas calcáreas grises claras; el intervalo cuatro con espesor de 64 metros se compone de roca calcárea con niveles lodolíticos y arenosos, biomicritas gris azulosas masivas ralas, niveles de arenisca calcáreas y areniscas de grano fino glauconítica con cemento calcáreo; el intervalo cinco con espesor de 75 metros compuesta de lodolitas carbonosas gris oscuro con pequeñas cavidades de fósiles disueltos, lodolitas calcáreas gris clara y areniscas de grano fino a muy fino con cemento calcáreo que grada lodolitas arenosas micáceas calcáreas gris oscuro. El intervalo seis de 60 metros de espesor compuesto por esparita ralas o ligeramente fosilífera gris

azulosa o gris oscura con fragmentos de bivalvos grandes en calcita, lodolita gris oscuro a negro carbonosas con pirita y bivalvos pequeños, areniscas lodosas de grano fino calcáreas micáceas, biomicritas gris azuloso, bioesparitas gris azuloso con areniscas de grano muy fino glauconítica bioturbada y lodolitas gris claro. El ultimo intervalo es el séptimo con espesor de 15 metros, siendo la transición a la Formación Aguardiente, compuesta por areniscas de grano medio moderadamente calibrada, glauconíticas, gris verdoso masiva intercalada con lodolitas gris oscuro físciles y areniscas de granos fino cuarzosas con laminación ondulosa, enriquecimiento de material orgánica y mica en los planos de laminación” (Caballero y Sierra, 1991).

Estos sedimentos corresponden a ambientes marinos de aguas tranquilas con corrientes reductoras con poca oxigenación (Faber, 1981). La secuencia estratigráfica corresponde a lo que se denomina Cuenca Catatumbo-Maracaibo que se extiende principalmente al oriente del macizo de Santander (Ward et al., 1973).

El ambiente de formación de la Formación Tibú-Mercedes según Caballero y Sierra (1991), es nerítico (el ambiente nerítico se extiende en plataforma continental cerca al litoral, comenzando desde 10 metros a los 200 metros de profundidad bajo el nivel de agua) de plataforma de carbonatos en la zona media (middle shelf) y cercana (Inner shelf) al continente, esto indica la influencia de abundante material proveniente de continente que forman unidades bien definidas como en las planicies formadas por mareas o “tidal flats” o material proveniente de deltas cercanos por corrientes paralelas a la línea de costa. Esto conlleva también sub ambientes tales como “Shelf lagoons” o lagunas cercanas a la costa, depresiones rellenas de lodos, bancos de arenas sumergidos y zonas de arrecife (Caballero y Sierra, 1991).

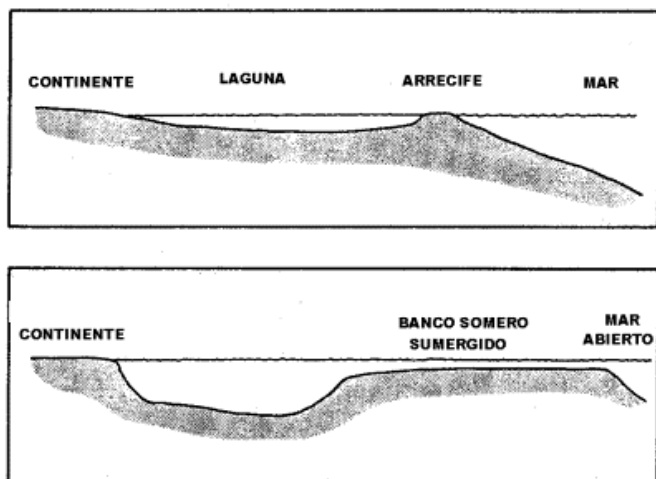


Ilustración 25: Se presenta el ambiente diagenético para la Formación Tibú Mercedes. Tomado de principios de sedimentación (Friedman and Sanders, 1978).

2.3 Tectónica

En el Mapa Geológico Generalizado de Santander, el departamento es dividido en tres provincias tectónicas, cada una está definida por características geológicas y tectónicas similares, la de interés que es la Provincia Macizo de Santander.

La provincia en la que se realizó el estudio esta subdividida por sectores que también reúnen particularidades que las dividen según su geología, tectónica o evento de formación; en donde se encuentra el Municipio de Málaga es en el Bloque Cucutilla (Royero y Clavijo, 2001).

La mayor parte de lo que se considera el macizo de Santander se encuentra en discusión, ésta está constituida principalmente por rocas ígneas y metamórficas de edades precámbricas (súper eón que constituye el intervalo de tiempo justo antes del inicio del periodo Cámbrico hace 541 millones de años aproximadamente según la Comisión Internacional de Estratigrafía, ICS en sus siglas en Ingles), el bloque a la que corresponde el área de estudio es Cucutilla, se constituye principalmente por bloques de rocas pequeños separados por fallas inversas con una inclinación

hacia el occidente principalmente, hay presencia de anticlinales y sinclinales estrechos y truncados por fallamiento con dirección SE-NW. Esto indica probablemente que en la zona existen fuerzas compresivas en dirección perpendicular a la longitud preferencial de las fallas inversas. Según Julivert (1960), dice que las rocas calcáreas que afloran en la región de García Rovira y en la zona de Matanza son retazos cratáceos o “outliers”, esto debido a que se encuentra ahí por presencia de fallas menores, siendo estructuras del basamento con importantes desplazamientos verticales con la parte oeste hundida, “conformando un patrón de bloques fallados en donde tiene retazos Cretácicos en su lado Este y deja al descubierto rocas precretácicas en su lado Oeste” (Tomado de Caballero y Sierra, 1991).

Según las Ward et al, 1973, denomina la zona como cuenca estructural de Málaga, siendo esta más una cuenca formada por acción estructural que una cuenca sedimentaria “in situ”, esto porque el espesor y carácter de las rocas cretácicas se asemejan al de otros lugares del Macizo sugiriendo que no hubo una cuenca local en el tiempo de formación de estas rocas.

En la zona donde se encuentra el Municipio de Málaga corresponde a un sinclinal, se extiende de manera casi oblicua con dirección de norte a sur; al oeste limita rocas de la Formación Floresta con rocas metamórficas pre-devónicas y el batolito de Santa Bárbara y al este por la Falla de Servitá, siendo la falla de más influencia a la zona de estudio por su cercanía. (Ward,1973).



Ilustración 26: Mapa de las provincias y bloques en el departamento de Santander según el Mapa Geológico Generalizado de Santander, modificado de Mapa de las provincias y bloques en el departamento de Santander, Royero y Clavijo, 2001.

En la Memoria Explicativa de la Geología del Cuadrángulo I-13 Málaga – Geología Plancha 152 Sotatá el área de estudio se encuentra dentro de una zona bastante plegada (conocido como el área río Congreso-Málaga-Confluencia río Servitá-Chicamocha limitado al oeste por el río Guaca y al este por el río Servitá), comenzando por un gran anticlinal limitada al oeste por la Falla de Baraya, al este, por un estrecho sinclinal que culmina al oeste del Municipio de San José de Miranda continuado por un anticlinal que es la estructura más occidental que se observa geomorfológicamente en el área de estudio, con una altura hasta de 3000 metros sobre el nivel del mar conocido como el alto de Málaga (Julivert, 1960, tomado de Vargas et al, 1981), la parte este del anticlinal tiene un alto grado de buzamiento que se observa al oeste de los municipios de Málaga y San José de Miranda, a su vez actúa como el flanco oeste del Sinclinal de Málaga-Miranda (Ilustración 27) que culmina al sur del Municipio de San José de Miranda y es cortada al sur del municipio mencionado por la Falla Servitá la cual actúa como límite tectónico con lo que respecta al valle del río Servitá (Vargas et al, 1981).

El Sinclinal Málaga-Miranda aparentemente tiene un contacto fallado con el anticlinal inmediatamente después al oeste, según Vargas et al. (1981) presenta un aparente salto débil relacionado al mecanismo del flanco occidental del sinclinal y su alto grado de buzamiento. Según el mapa Geológico Plancha 136 del Servicio Geológico Colombiano, la población de Málaga está construida sobre un sinclinal que cumple con la posición que Ward et al., 1973 describe la ubicación del Sinclinal de Angosturas, a su vez Vargas et al. (1981) a este sinclinal le da el nombre de Málaga-Miranda pero hacia el norte se le conoce como Sinclinal de Angostura.

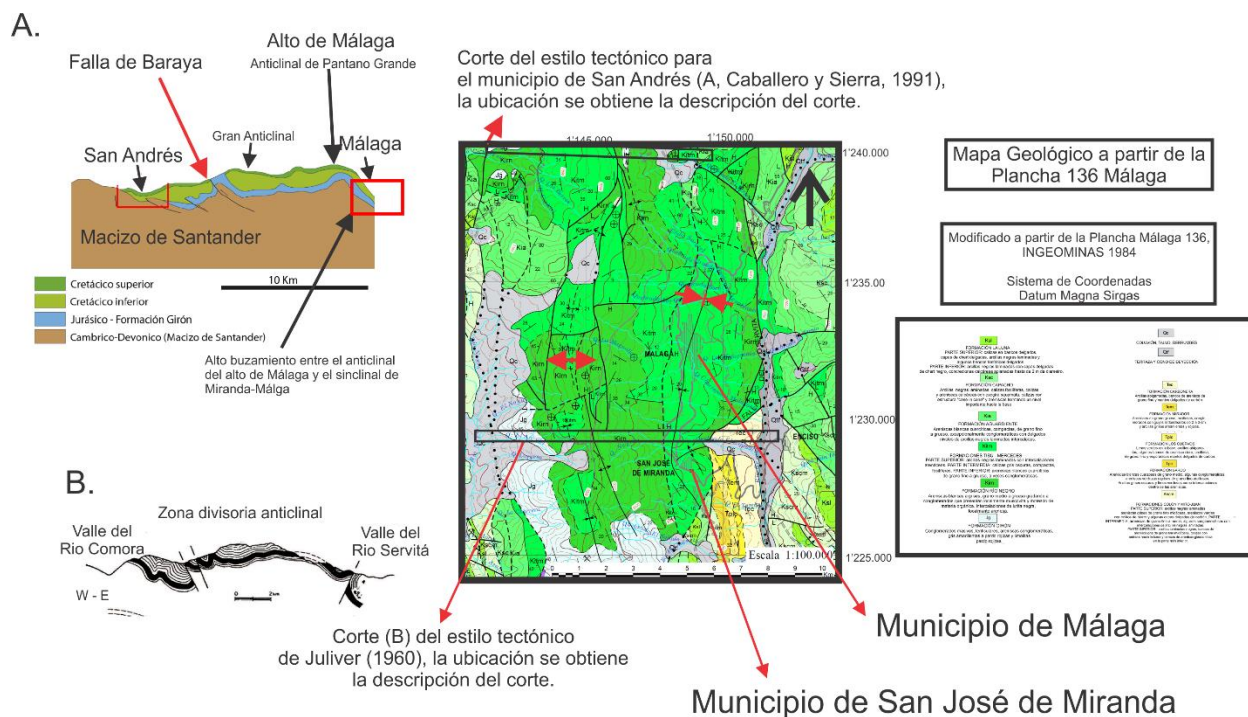


Ilustración 28: Corte esquemático del área río Congreso-Málaga-Confluencia río Servitá-Chicamocho limitado al oeste por el río Guaca y al este por el río Servitá, y parte del Macizo de Santander. Todos los cortes van de este a oeste. Parte A modificado de Caballero y Sierra (1991), parte B obtenido de Juliver 1960.

Según el Mapa Geológico Generalizado Santander de (Royero y Clavijo, 2001) el rasgo más característico de la zona es la Falla de Servitá siendo su extensión de 65 km aproximadamente con dirección N-S de naturaleza inversa e inclinación hacia el occidente.

Vargas et al. (1981) dice que la Falla de Servitá se extiende de norte a sur, en la parte norte de la falla es bastante rectilínea (extendiéndose paralelo al Sinclinal de Angostura) y tiene un gran salto litológico al este con rocas del “terciario” (correspondiente a la era Cenozoica) y al oeste con rocas del Jurasico, a medida que se va hacia el sur el salto de tiempo entre el contacto litológico de la falla disminuye hasta poner rocas del periodo Cretácico al este y oeste a la altura del municipio de Málaga donde la falla comienza a ser sinuosa con una pequeña inclinación hacia el

oeste y corta las estructuras que menciono en el área río Congreso-Málaga-Confluencia río Servitá-Chicamocha de manera transversal hasta que en el sur del municipio de San José de Miranda se divide en dos o forma una falla satélite, siendo la falla más occidental el contacto entre rocas del Macizo de Santander al oeste con rocas de la periodo Cretácico al este y la falla más oriental que pone en contacto rocas cretáceas al oeste con rocas de la era Cenozoica al este que en esa zona son parte del valle del río Servitá.

Al sur de la zona área de estudio está la Falla del Chicamocha, desde el Municipio de Capitanejo al sur no presenta mayores saltos con una inclinación bastante vertical y la sigue el río Chicamocha, al norte del Municipio de Capitanejo se sigue como la estructura que parte casi transversalmente el Sinclinal del Servitá (que se encuentra al este del Sinclinal Málaga-Miranda y las divide la Falla de Servitá) hasta que se une con la Falla de Servitá al este de Málaga (Vargas et al., 1981).

Falla de Baraya tiene una dirección Norte-Sur sobre el lado occidental del área río Congreso-Málaga-Confluencia río Servitá-Chicamocha (Vargas et al., 1981) donde el desplazamiento límite entre contacto de rocas es de 2000m (Ward et al., 1973).

El área se encuentra en general bastante fracturada predominando fallas inversas de alto ángulo con dirección N-S mientras las fracturas transversales son de tipo normal (tomado de Vargas et al., 1981).

Adicionalmente el área del municipio de Málaga cuenta con 8 fallas locales de las cuales solos 3 están identificadas y tienen nombre por parte del servicio geológico colombiano (SGC), el resto cuentan con el nombre de la zona donde se encuentra (EOT Málaga, 2015).

La Falla El Término es una falla inversa con dirección N-E intersectando la Falla del Río Servitá, su plano sigue el valle encajonado de la Quebrada El Término (EOT Málaga, 2015).

La Falla Calichal con dirección E-W intersecta las Fallas del Río Servita y Málaga, es de tipo inverso con bajo ángulo, el bloque derecho esta levantado (EOT Málaga, 2015).

La Falla Buena Vista es una falla inversa de bajo ángulo con dirección E-W, con el bloque izquierdo levantado, es intersectada por la falla El Alto y la falla Málaga e intersecta la falla Alisal (EOT Málaga, 2015).

La Falla Agua Blanca tiene dirección N-E, sigue el curso de la Quebrada Agua Blanca hasta llegar a la falla del Río Servitá, es intercectada por la falla Calichal (EOT Málaga, 2015).

La Falla Guásimo tiene dirección N-E, el bloque levantado es el izquierdo, se intersecta con la Falla del Río Servitá (EOT Málaga, 2015).

La Falla de Málaga tiene dirección N-S paralela a la falla del Río Servitá, de tipo normal de débil salto, separando el flanco abrupto del sinclinal de Miranda-Málaga del casco urbano de Málaga siendo esta parte la zona hundida, esta falla es posterior a las fallas transversales de tipo inverso (EOT Málaga, 2015). Se discute si realmente es una falla o el alto buzamiento de la zona (Vargas et al., 1981).

La Falla El Alto es de tipo normal con dirección N-S paralela a la falla del Río Servitá, el plano se encuantra por encima de los 3000 m.s.n.m., con el bloque oriental hundido. Al norte se intercepta con la falla Calichal, a medida que avanza al norte se separan en dos fallas paralelas con dirección N-S (EOT Málaga, 2015).

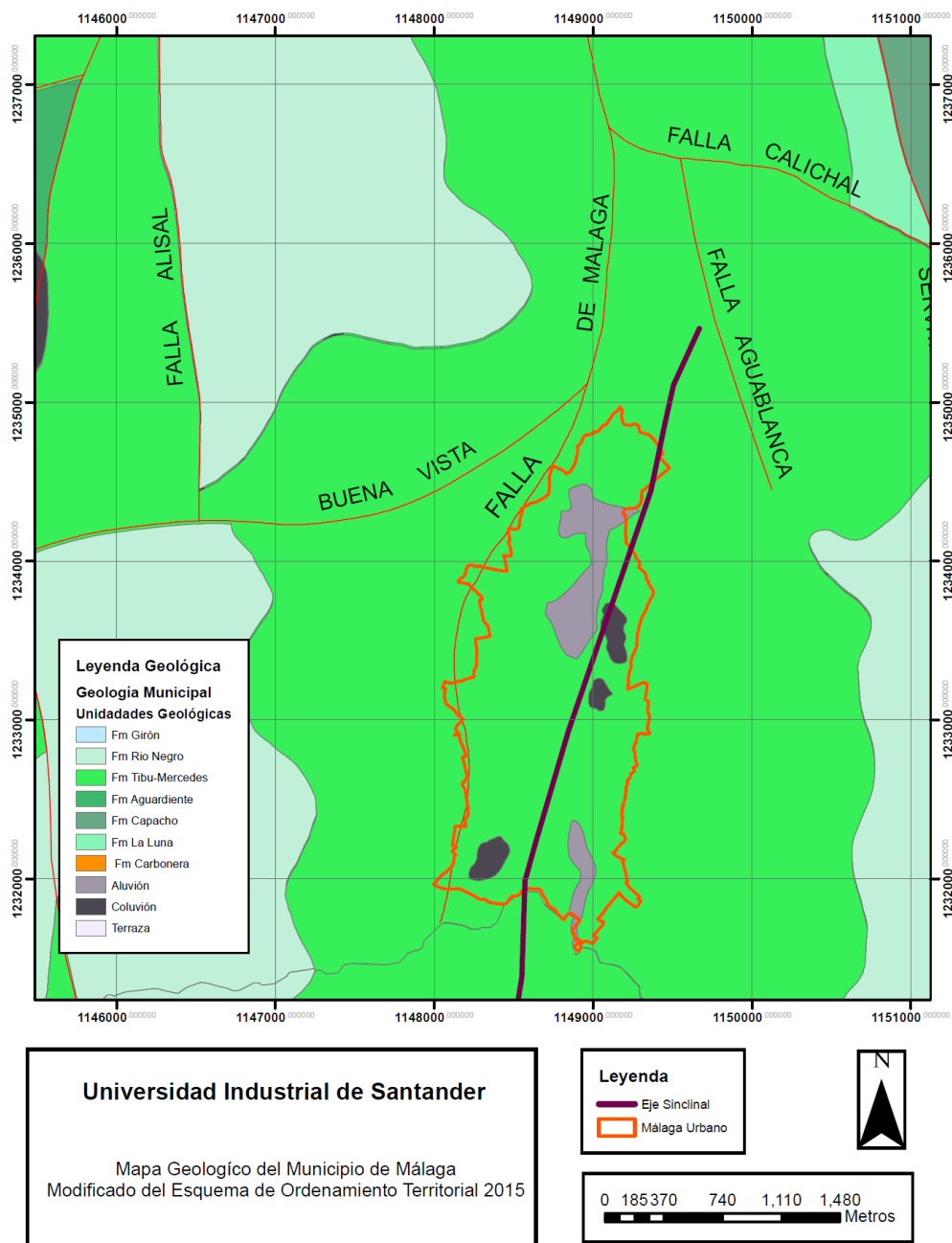


Ilustración 29: Mapa de geológico del Municipio de Málaga, contiene la litología y las fallas que están en el municipio .Tomado y modificado del Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Málaga (2015).

2.4 Hidrografía

2.4.1 Cuenca Hidrográfica.

La cuenca hidrográfica se define como el área donde nacen los manantiales y pequeños arroyos, que vierten sus aguas a un cauce principal que, a su vez, pueden desembocar a un río principal, o en un depósito natural de agua. Se delimita por una línea divisoria o de divorcio de las aguas, dada por la altura máxima que divide dos cuencas o microcuencas contiguas.

El drenaje es de tipo paralelo y todas las quebradas se originan en la zona alta del municipio tributando sus aguas al río Servitá. Las principales quebradas son: El Término, Pescadero, Aguablanca, los Molinos, Tajamar y La Magnolia (ver Ilustración 30). De estas, las quebradas los Molinos y la Magnolia cruzan el casco urbano de Málaga causando daños durante los años con anomalías positivas de precipitación. Aunque estas dos últimas quebradas se encuentran canalizadas en un gran tramo, hay sectores que no y cruzan algunos solares pudiendo causar inundaciones en época de máximas crecidas, bien por alta pluviosidad, o por represamientos de sus aguas ocasionados por obstrucción de los cauces por donde deben fluir libremente las aguas de los dos afluentes (E.O.T. 2015).

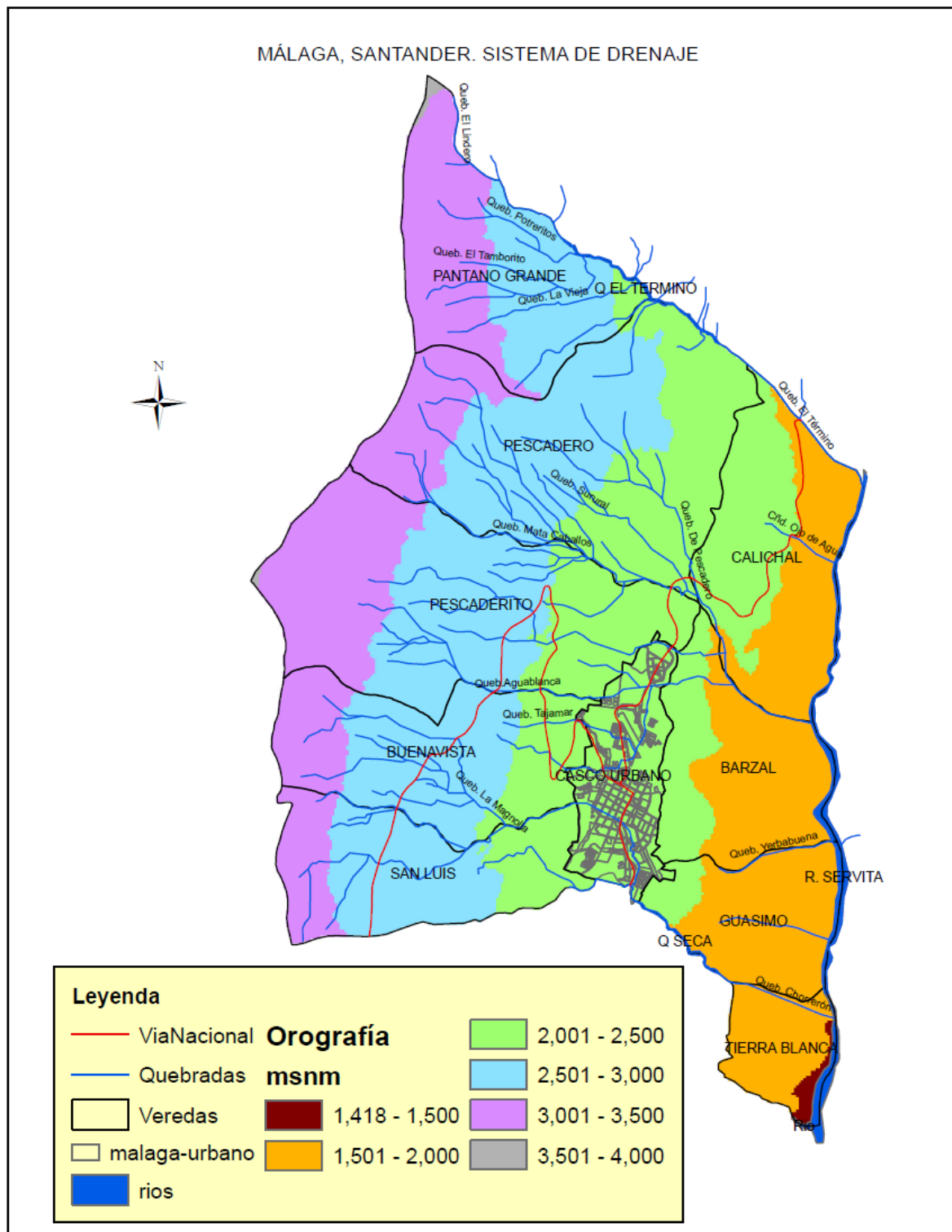


Ilustración 30: Sistema de drenaje del municipio de Málaga. Fuente: revisión EOT (2015).



Ilustración 31: fotografías de quebrada la Magnolia.(1) Quebrada Magnolia a su entrada al casco urbano municipal, el día 4 de mayo de 2015. (2) Canal de la quebrada Magnolia. Tramo inicial.(3) Canal de la quebrada Magnolia en su tramo inicial. Medidas: ancho 3.0 metros, profundidad del canal 1.60 m(4) Canal de la quebrada Magnolia a su paso por la carrera 9. Vista aguas arriba.(5). Canal de la quebrada Magnolia a su paso por la carrera 9. Vista aguas abajo. (6) Quebrada Magnolia a su salida del municipio de Málaga, en la confluencia con la Quebrada Seca. (Tomado y modificado del E.O.T(2015)).



Ilustración 32: Fotografías tomadas de la quebrada molinos.(1) Quebrada Molinos a la entrada del área municipal. (2) Quebrada Molinos a su paso por el área municipal. Vista aguas bajo (3) Canal de la quebrada Molinos a su paso por el área municipal. (4) Quebrada Molinos a su paso por el área municipal. (5) Quebrada Molinos a su paso por el área municipal. (6) Quebrada Molinos a su paso por el área municipal.

quebrada Molinos en el sector medio del casco urbano (4) Altura del agua, en la casa del aeropuerto, alcanzada por la creciente de la quebrada Molinos del día jueves 30 de abril de 2015.(5) Muro derribado por la creciente de la quebrada Molinos del día jueves 30 de abril de 2015, al frente de la casa del aeropuerto (6)Canal, en el cruce de la pista del aeropuerto, con las aguas de las quebradas Molinos y Tajamar, tomado y modificado del E.O.T.(2015).

2.5 Aspectos de Hidrogeológicos

Los datos obtenidos en ámbitos atmosféricos son originarios de la estación que se ubica en el municipio del Cerrito dentro de la cuenca del río Servitá. Identificando varios factores relacionados con las concentraciones de humedad en el área.

2.5.1 Nubosidad y tiempo de luz solar

La respuesta de la estación meteorológica indica que en el periodo de vida desde 1973 a 2005 que los meses con mayor nubosidad son entre abril y octubre, oscilando entre 4 a 6 octas, indicando que el cielo no se opacan totalmente en los periodos de mayor nubosidad. Se relaciona inversamente directo con las horas de brillo solar, indicando que a mayor nubosidad menor brillo solar y viceversa. Para poder relacionar estos periodos con periodos de lluvias se necesita relacionarlos con los datos de pluviometría.

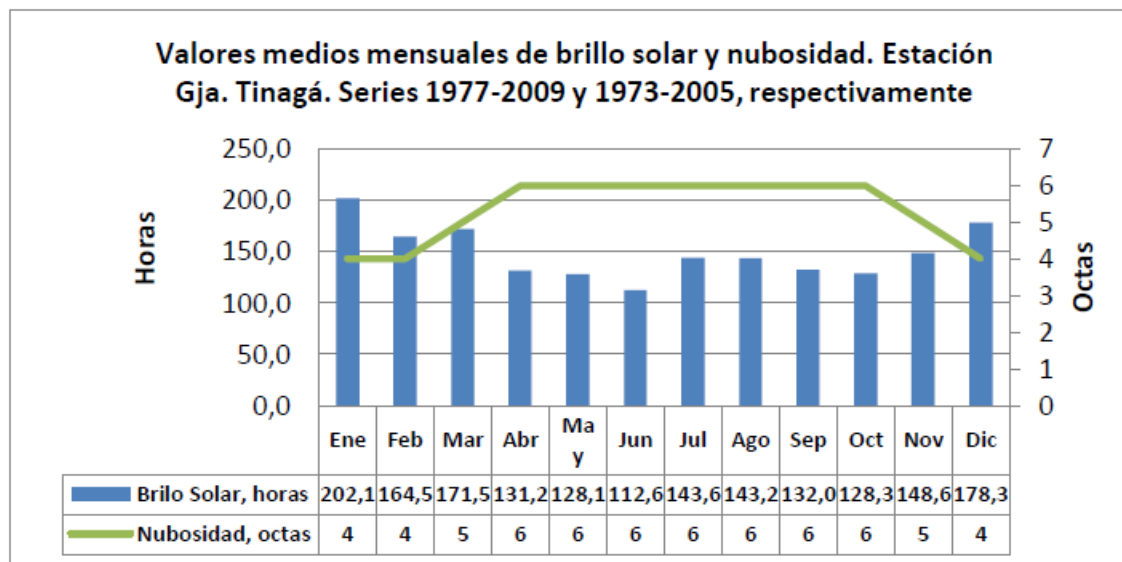


Ilustración 33: Valores de horas de brillo solar y la concentración de nubosidad (Octas) en la estación meteorológica Granja Tinagá. Fuente EOT Málaga 2015.

2.5.2 Humedad Relativa

La humedad relativa se obtiene a partir de la estación meteorológica ubicada en el municipio del Cerrito y el municipio de Capitanejo, según el EOT para el municipio de Málaga (2015) se hizo una equivalencia entre la altura de las estaciones y la altura del municipio de Málaga. La gráfica estudiada del EOT Málaga 2015, se observa mayor concentración de humedad relativa en los meses donde también hay mayor nubosidad, las concentraciones altas de humedad relativa indican también aumento en la precipitación. Observando que para los meses de abril a noviembre las concentraciones aumentan, teniendo picos en los meses de mayo y octubre.

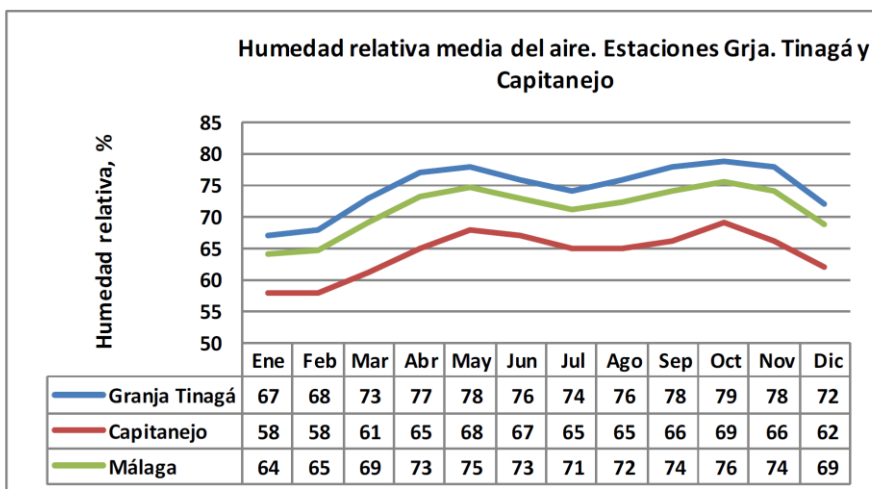


Ilustración 34: Grafica de concertaciones de humedad relativa (%) en las estaciones de Granja Tinagá (municipio del Cerrito) y Capitanejo con la relación obtenida por los estudios del EOT Málaga 2015. Fuente EOT Málaga 2015.

2.5.3 Evotranspiración

El E.O.T. de Málaga para el año 2015 plantea tres zonas del área del municipio para hacer el estudio del balance hídrico del suelo a razón de la altitud, la zona de estudio se encuentra en el área de los 2300 m.s.n.m.

Tabla 1: Balance hídrico del suelo a 2300 m.s.n.m. en el municipio de Málaga. Fuente EOT Málaga 2015

Suelo franco arcillo arenoso, profundidad efectiva: 100cm
Fracción volumétrica de agua aprovechable: 1.5 mm/cm
Capacidad de almacenamiento del suelo: 150 mm

Precipitación media
Estación Málaga

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	AÑO
Precipitación Media Málaga Medio	38,4	75,8	124,8	218,6	202,7	101,2	81,8	113,3	166,8	250,0	197,3	74,9	1645,6
Evapotranspiración Potencial – ETP	105,4	98,0	108,5	96,0	93,0	87,0	96,1	99,2	93,0	89,9	87,0	96,1	1149,2
Pérdidas de almacenamiento del Suelo	57,5	10,5	0,0	0,0	0,0	0,0	14,3	0,0	0,0	0,0	0,0	21,2	103,6
Almacenamiento del Suelo	71,3	60,7	77,0	150,0	150,0	150,0	135,7	149,8	150,0	150,0	150,0	128,8	150,0
Evapotranspiración Real – ETR	95,9	86,3	108,5	96,0	93,0	87,0	96,1	99,2	93,0	89,9	87,0	96,1	1128,1
Déficits	9,5	11,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,1
Excesos	0,0	0,0	0,0	49,6	109,7	14,2	0,0	0,0	73,6	160,1	110,3	0,0	517,5

El estudio fue hecho a partir de las ecuaciones de Penman Moneteith, único método que reconoce la FAO (Allen et al, 2006) para hallar la evotraspiración utilizando datos meteorológicos. También se utilizó en el estudio las ecuaciones de Thornthwaite (E.O.T. Málaga, 2015) para clasificación de la humedad de los suelos y su adaptación por parte del IDEAM, a esta clasificación se le conoce como Factor de Humedad o Fh, en donde se relaciona el exceso (relación de la precipitación y la evotrasnpiración) con el déficit (relación de la evotrasporación con la precipitación) y la evotranspiración a lo largo del año. El resultado Fh es de 43.9, clasificándose en un suelo semihúmedo, según el IDEAM el balance hídrico del suelo se encuentra en adecuado.

Los datos son coherentes con los periodos de brillo solar y la humedad relativa del aire, en donde se observa déficits en los meses de enero y febrero, y excesos en los meses de mayo, junio, septiembre, octubre y noviembre.

2.5.4 Clasificación del Clima

Para la clasificación del clima se utilizó en el esquema de ordenamiento territorial de Málaga del 2015, el método de Cladas-Lang, en donde se clasifica la pluviosidad según la altitud del terreno, en combinación con la clasificación de Enmanuel Martone, en donde se busca el índice de aridez (IM), con la finalidad de buscar el tipo de clima basado en la temperatura media actual, precipitación total anual, la precipitación y la temperatura del mes más seco. Como resultado se han dividido tres zonas, la de menos altitud se clasifica como Templado Semiárido, la zona donde se encuentra el casco urbano de Málaga el clima se identifica como frio semihúmedo y la parte del alto de Málaga (donde se ubica parte de la recarga del sistema Hidrogeológico) como paramo semihúmedo.

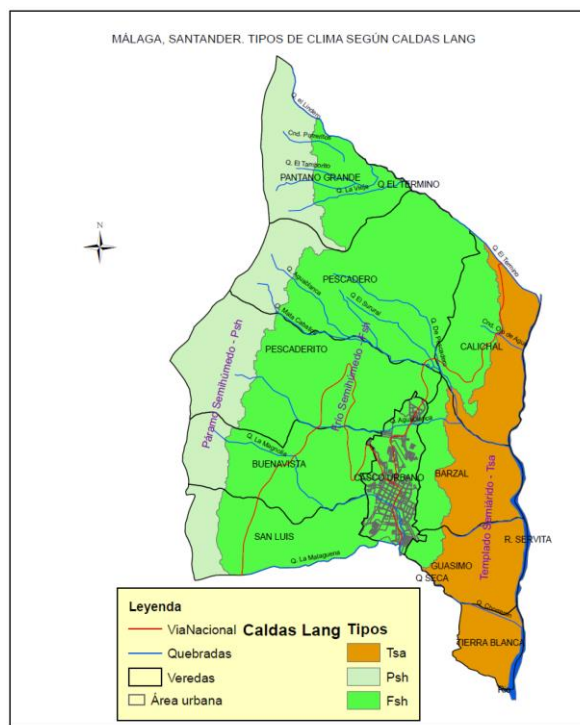


Ilustración 35: Tipos de clima según Caldas-Lang en el municipio de Málaga. Fuente EOT Málaga 2015.

2.5.5 Escorrentía media

Rendimiento Hídrico o escorrentía general se han tomado los datos basados en la fórmula para áreas extensas y periodos largos de tiempo, requiere de la precipitación media del área, caudal medio del tiempo que se hace el estudio en la zona, evotranspiración media del lugar y periodo, y el termino de discrepancia (Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur, UNESCO, 1982. Tomado del E.O.T Málaga 2015). Se relacionan los temas de evotranspiración real (basadas en las ecuaciones propuestas del IDEAM ENA, 2010. La fórmula de Turc y la fórmula de Budyko. Tomado del E.O.T. Málaga 2015). En el estudio que se hizo para el Esquema de Ordenamiento Territorial de Málaga, se dividió tres dependiendo de la altitud, que se

asemeja a la división de climas, una zona baja a los 2000 m.s.n.m con 831 has, una zona intermedia entre 2000 m.s.n.m a 3000 m.s.n.m con 3584 has y un área por encima de los 3000 m.s.n.m. con 1696 has.

Tabla 2: Datos de escorrentía media en l/s por hectárea. Tomado del E.O.T. Málaga 2015.

	Málaga, zona baja, 831 has		Málaga, zona media, 3584 has		Málaga, zona alta, 1696 has	
	Precipitación media (P), mm	Temperatura Media, °C	Precipitación media (P), mm	Temperatura Media, °C	Precipitación media (P), mm	Temperatura Media, °C
Valores Medios Anuales	1309,0	20,4	1149,2	16,3	1300,0	12,2
Evapotranspiración Potencial (ETP) (Programa Eto-cal), mm	1270,8		1149,2		1018,5	
Evapotranspiración Real (ETR) (Turc), mm	920,0		815,5		620,4	
Evapotranspiración Real (ETR) (Budyko), mm	894,3		920,8		784,4	
Diferencia (P-ETP), mm	38,2		496,4		281,5	
Diferencia (P-ETP) (Turc), mm	389,0		830,1		679,6	
Diferencia (P-ETP) (Budyko), mm	414,7		724,8		515,6	
Escorrentía media por ETP, l/s.ha	0,0		0,2		0,1	
Escorrentía media por ETP-Turc, l/s.ha	0,1		0,3		0,2	
Escorrentía media por ETP-Budyko, l/s.ha	0,1		0,2		0,2	
Caudal medio con ETP, l/s	10,1		564,0		151,3	
Caudal medio con ETP (Turc), l/s	102,5		943,1		365,4	
Caudal medio con ETP (Budyko), l/s	109,2		823,5		277,2	

El modelo de lluvia para la escorrentía media y máxima está hecho en Málaga por el método Soil Conservation Service (SCS, según el E.O.T. Málaga, 2015), en donde se tiene en cuenta la pluviosidad efectiva, pluviosidad total del periodo y retención máxima potencial en la cuenca.

Según las condiciones de humedad del suelo del área, la distribución del uso del suelo, la composición de este y para un tiempo de lectura de pluviosidad continua de 5 días, se calcula una tasa de pluviosidad y variables del suelo dentro de la fórmula de la SCS, la cantidad de lluvia que se necesita para haya escorrentía o precipitación efectiva, para generar escorrentía en una pluviosidad entre los 35.5 mm a 53.3 mm se necesita que la lluvia se mayor de 10.7 mm, para generar escorrentía, con pluviosidad menor a 35.5 mm se necesita que lluvias superen a 25.5 mm, y para generar escorrentías en, concentraciones mayores de 53.5 mm se necesita que las lluvias sean mayores a 4.7 mm.

Una vez obtenidos estos valores se puede hayas la precipitación efectiva o escorrentía de acuerdo con lo aceptado por la FAO y obtenidos para que haya escorrentía con 53.5 mm en los que se necesita 4.7 mm, se puede obtener los valores de caudal máximo por periodos de retorno que están entrando en el casco urbano del Málaga para las quebradas La Magnolia y quebrada Molinos, esto con la idea de saber a futuro que obras pueden hacerse teniendo en cuenta el volumen hídrico para evitar inundaciones o daños a la población.

Tabla 3: Caudales máximos en la quebrada Magnolia para un periodo de retorno de 2, 10, 20, 50, 100 años, con un periodo de duración de 24, 6 y 4 horas. Tomado del E.O.T Málaga, 2015.

Años	m3/s, Microcuenca Q. Magnolia (820 Has.). Duración 24 horas	m3/s, Microcuenca Q. Magnolia (820 Has.). Duración 6 horas	m3/s, Microcuenca Q. Magnolia (820 Has.). Duración 4 horas
5	4.28	17.13	25.69
10	4.98	19.93	29.9
20	5.66	22.65	33.97
50	6.55	26.2	39.3
100	7.22	28.88	43.32

Tabla 4:Tabla. Caudales máximos en la quebrada Molinos para un periodo de retorno de 2,10, 20, 50, 100 años, con un periodo de duración de 24, 6 y 4 horas. Tomado del E.O.T Málaga, 2015.

Años	m3/s, Microcuenca Q. Molinos (65 Has.). Duración 24 horas	m3/s, Microcuenca Q. Molinos (65 Has.). Duración 6 horas	m3/s, Microcuenca Q. Molinos (65 Has.). Duración 4 horas
5	0.34	1.37	2.06
10	0.40	1.59	2.39
20	0.45	1.81	2.72
50	0.52	2.10	3.14
100	0.58	2.31	3.47

2.6 Geomorfología

La Geomorfología corresponde al estudio científico de paisajes, de los procesos que la modelan, organizarlos y sistematizar descripciones para elaborar clasificaciones adecuados según la British Society for Geomorphology.

En el área de estudio se identificaron cuatro tipos de ambientes geomorfogénicos correspondiendo a origen estructural, fluvial, denudacional y antropogénico (Rueda y Tavera, 2016).

La geoformas denudacionales corresponde a procesos exógenos tales como lluvia y viento, dando origen a la erosión, transporte y sedimentación, formando el relieve dependiendo fuertemente de la meteorización de la roca. En Málaga presenta la geoforma tipo Loma denudada (lld), se caracteriza por tener morfología alongada, con pendientes muy inclinadas entre 11° a 15° grados, con alturas no superiores a 200 metros desde su base, se caracteriza por que se genera a partir de le meteorización diferencial (Rueda y Tavera, 2016).

Las geoformas de tipo estructural están regidas principalmente por los movimientos de la corteza terrestre, representado por las fallas, sean de naturaleza compresivas o extensivas originando plegamientos y fallamientos. El municipio de Málaga se encuentra sobre una geoforma estructural conocida como cornisa estructural (scor), consisten en tener una superficie plana, con pendientes suaves a ligeramente inclinadas con un área de 2.5 km². Hacia el occidente por una ladera en contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc), superficie subvertical de forma cóncava a irregular, formada por una ladera que concuerda con la pendiente de la sierra homoclinal. Hacia el oriente por un escarpe en contrapendiente (Secp), consiste en una superficie de extensión larga con planos que van en contra de la pendiente. Y hacia el norte por un escarpe de línea de falla (Slfe) consiste en un plano vertical a subvertical con una pendiente abrupta, característica de una zona de falla, generada por erosión acentuada. Los datos tomados corresponden a la investigación hecho por Rueda y Tavera, 2016.

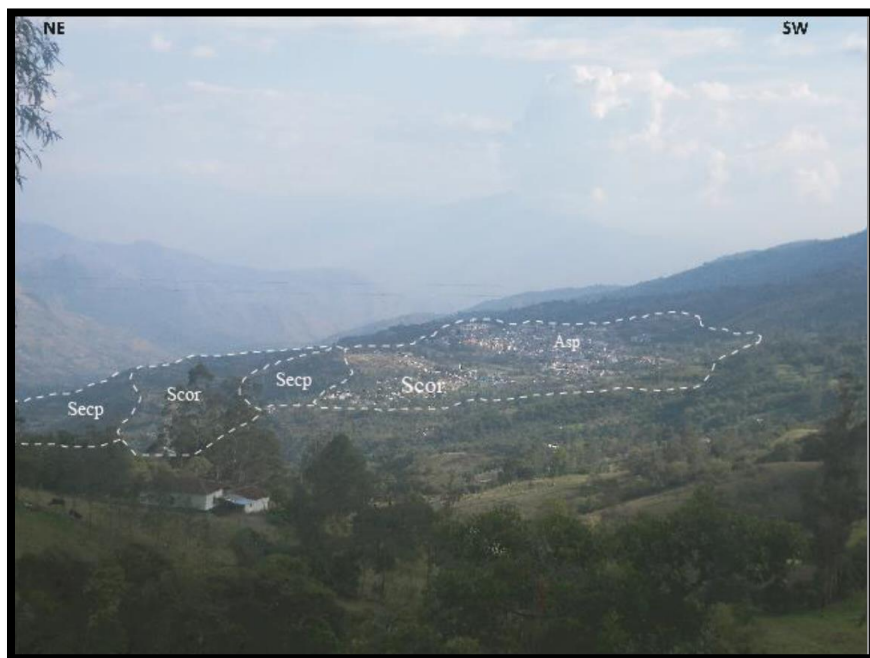


Ilustración 36: Geoformas de tipo estructural ubicados en el municipio de Málaga, la foto pertenece al trabajo de grado de Rueda y Tavera, 2016

Las geoformas de origen Antropogénico se caracterizan por la acción del hombre, sea por construcción de áreas urbanas o zonas en las que se han construido para desarrollar actividades agropecuarias y agrícolas. Dentro de Málaga se encuentra las superficies de explanación (asp) consiste en planos de allanamiento (terraceos o explanaciones), desarrolla sobre laderas y sustratos rocosos de materiales in consolidados para adecuar zonas para construcciones generalmente urbanas (Rueda y Tavera, 2016).

Las geoformas de tipo fluvial están controladas principalmente por corrientes de agua que ayudan al proceso de meteorización y de erosión, junto con ella aparece el transporte de sedimentos y la sedimentación, estando los causes hídricos como zonas más afectadas. Málaga presenta

geoforma de tipo cauce aluvial (fca), consiste en un canal hecho por los procesos de erosión de las corrientes estacionales, dependiendo de factores como la pendiente, carga de sedimento y la resistencia del lecho a la erosión (Rueda y Tavera, 2016).

3. Metodología

Inicialmente se realizó una compilación de información para comprender los aspectos teóricos y técnicos relacionados con el desarrollo del trabajo, esto incluye, tesis de grado, libros, mapas, memorias explicativas, entre otros.

En octubre del 2016 se realizó una campaña de reconocimiento geológico con el fin de identificar las zonas adecuadas y viables para realizar los estudios geofísicos, en esta, se realizaron estaciones de reconocimiento geológico en afloramientos, fuentes hídricas, y demás lugares, como medida de reconocimiento para la posterior toma de datos.

Las mediciones necesarias para el desarrollo de este trabajo fueron elaboradas durante el mes de febrero del 2017 después de una temporada lluviosa.

3.1 Adquisición De Datos Con Tomografías Eléctricas

En primera medida se llevó a cabo el montaje del equipo y se realizó la verificación de la correcta instalación de las líneas. En total se tomó el registro de 6 líneas topográficas ubicadas alrededor de la zona urbana de Málaga-Santander, teniendo en cuenta los diversos parámetros óptimos para la toma de datos de resistividades con el tomógrafo, dos de estas líneas topográficas fueron tomadas en los predios de la sede UIS-Málaga, las cuales fueron utilizadas para la elaboración del proyecto de grado “Caracterización del Subsuelo Mediante Prospección Geofísica de Resistividades (Tomografía Eléctrica y Sondeos Eléctricos Verticales SEV’s) con Fines

Hidrogeológicos en la Sede de Málaga de la Universidad Industrial de Santander (UIS)” desarrollado por María Angélica Salamanca para el título de geóloga cargo del profesor Ing. Luis Eduardo Moreno Torres.

3.1.1 Equipo de registro

Para realizar la adquisición de las tomografías se utilizó el equipo Supersting R8, desarrollado por la compañía Advanced Geosciences, Inc especializada en tecnología avanzada para adquisición de imágenes geofísicas. Este equipo consta de los siguientes elementos:

- a. 1 unidad central de registro, resistivímetro Supersting R8/IP , con capacidad para realizar 8 medidas simultaneas en adquisiciones
- b. Caja conmutadora multielectrodo
- c. Fuente de alimentaciones:1 batería de 12V
- d. 8 cables de adquisición con 7 conexiones cada uno y 10 metros de espaciado aprox entre cada una

e. 56 electrodos de acero inoxidable



Ilustración 37: Componentes del equipo utilizado (tomógrafo). Fotografías tomadas en campo

3.1.2 Metodología de la adquisición de datos

En el proceso de adquisición de datos se disponen los 56 electrodos con diversos espaciados según lo permite la extensión del terreno donde se realizan las tomografías.



Ilustración 38: Fotografías del montaje de los electrodo.



Ilustración 39: Electrodo pasivos tipo “Take-outs”. Estacas de acero inoxidable diseñadas para sostener los electrodo. Tomado de Página web de la Advanced Geosciences, Inc.

Una vez instalados los 56 electrodo se procede a realizar el test de resistencia del contacto de los electrodo con el terreno, el cual nos indicara si todos los electrodo están correctamente conectados, para si proceder con la toma de dato respectiva, Para el estudio se utilizó el método

Wenner-Schlumberger, por su buena capacidad para diferenciar secuencias horizontales y tener la capacidad de llegar a mayor profundidad en comparación con los otros métodos. Con ayuda de cintas métricas se ubican en el suelo las estacas y posteriormente se conectan los electrodos. Una vez extendido se procede a conectar la switch box o caja conmutadora, a la Supersting y a la batería de 12 voltios, para comenzar la adquisición.

3.2 Adquisición de Datos con Sondeos Verticales Eléctricos.

Las mediciones necesarias para el desarrollo de esta parte del trabajo se toman en el mes de febrero del 2017 durante la época seca, en primera estancia se escogen 3 diferentes lugares para realizar estas mediciones con el fin de soportar la información alrededor del municipio de Málaga, y poder identificar donde se encuentran las mayores concentraciones de agua en el subsuelo a lo ancho del municipio, estos puntos donde se realizan los sondeos eléctricos verticales (SEV) fueron escogidos según la morfología del terreno teniendo en cuenta que el municipio está ubicado en un sinclinal.

3.2.1 Equipo de registro

La adquisición de los sondeos eléctricos verticales se realiza con el instrumento *ABEM Terrameter SAS 1000* desarrollado por la compañía *ABEM Instrument AB*, este instrumento consiste en:

- a) una unidad básica llamada el “Terrámetro SAS 1000” que es la unidad de procesar los datos.
- b) dos carretes de potencial,
- c) dos carretes de inducción eléctrica,
- d) dos cables conectores entre carretes y unidad central para potencial

- e) dos cables conectores para carrete y unidad central para corriente
- f) dos cables para conectar con la batería,
- g) una batería,
- h) cuatro estacas de acero inoxidable
- i) cuatro caimanes para conectar las estacas con carretes.

Adicionalmente se utiliza un equipo de comunicación (walkie-talkies) marca Motorola con el fin de agilizar las conexiones de los cables y las estacas a diferentes distancias.



Ilustración 40: Equipo de registro utilizado para La adquisición de los sondeos eléctricos verticales se realizó con el instrumento ABEM Terrameter SAS 1000 desarrollado por la compañía ABEM Instrument AB.



Ilustración 41: Realización del montaje en campo del equipo de registro para los sevs.

3.3 Procesamiento De Datos:

Al terminar el trabajo de campo, seguidamente se realizó el procesamiento de datos utilizando el método robusto de inversión de datos, con este se delimitaron las zonas, de acuerdo a las lecturas de resistividades eléctricas encontradas.

3.3.1 Procesamiento de las tomografías eléctricas resistivas

Una vez adquiridos los datos de campo se procesan para obtener los resultados, mediante el uso del software EarthImager 2D desarrollado por Advanced Geosciences, Inc, propio del tomógrafo. EL objetivo del proceso corresponde a lograr una imagen en profundidad a partir de las lecturas de resistividad en una imagen llamada sección de resistividad invertida, en 2D.

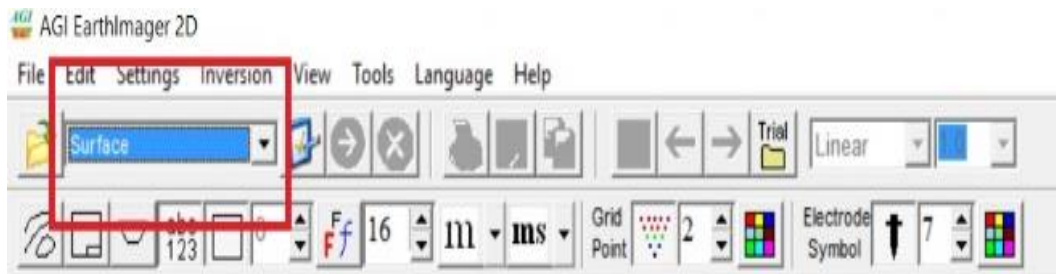


Ilustración 42: Selección de la característica del archivo a importar.

El primer paso se importa el archivo XXX.stg que genera el tomógrafo al hacer la adquisición al programa, así se observa la pseudosección de resistividad aparente obtenida en campo.

El paso siguiente se selecciona la configuración por defecto según la recomendación de la guía proporcionada en el grupo de Geomática de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, con el objetivo de proporcionar parámetros de error mínimo, descartar los ruidos generados por datos errados para obtener una buena sección. Para el método de inversión se seleccionó la Inversión Robusta, debido a que procesa mejor las zonas, difiere las resistividades marcándolas más y el método de elementos finitos que a partir de relaciones de ecuaciones diferenciales busca hacer el modelo que mejor se ajusta al obtenido en campo, se utiliza el programa debido a la enorme cantidad de datos que influyen cuando se construye la sección.

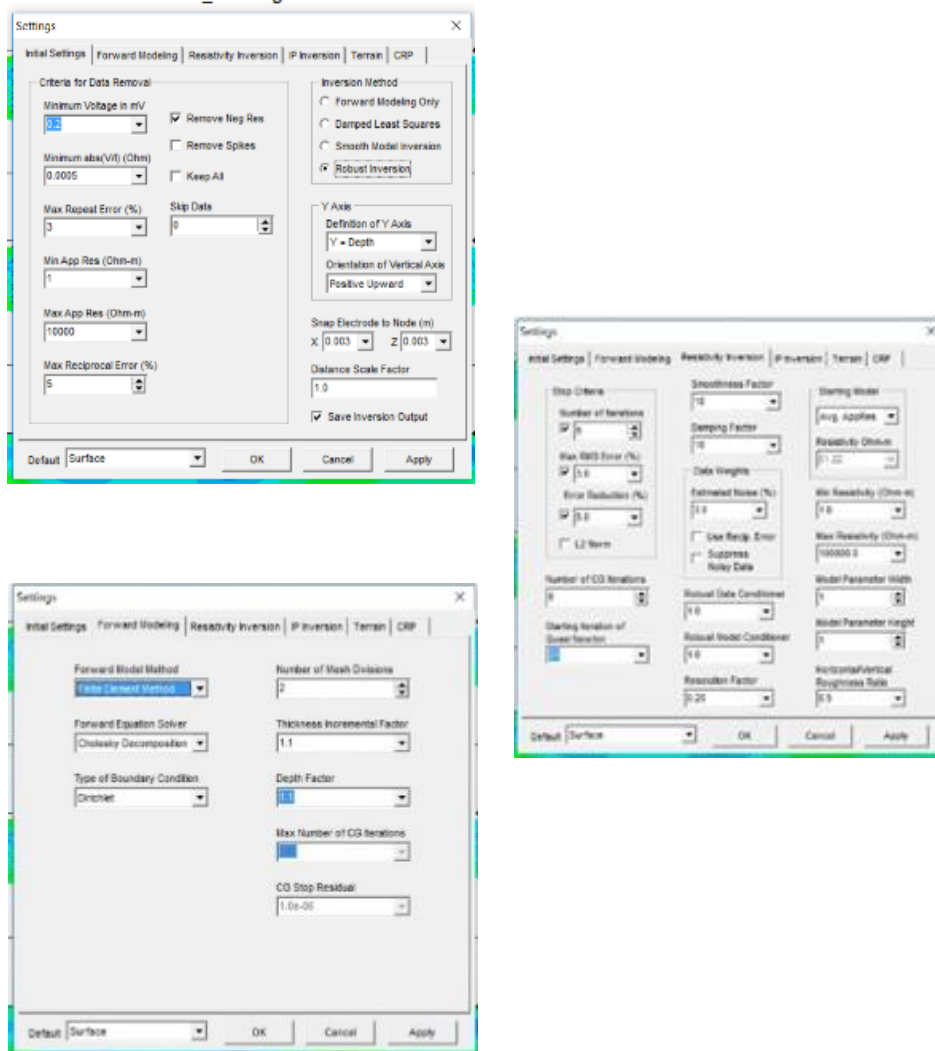


Ilustración 43: Selección de parámetros para procesar la adquisición en el software Earthimager 2D.

archivo XXX.trn para incluir la superficie real a lo largo de la línea extendida sobre la topografía.

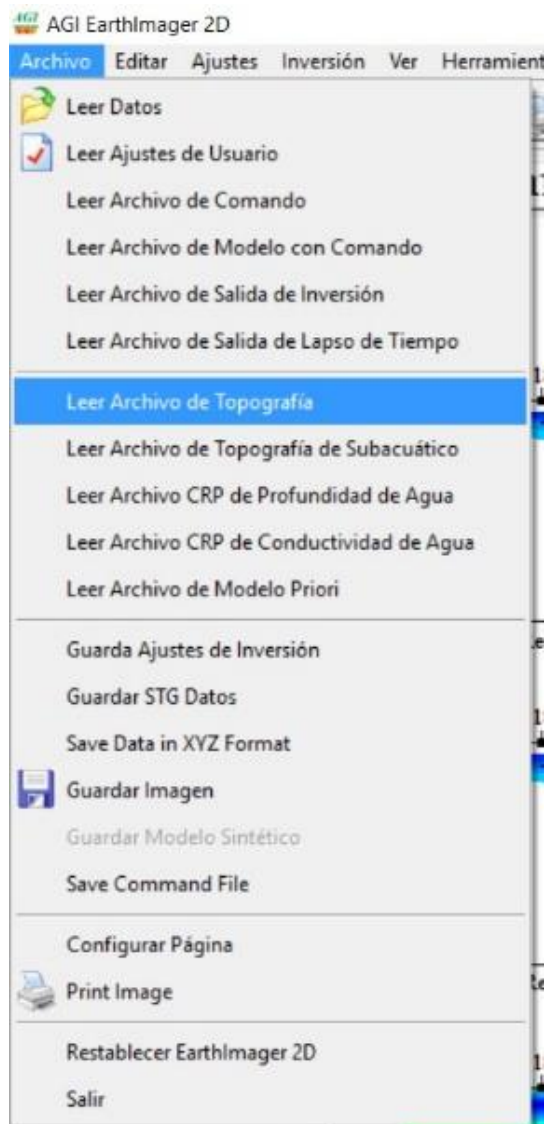


Ilustración 44: Selección de Opción para importar la topografía de la extensión de la tomografía.

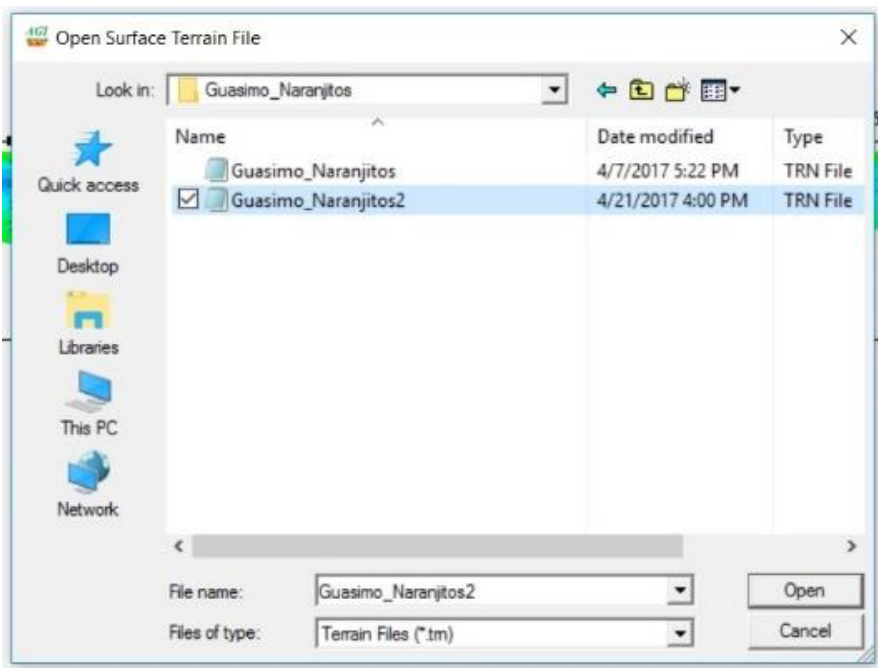


Ilustración 45: Selección de Archivo XXX.trn donde se encuentra la topografía.

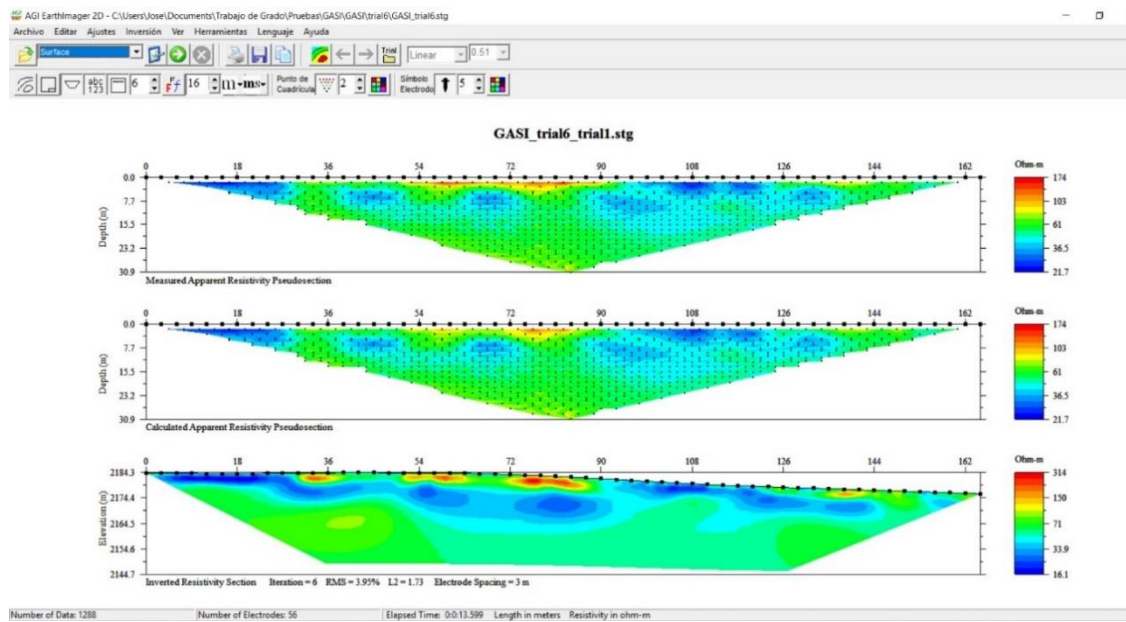


Ilustración 46: Resultado de la inversión de la topografía en la inversión de datos en la tomografía.

El proceso se observa en la gráfica de interacciones contra error. Para cada interacción el software genera una sección que grafica a través de su interfaz gráfica, y la compara con lo obtenido en campo y calculado.

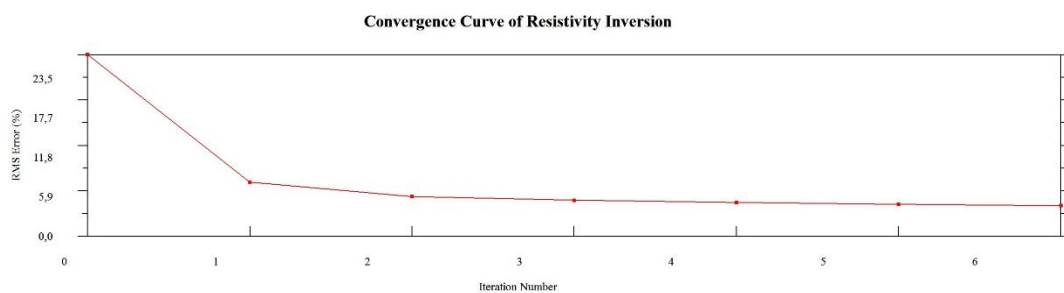


Ilustración 47: Grafica en donde se observa la relación de interacción en contra del error que tenía la sección invertida durante esa interacción, a medida que avanza se observa que disminuye.

Concluido el procesamiento se procede a observar la magnitud del error para ajustar la sección de resistividad invertida en comparación con lo obtenido en campo, con la prioridad de tener un error menor a 5 %. Para ello el software ofrece la opción de utilizar “*Data Misfit*” o datos que no se ajustan, con la intención de corregir posibles errores en la toma de datos y disminuir el error.

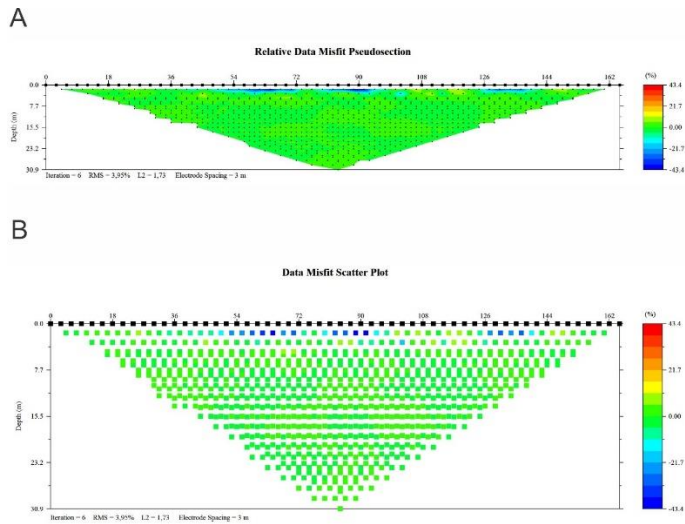


Ilustración 48:A). Se observa una sección que utiliza los puntos para crear zonas que no están en armonía en la pseudosección, observándose a medida que cambian el color verde por zonas a razón que el error incrementa positivamente o negativamente. B). Se observa los datos en los puntos tomados por el tomógrafo no acordes o que varían en comparación con la sección resultante del proceso por puntos que presentan el error a medida que cambian de color.

La grafica de puntos tomados en campo en comparación con los puntos calculados por la resistividad aparente se muestra con relación lineal como una relación ideal y sin error entre lo calculado en campo con lo obtenido teóricamente, a medida que la desviación standard en el conjunto de datos aumenta, el error también aumenta e indica posibles fallas en la adquisición de datos, o variaciones en las propiedades del subsuelo, no propias del medio físico, sino inducidas o generadas por anomalías que de tomarse en cuenta, variarían el modelo que se genere de los datos adquiridos en campo

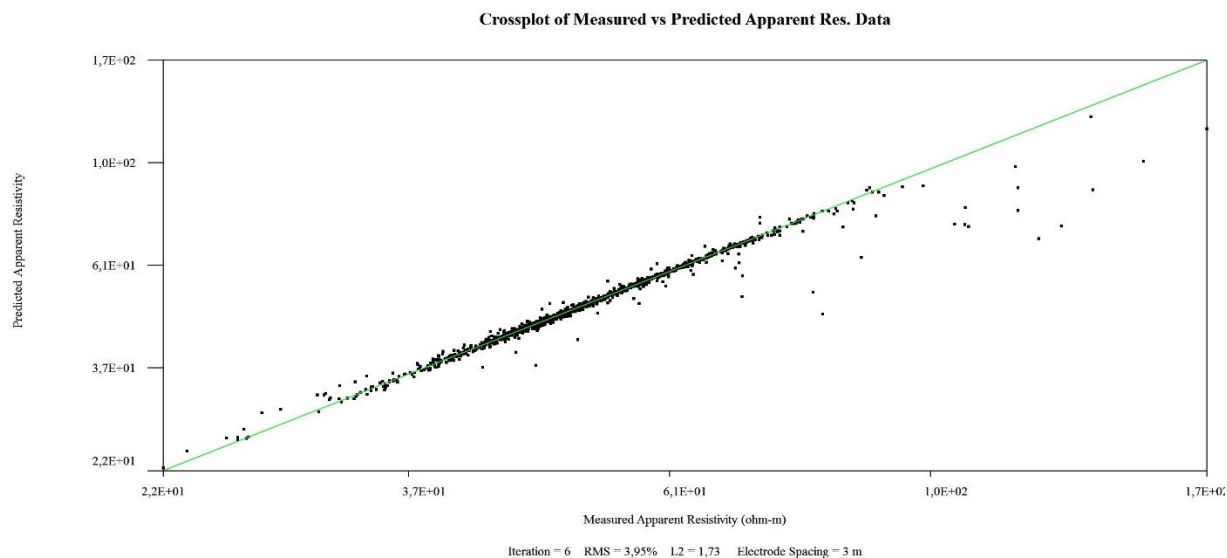


Ilustración 49: Gráfica que muestra la relación entre la resistividad aparente medida y resistividad aparente predicha o calculada ideal y obtenida en el procesamiento.

4. Trabajo De Campo

4.1 Descripción De Afloramientos Encontrados En La Zona De Estudio

La ubicación de afloramientos encontrados de norte a sur se evidencio la secuencia cretácica de la Formación Tibú-Mercedes. al realizarse el estudio en una zona urbana, es difícil encontrar afloramientos donde se evidencien secuencias estratigráficas importantes, por este motivo, se realizó la descripción de un afloramiento, cercano al área de estudio. Dentro de la zona urbana se pudo localizar una cantera al norte del municipio que permitió la toma de muestras, a su vez una zona de construcción al sur y un corte en carretera al este del municipio.

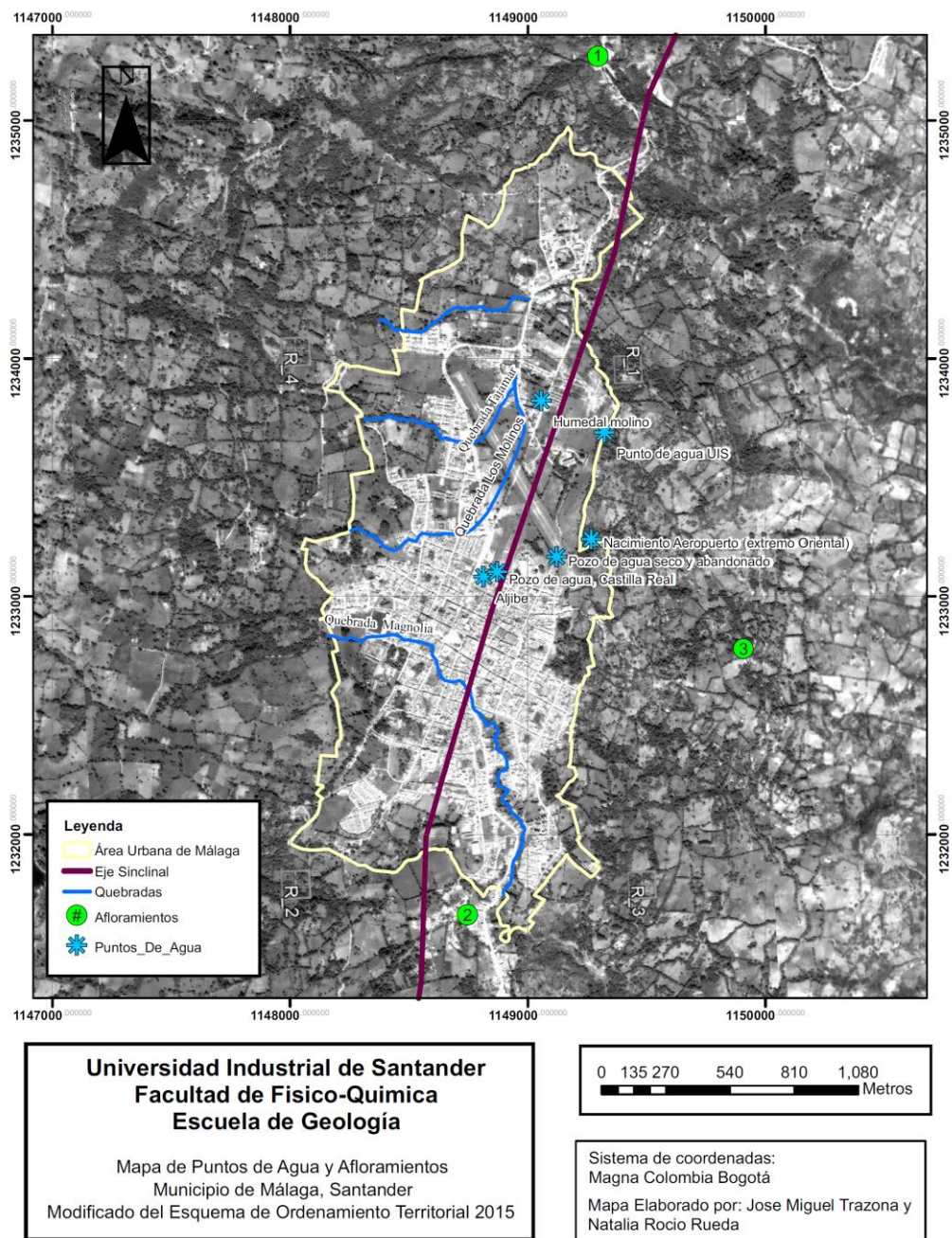


Ilustración 50. Ubicación de Afloramientos y Puntos de agua.

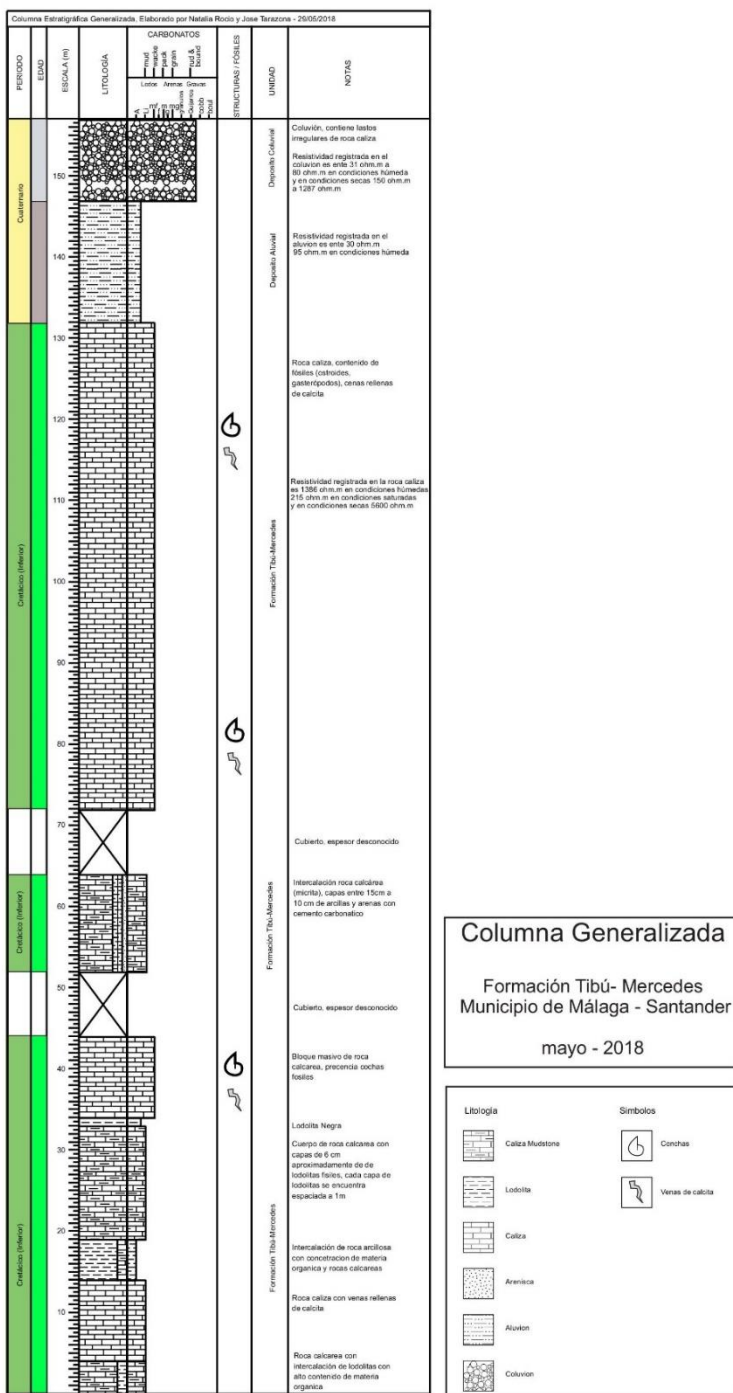


Ilustración 51: Columna generalizada de la zona.

Tabla 5: Importancia de cada formación.

Unidad	Estado	Resistividades	Importancia
Relleno Antropogénico	Húmedo a saturado	7 ohm.m - 40 ohm.m	Relación con infiltraciones y estructuras hechas por el hombre
Suelo	Húmedo a saturado	9.5 omh.m - 40 ohm.m	Conocer el espesor en profundidad, es de interés para conocer el cuerpo de agua, aunque debido a la naturaleza de la porosidad del suelo no se clasifica como acuífero
Suelo	Levemente Húmedo	40 ohm.m - 191 ohm.m	Conocer espesor del suelo, no es de interés para clasificar como un cuerpo con agua al no estar saturada
Suelo	Seco	121.2 ohm.m - 5013 ohm.m	Conocer espesor del suelo en profundidad
Depósitos Coluviales	Seco	150 ohm.m - 1287 ohm.m	Conocer espesor en profundidad
Depósitos Coluviales	Húmedo	31 ohm.m - 80 ohm.m	Conocer extensión en profundidad y relacionarlas con áreas circundante
Depósitos Aluviales	Húmedos	7.3 ohm.m - 25 ohm.m	Conocer extensión en profundidad y relacionarlas con áreas circundante
Depósitos Aluviales	Saturado	3.4 ohm.m a 15 ohm.m	Conocer el espesor en profundidad, es de interés para conocer el cuerpo de agua, aunque debido a que se desconoce la naturaleza de la porosidad de la unidad no se clasifica como acuífero sino como parte del sistema
Fm Tibú-Mercedes (Caliza)	Seca	3000 ohm.m - 5650 ohm.m	Conocer espesor en profundidad
Fm Tibú-Mercedes (Caliza)	húmeda	1000 ohm.m - 2809.1 ohm.m	Conocer espesor en profundidad y ver relación con áreas con resistividad circundantes
Fm Tibú-Mercedes (Caliza)	Saturada	80 ohm.m - 915 ohm.m	Conocer espesor en profundidad y extensión a lo largo de las lecturas para clasificación de áreas con potencial acuífero

Tabla 6: Cuadro comparativo de las rocas calcáreas encontradas en los afloramientos de norte a sur del municipio de Málaga.

Afloramiento 1 2158 m.s.n.m.	Afloramiento 3 1988m.s.n.m.	Afloramiento 2 2173 m.s.n.m.	Afloramiento 4 2012 m.s.n.m.
Caliza grisácea fosilífera (ostreoides) con lavado de calcita en sus fracturas, altamente diaclasada, se presenta de forma masiva.(BioMicrita)	Micrita meteorizada sin presencia de fósiles, altamente diaclasada.	Caliza grisácea fosilífera (ostreoides) con lavado de calcita en sus fracturas, altamente diaclasada, se presenta de forma masiva.	Micrita meteorizada sin presencia de fósiles, altamente diaclasada.; Biomicrota , diaclasada y meteorizada

4.1.1 Afloramiento 1: Norte del Municipio

Coordenadas: E 1149294.116,
N 1235269.471
2158 msnm

Descripción:

Afloramiento con 9 metros de alto y 20 metros de ancho aproximadamente , con vegetación media alta, zona con alto diaclasamiento, se reconocieron 3 familias de diaclasas, no presenta estratificación ya que la roca es masiva, Se evidencio roca (caliza) de la facie Biomicrita (Caballero y Sierra, 1991) de color grisácea con contenido de fósiles de bivalvos y ostreoides con tamaños de 3 cm aproximadamente, la roca presento un alto grado de meteorización y tres familias de diaclasas principales, siendo más notoria, la paralela a la pendiente creando una aparente estratificación y presencia de venas rellenas de calicita.



Ilustración 52: Fotografías correspondientes al Afloramiento 1 donde podemos observar el tamaño de las muestras fósiles encontradas.

Tabla 7: Datos estructurales de familias de diaclasas encontradas.

Afloramiento 1		
	Rumbo	Buzamiento
Diaclasa 1	33	52
Diaclasa 1	31	58
Diaclasa 1	19	48
Diaclasa 2	129	89
Diaclasa 2	131	77
Diaclasa 2	119	82
Diaclasa 3	100	65
Diaclasa 3	114	66
Diaclasa 3	96	72

4.1.2 Afloramiento 2: Sur del Municipio

Coordenadas: E 1148746.761
N 1231660.519
2173 msnm

Descripción:

Afloramiento de 3 metros de alto y 15 metros de ancho aproximadamente con vegetación media, en donde se evidencio roca altamente meteorizada, roca masiva sin estratificación evidente ni contactos, Se identificó roca (caliza) de facie Biomicirta (Caballero y Sierra, 1991) con alto contenido de fósiles identificándose ostroides y bivalvos con tamaños de 3 cm a 6 cm aproximadamente, la roca de color grisácea por la meteorización y al cortarla de color gris a azulosa. Identificándose como una biomicritica (Caballero y Sierra, 1991) con presencia de venas de calcita. Esta roca es similar a la descrita en el primer afloramiento.



Ilustración 53: Fotografía panorámica del Afloramiento 2, la roca se presenta de forma masiva y muy diaclasada, por lo tanto no se puede diferenciar estratificación.



Ilustración 54: Fotografía de las evidencias fósiles del Afloramiento 2.

En pequeños afloramientos colina abajo en dirección este de la Universidad Industrial de Santander sede Málaga también se observó roca caliza con fósiles de bivalvos.



Ilustración 55: Fotografías donde podemos evidenciar bivalvos encontrados en pequeños afloramientos encontrados en la parte este de la sede de la universidad industrial en Málaga.

En la vía que comunica Málaga con Bucaramanga en los primeros 8 Km también se observó roca caliza, a medida que se asciende hacia el alto de Málaga, se evidencia intercalación con areniscas en algunos sectores.

4.1.3 Afloramiento 3: Carretera Hacia la Vereda El Barzal

Coordenadas: E 1149901
N 1232781
1988 msnm

Descripción:

Afloramiento con 12 metro de ancho y 10 metros de altura aproximadamente ,vegetación media alta ,Colina abajo al este del municipio de Málaga se encontró roca caliza altamente meteorizada y fracturada descrita como roca caliza micritica (folk, 1974), se observa que dentro de las fracturas se encuentra calcita.

Estratigráficamente se ubica en una parte inferior de la roca encontrada en los dos primeros afloramientos. Dentro del afloramiento se evidencia intercalación entre roca más compacta y capas de roca con mayor contenido de arcilla y más disgregadas, vale recalcar que la roca se encuentra fuertemente meteorizada.

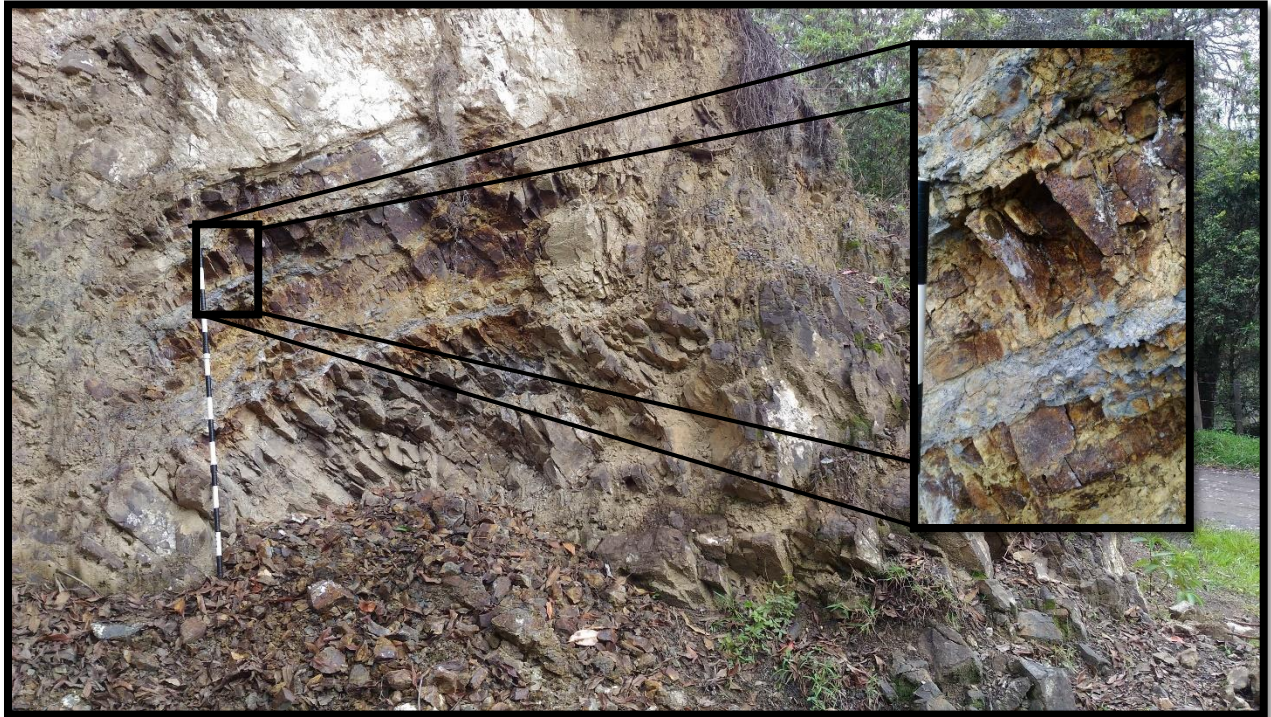


Ilustración 56:Fotografía del Afloramiento 3, haciendo un acercamiento para poder evidenciar la intercalación de material compacto y disgregado.



Ilustración 57: Foto de la calcita encontrada.

Tabla 8: Información estructural de diaclasas y estratificación del afloramiento 3

Afloramiento 3		
	Rumbo	Buzamiento
Estratificación	80	39
Diaclasa 2	247	51
	251	53
	240	64
Diaclasa 3	334	72
	334	56
Diaclasa 4	199	75
	192	84

4.1.4 Afloramiento 4: La Virgen, Vía a San José de Miranda

/Coordenadas: E 1148218.485
N 1228900.957
2012 msnm.

Descripción:

Afloramiento con aproximadamente 35 metros de alto con 50 metros de ancho aproximadamente, vegetación media-alta, afloramiento presente en el costado derecho de la vía Málaga-san Jose de miranda, con presencia de una falla hacia el sur del afloramiento, por donde pasa la quebrada la virgen .

Según el mapa Geológico de la Plancha 136 Málaga, del Servicio Geológico Colombiano se encuentra dentro de la Formación Tibú-Mercedes. En éste afloramiento se identificaron 7 capas con las siguientes características descritas de base a tope:

- a. Roca caliza (Mudstone, Dunham, 1962) con venillas de caliza que tienen espesor de 10 m.

- b. Intercalación de rocas arcillosas con alto contenido de materia orgánica con 17 cm a 12 cm, y rocas calizas (Mudstone, Dunham, 1962) con espesores de 8 cm a 17 cm.
- c. Intercalación de rocas calcáreas (Mudstone, Dunham, 1962) con espesores de 10 cm aproximadamente con arcillolitas (Folk, 1974) y lodolitas (Folk, 1974) con alto contenido de materia orgánica con espesores de 15 cm.
- d. Bloques o capas gruesas de roca calcárea con espesores de 14 m y capas finas de lodolitas (Folk, 1974) fisil de 6 cm que se distribuía cada 1 m.
- e. Capa de un metro de lodolita (Folk, 1974) negra.
- f. Bloque masivo de roca calcárea con alto contenido de fósiles y con 10 m de espesor.
- g. Sobre el afloramiento sedimentos no consolidados con presencia de cantos.



Ilustración 58: Fotografía panorámica del Afloramiento 4, siendo la base en el extremo izquierdo (naranja) y el tope hacia el lado derecho (amarillo).



Ilustración 59: Fotografía de la evidencia fósil encontrada en el afloramiento 4.

Aunque el afloramiento sobre la quebrada de la Virgen es cerca al casco urbano de San Jose de Miranda por la carretera Nacional, es bastante al sur de la zona de estudio, se incluye como control litológico para la formación Tibú-Mercedes, al parecer su parte inferior según lo escrito por Juliver (1960).

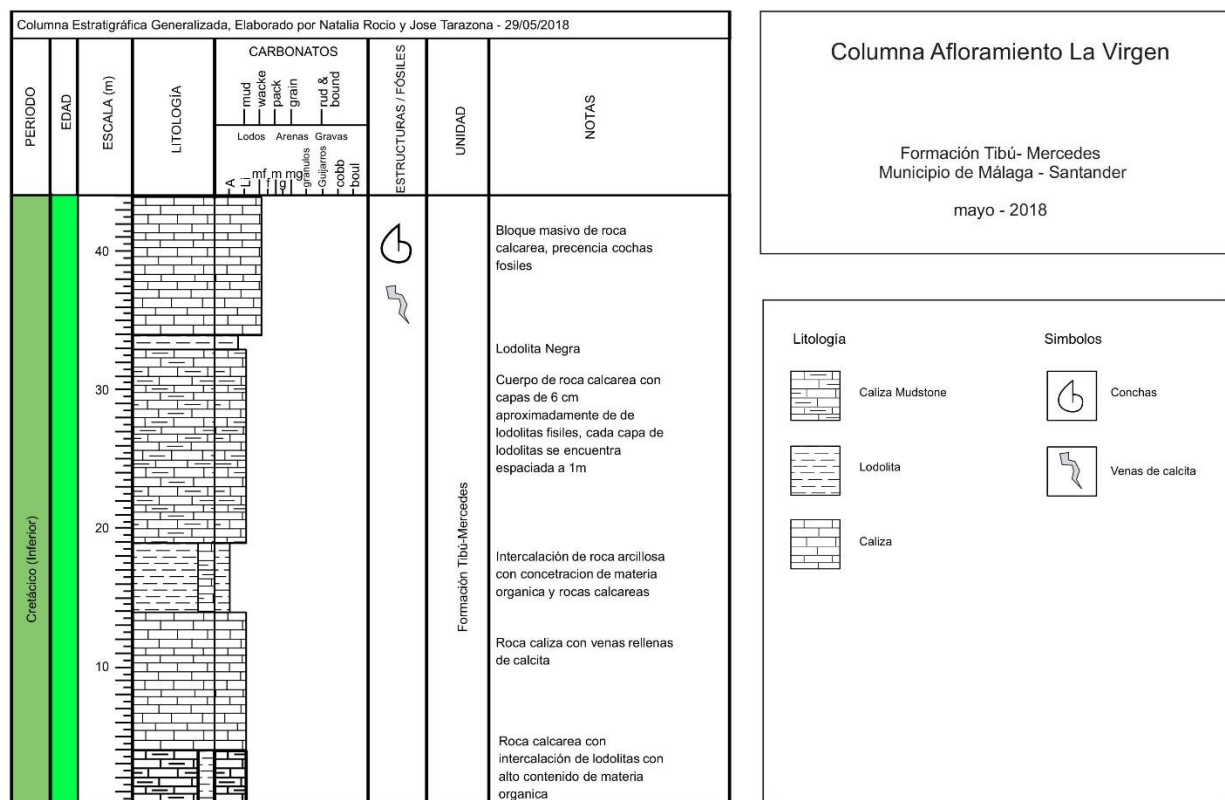


Ilustración 60: Columna estratigráfica del afloramiento 4.

Tabla 9: Datos estructurales de diaclasas y estratificación en el afloramiento 4.

Afloramiento 4		
	Rumbo	Buzamiento
Estratificación	343	36
Diaclasa 1	115	66
Diaclasa 1	113	67
Diaclasa 1	122	66
Diaclasa 1	115	70
Diaclasa 1	104	60
Diaclasa 2	55	81
Diaclasa 2	54	79
Diaclasa 2	51	78

Diaclasa 2	55	76
Diaclasa 2	55	78
Diaclasa 3	214	70
Diaclasa 3	204	71
Diaclasa 3	203	64

4.2 Ubicación De Los Puntos Donde Se Evidencia La Existencia De Agua Subterránea

Se ubican los puntos de agua según la información proporcionada por la comunidad y observada visualmente. La totalidad de los afloramientos registrados se encuentran en la parte norte del casco urbano municipal. En total se han encontrado seis puntos de agua, entre aljibes, pozos de agua, afloramientos, humedales y zona de infiltración (sumidero o tollo), no se han identificado más dentro del casco urbano debido a la falta de información acerca de la existencia de otros puntos de agua.

Es importante resaltar que en el norte del municipio en área rural hay presencia de múltiples afloramientos, la comunidad informa de 8, de los cuales se visitan 2 y se observa visualmente alto caudal en comparación con los vistos en el área urbana, esta zona es altamente fallada lo que podría tener relación directa con estos afloramientos y el tipo de roca.

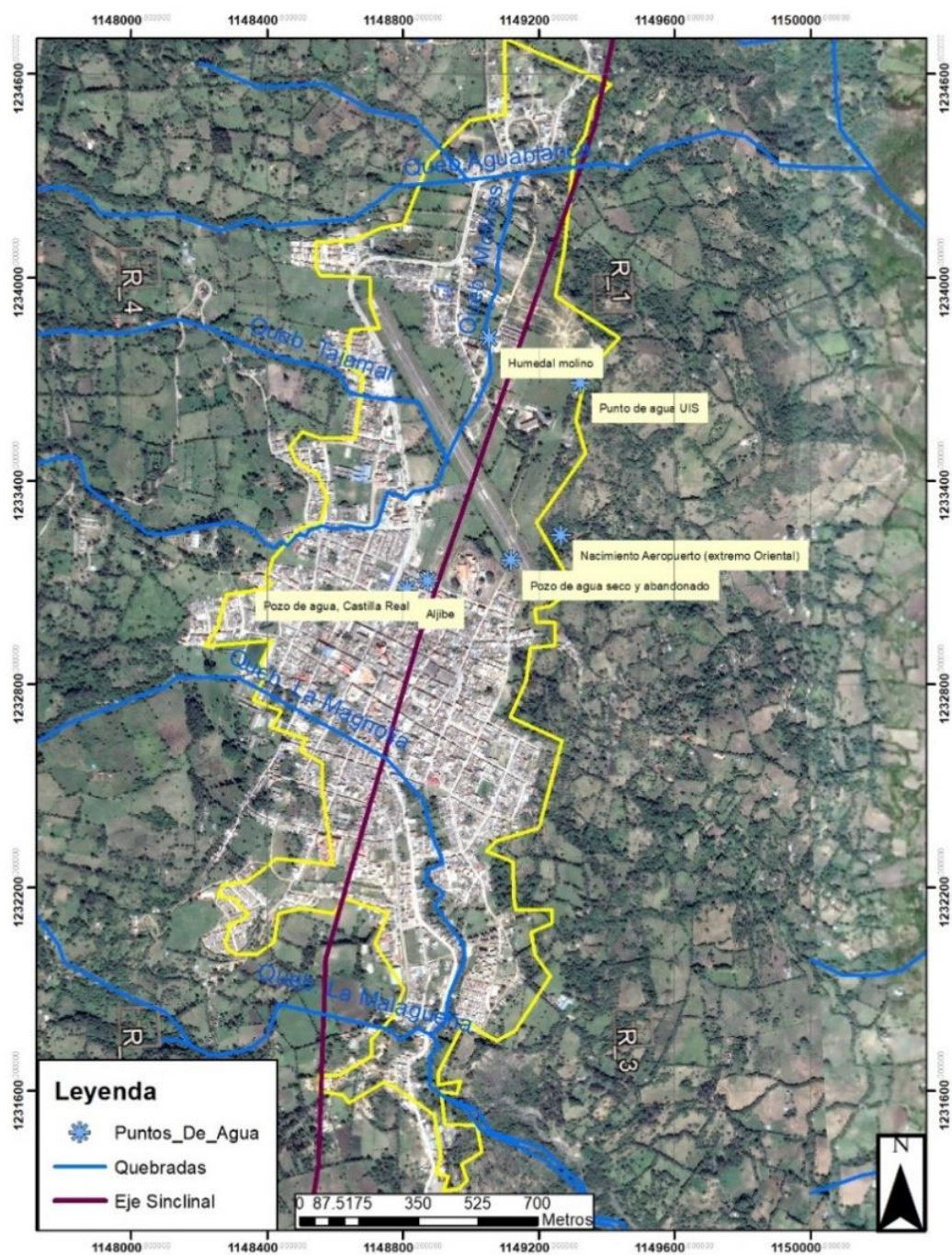


Ilustración 61: Mapa de los puntos de agua en el municipio de Málaga.

De norte a sur se observan los siguientes puntos de agua:

4.2. 1 Humedal El Molino:

Coordenadas: 1233823.09 N, 1149055.07 E y 2210 msnm.

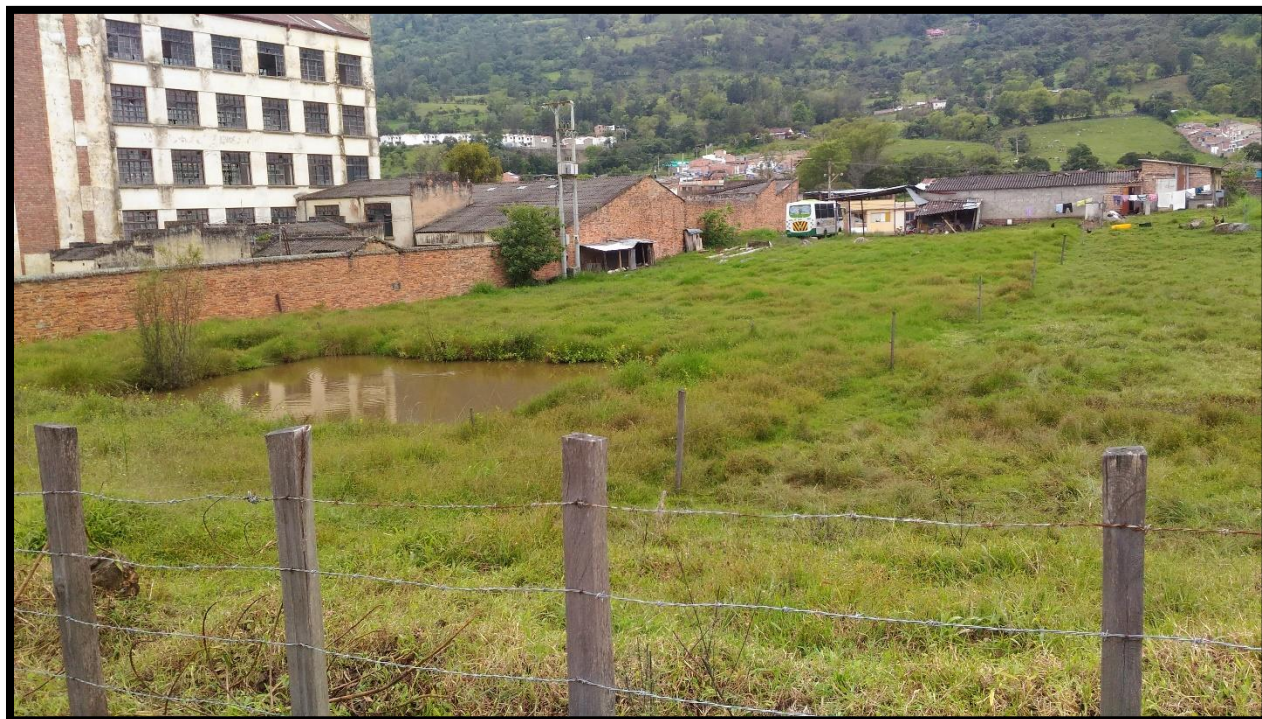


Ilustración 62: Humedal El Molino.

Se observa un pozo hecho por el hombre, aunque la zona históricamente ha presentado concentración de agua y antiguamente correspondía a una zona de humedales.

Haciendo un control de la vegetación de la zona se calculó que este humedal tiene aproximadamente 1321 m², perimetralmente encontramos pastizales y algunas pequeñas edificaciones que no alcanzan a ser parte del área del humedal, esta zona es importante porque

nos indica que la infiltración del agua es muy poca, lo que quiere decir que el material que se encuentra infra yaciendo el humedal es un material fino que se encuentra saturado (la saturación de la zona se deduce a partir de los resultados obtenidos de la línea tomográfica 2), por lo tanto la impide la infiltración generando la acumulación de agua superficial.

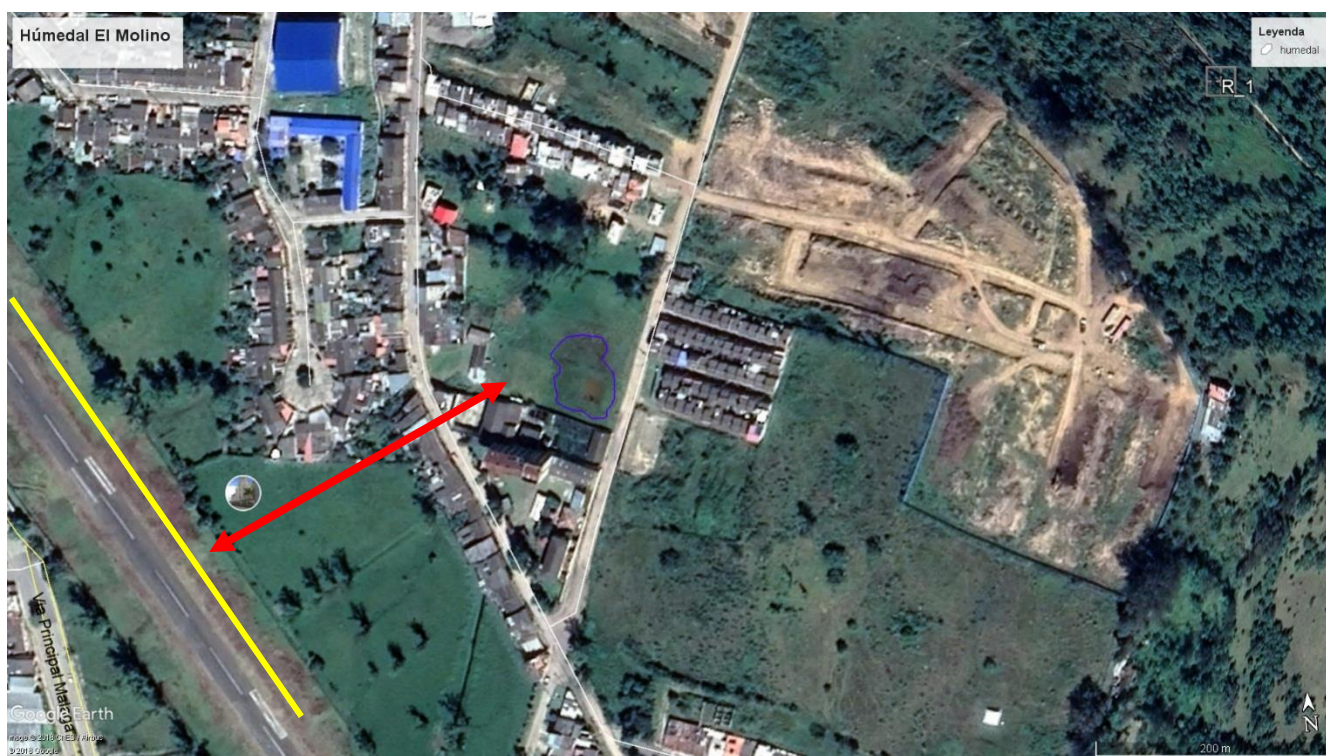


Ilustración 63: Fotografía que delimita el humedal (Azul) y muestra la cercanía de esta área a la línea tomográfica 2 ubicada en el aeropuerto del Municipio de Málaga (amarillo)

4.2.2 UIS:

Coordenadas:

1233689.98 N, 1149323.19 E y 2218 msnm.



Ilustración 64: Afloramiento de agua aledaño a la Universidad Industrial de Santander sede Málaga, denominado Punto de agua UIS.

Corresponde a un afloramiento somero, rodeado de vegetación compuesta por arbustos y plantulas de tamaño bajo a medio, según información local permanece a lo largo del año.

Tampoco se observa que forme corriente superficial, más bien, corresponde a un punto localizado.

4.2.3 Afloramiento Aeropuerto (Extremo oriental):

Coordenadas: 1233240.29 N, 1149267.18 E y 2188 msnm.



Ilustración 65: Punto denominado Afloramiento Aeropuerto (Extremo Oriental). A la Izquierda se observa el nacimiento o donde surge el agua. A la derecha se observa la acumulación del agua que surge y parte del caudal.

La zona no se encuentra propiamente en el aeropuerto, se ubica en una finca aledaña sobre la ladera Oriental, muy empinada, no se pudo constatar si permanece durante el año,

aunque hay presencia de tubería y un tanque para recolección, almacenamiento y distribución del agua.

4.2.4 Pozo seco y sumidero:

Coordenadas: 1233166.14 N, 1149323.19 E y 2202 msnm.



Ilustración 66: Pozo seco observable a la derecha de la foto y el sumidero observable al fondo en la parte inferior de la foto, donde se encuentra la concentración de basura.

El pozo se encuentra visiblemente seco, con presencia excesiva de basura dentro de él. En la zona se forma un pequeño caudal el cual se infiltra nuevamente en el suelo como se ve en la figura, desaparece regresando al subsuelo.



Ilustración 67: Pozo visiblemente seco con vegetación dentro. A la derecha la quebrada que desaparece a pocos metros del punto donde se tomó la foto en la pared de suelo.

4.2.5 Pozo de Agua Castilla Real:

Coordenadas: 1233106.37 N, 1148874.28 E y 2206 msnm.



Ilustración 68: Pozo de agua Castilla Real.

El pozo es bastante antiguo, se encuentra contaminado con basura, pero es observable su nivel piezométrico no mayor a dos metros de profundidad. Se desconoce la profundidad del pozo y la zona y sus características hidráulicas.

4.2.6 Aljibe:

Coordenadas: 1233083.1 N, 1148812.91 E y 2200 msnm.



Ilustración 69: Aljibe.

El aljibe presenta acumulación de agua todo el año, aunque su recarga es bastante lenta, se observa a medida que se extrae su agua y se demora en recargar o llenar de nuevo. El agua no es apta para consumo humano.

4.3 Adquisición De Datos Con Tomografías Eléctricas Del Subsuelo

4.3.1 Registro de los perfiles Tomográficos

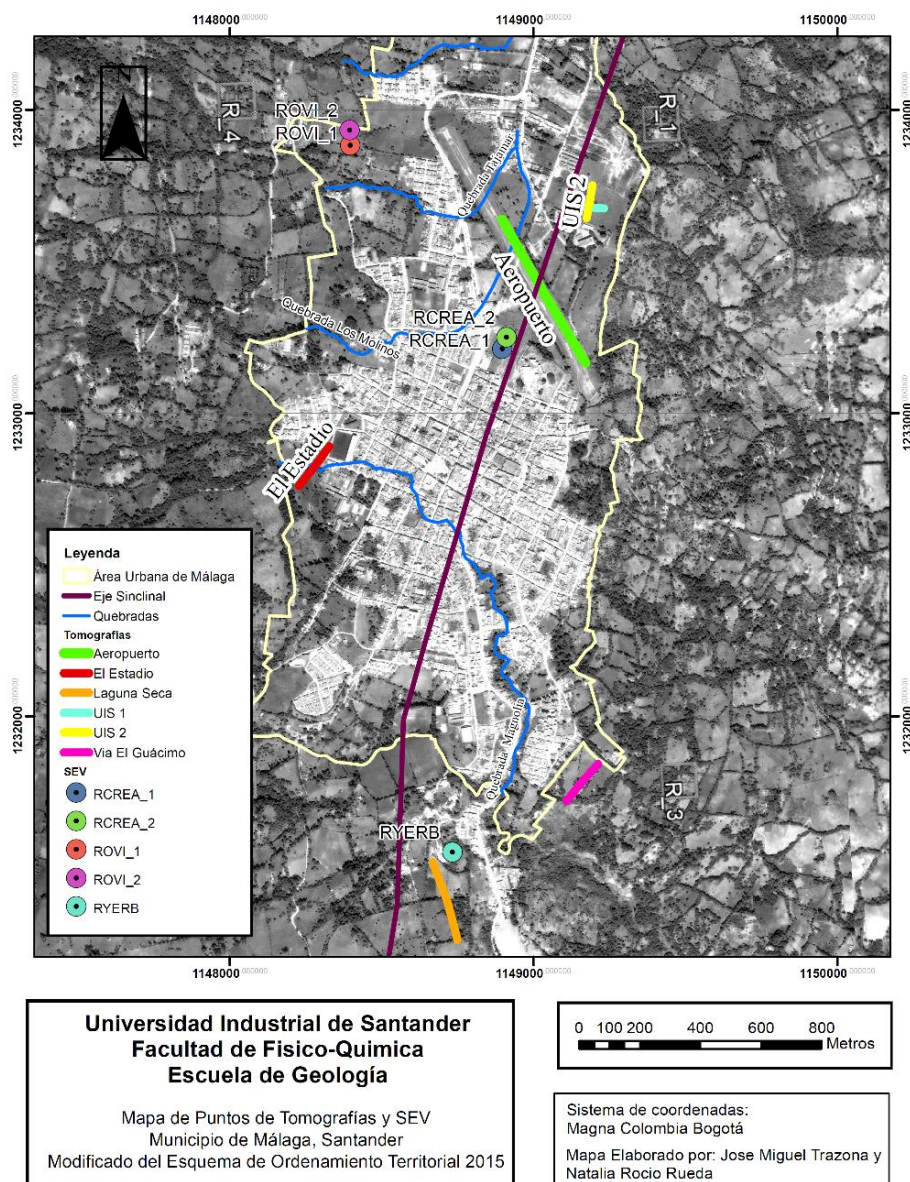


Ilustración 70: Ubicación de las tomografías en el municipio de Málaga, Santander, imagen tomada y modificada de Google Earth.

Tabla 10: Resumen con los datos más importantes de cada línea.

	Espaciado entre Electrodos	Longitud total	Dispositivo geometrico	Puntos Medidos
Linea 1 : El Estadio	3 metros	168 metros aprox	Wenner-schlumberger	1288
Linea 2: Aeropuerto	10 metros	560 metros aprox	Wenner-schlumberger	1261
Linea 3: Guácimo	3 metros	168 metros aprox	Wenner-schlumberger	1288
Linea 4 : Laguna Seca	5 metros	280 metros aprox	Wenner-schlumberger	1288
Linea 5: UIS1	2 metros	112 metros aprox	Wenner-schlumberger	1260
Linea 6: UIS2	2 metros	112 metros aprox	Wenner-schlumberger	1250

Tabla 11: Coordenadas del punto inicial punto medio y punto final de cada línea topográfica.

		Punto inicial	Punto medio	Punto final
Linea 1 :	x	1148327,84	1148279,00	1148227,00
El Estadio	y	1232890,01	1232824,00	1232760,00
	z	2215,00	2221,00	2215,00
Linea 2:	x	1148896,00	1149031,00	1149171,00
Aeropuerto	y	1233639,00	1233401,00	1233166,00
	z	2204,00	2205,00	2218,00
Linea 3:	x	1149108,00	1149158,00	1149212,01
Guácimo	y	1231721,00	1231783,00	1231841,92
	z	2184,00	2180,00	2175,00
Linea 4 :	x	1148668,00	1148717,00	1148749,00
Laguna Seca	y	1231518,00	1231385,00	1231262,00
	z	2165,00	2158,00	2176,00
Linea 5:	x	1149126,00	1149180,00	1149232,00
UIS1	y	1233692,00	1233679,00	1233675,00
	z	2230,00	2229,00	2231,00
Linea 6:	x	1149193,00	1149184,00	1149174,00
UIS2	y	1233752,00	1233697,00	1233644,00
	z	2227,00	2228,00	2223,00

4.3.1.1 Línea 1(El Estadio)

Se elige esta zona debido a que en ella se perforó un pozo en los años 2000, hoy perdido. Se ubica al occidente del casco Urbano y permite la extensión de la línea paralela al eje del sinclinal de Málaga, la línea se elabora con una separación de 3 metros entre los electrodos.



Ilustración 71: Ubicación de la tomografía eléctrica resistiva Estadio en el municipio de Málaga, Santander. El eje del sinclinal se obtuvo a partir de la Geología de la Plancha 136 Málaga del Servicio Geológico Colombiano 1984. La imagen de fondo se obtuvo de Google Earth.

4.3.1.2 Línea 2 (Aeropuerto)

El aeropuerto se extiende el tomógrafo a la máxima longitud que permite el cable, con una distancia entre electrodo de 10 metros alcanzando una longitud total para dicha línea de 560 metros, se elige este lugar precisamente por la longitud a la que se podía llegar y las condiciones del lugar para poder realizar la adquisición, casi perpendicular al eje del sinclinal.



Ilustración 72: Ubicación de la tomografía eléctrica resistiva Aeropuerto en el municipio de Málaga, Santander. El eje del sinclinal se obtuvo a partir de la Geología de la Plancha 136 Málaga del Servicio Geológico Colombiano 1984. La imagen de fondo se obtuvo de Google Earth.

4.3.1.3 Línea 3 (Guácimo).

El área se escoge por ser una zona al oriente de la cabecera municipal y del eje del sinclinal que va en dirección norte-sur que pasa por el municipio de Málaga, en potreros aledaños a la carretera con espacio entre electrodo de 3 metros con una extensión de 168 metros aproximadamente.

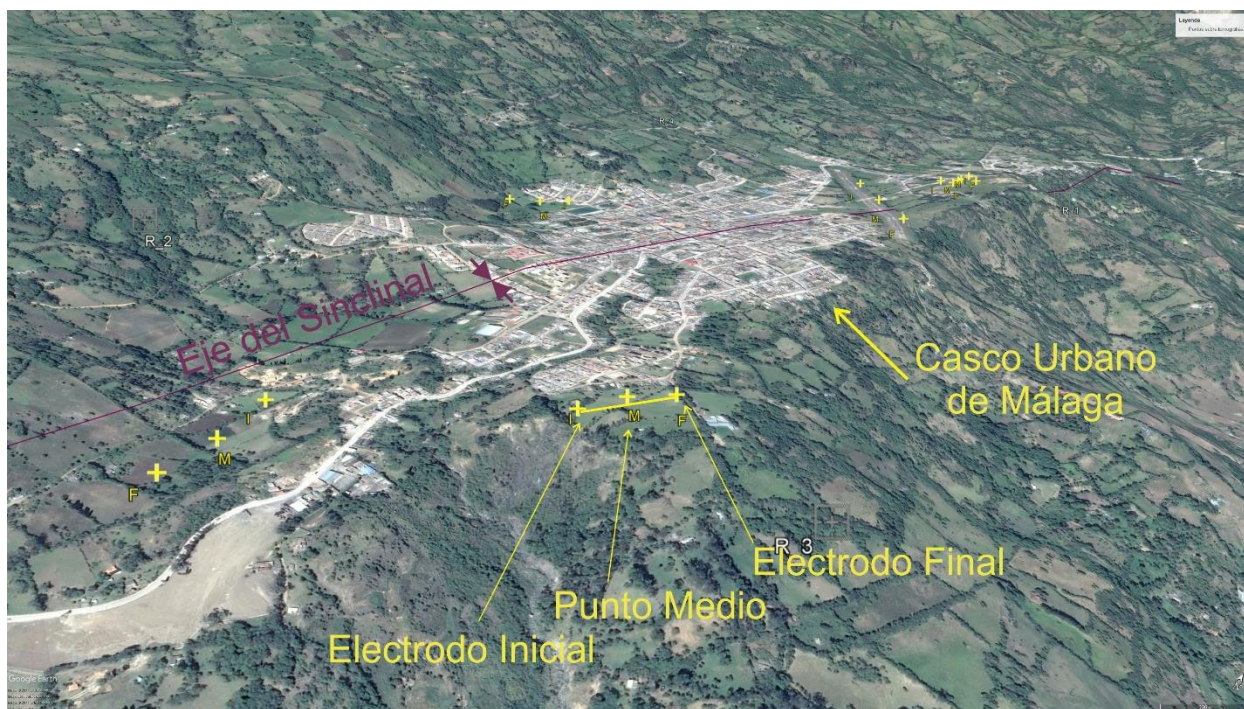


Ilustración 73 Ubicación de la tomografía eléctrica resistiva Guasimo en el municipio de Málaga, Santander. El eje del sinclinal se obtuvo a partir de la Geología de la Plancha 136 Málaga del Servicio Geológico Colombiano 1984. Imagen de fondo tomada de Google Earth.

4.3.1.4 Línea 4 (Laguna Seca).

Se eligió el sector a razón de tener el suficiente espacio para poder extender la línea para hacer la toma de datos y ser el sector sur de la cabecera municipal. Esta

tomografía se realizó con un espaciado de 5 metros entre electrodos para una extensión total de 280 metros aproximadamente.

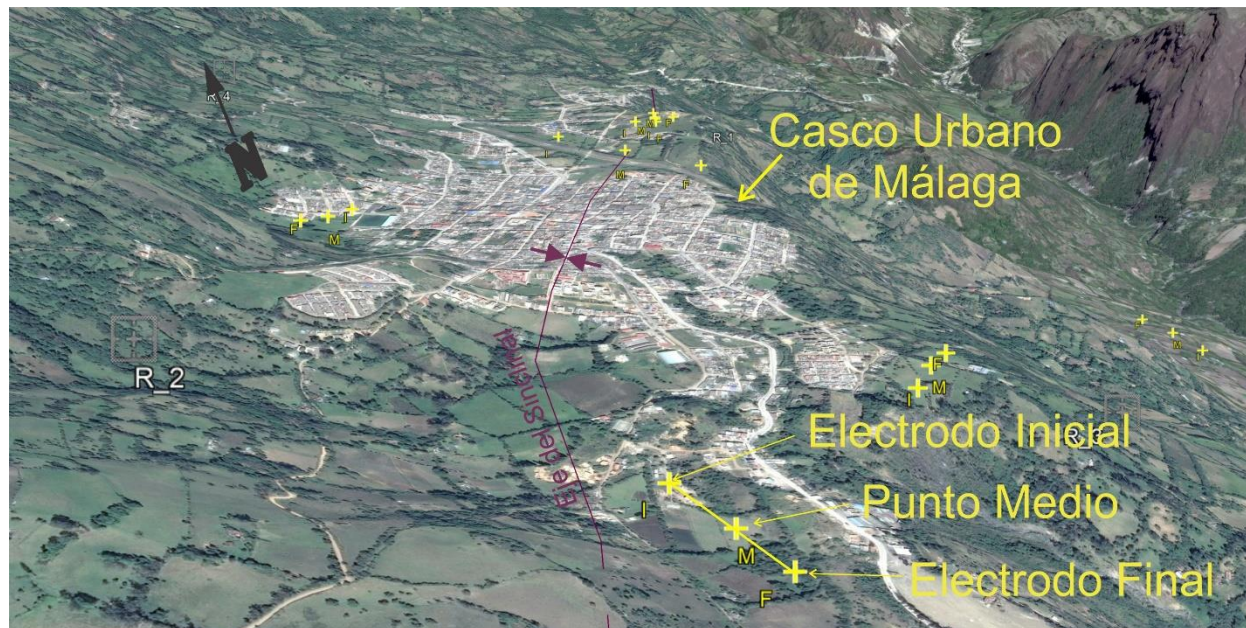


Ilustración 74: Ubicación de la tomografía eléctrica resistiva Laguna Seca en el municipio de Málaga, Santander. El eje del sinclinal se obtuvo a partir de la Geología de la Plancha 136 Málaga del Servicio Geológico Colombiano 1984.

4.3.1.5 Línea 5 (UIS 1)

Se decide tomar las tomografías en la zona que comprende la sede de la Universidad Industrial de Santander del proyecto de grado “Caracterización del Subsuelo Mediante Prospección Geofísica de Resistividades (Tomografía Eléctrica y Sondeos Eléctricos Verticales SEV’s) con Fines Hidrogeológicos en la Sede de Málaga de la Universidad Industrial de Santander (UIS)” para el Proyecto de grado de María Angélica

Salamanca Corredor como geóloga, para conocer el subsuelo en la parte nor-oriental del municipio de Málaga y añadir más información al estudio.

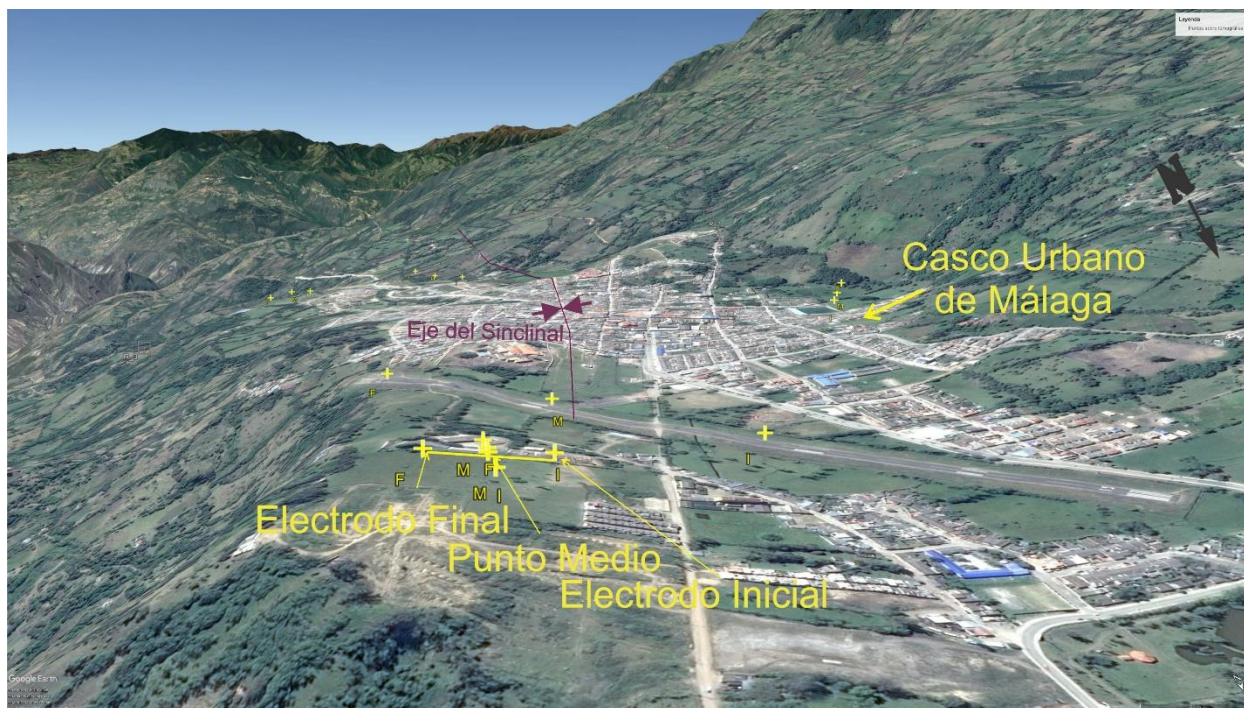


Ilustración 75: Ubicación de la tomografía eléctrica resistiva UIS 2 en el municipio de Málaga, Santander. El eje del sinclinal se obtuvo a partir de la Geología de la Plancha 136 Málaga del Servicio Geológico Colombiano 1984. La imagen de fondo se obtuvo de Google Earth.

4.3.1.6 Línea 6 (UIS 2).

La tomografía fue realizada igualmente a razón del trabajo de grado

“Caracterización del Subsuelo Mediante Prospección Geofísica de Resistividades (Tomografía Eléctrica y Sondeos Eléctricos Verticales SEV’s) con Fines Hidrogeológicos en la Sede de Málaga de la Universidad Industrial de Santander (UIS)” de María Angélica Salamanca Corredor, y fue hecho para cruzar la información con la tomografía UIS1 para

obtener una mejor visión del subsuelo, la adquisición fue hecha en los predios no construidos al norte de la universidad por tener el espacio óptimo para extender.



Ilustración 76: Ubicación de la tomografía eléctrica resistiva UIS 2 en el municipio de Málaga, Santander. El eje del sinclinal se obtuvo a partir de la Geología de la Plancha 136 Málaga del Servicio Geológico Colombiano 1984. La imagen de fondo se obtuvo de Google Earth.

4.3.2 Levantamiento Topográfico.

Durante la adquisición se toman los datos de la topografía (altimetría) en electrodo o según el terreno desde el electrodo 1 hasta el 56 utilizando una mira y un nivel dumpy, con la finalidad de conocer en qué punto se tomó la lectura para que el modelo final sea más fiable.



Ilustración 77: Toma de datos topográficos utilizando los electrodos como referencia.

4.4 Adquisición de datos con sondeos verticales eléctricos.

4.4.1 Localización De Los Sondeos Verticales Eléctricos

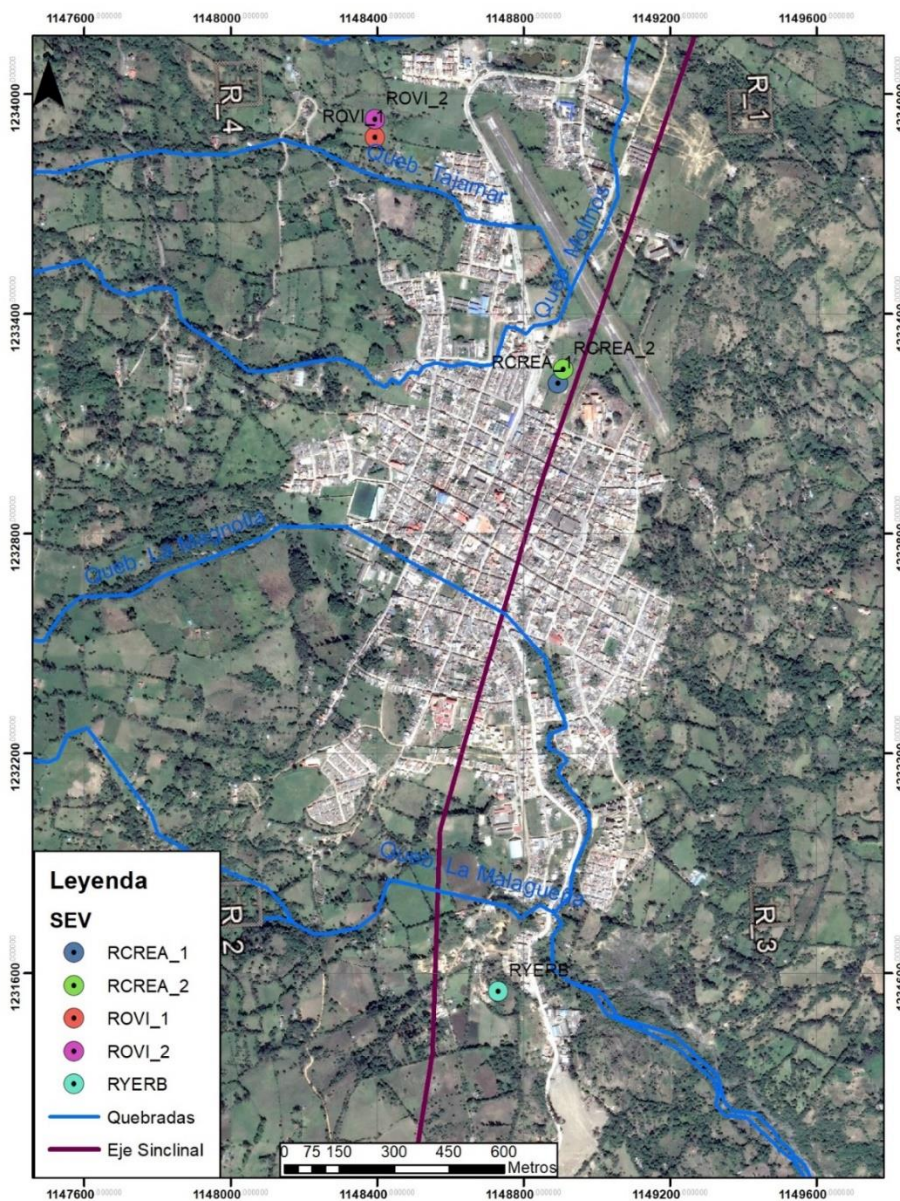


Ilustración 78: Ubicación de los sondeos eléctricos verticales realizados durante la campaña de geofísica en el municipio de Málaga, Santander.

4.4.1.1 Sondeos Verticales RCREA.

Este sondeo se adquiere en el lugar aprovechando la ubicación más cercana y centrada al casco urbano del municipio de Málaga en el sector conocido como Castilla Real.

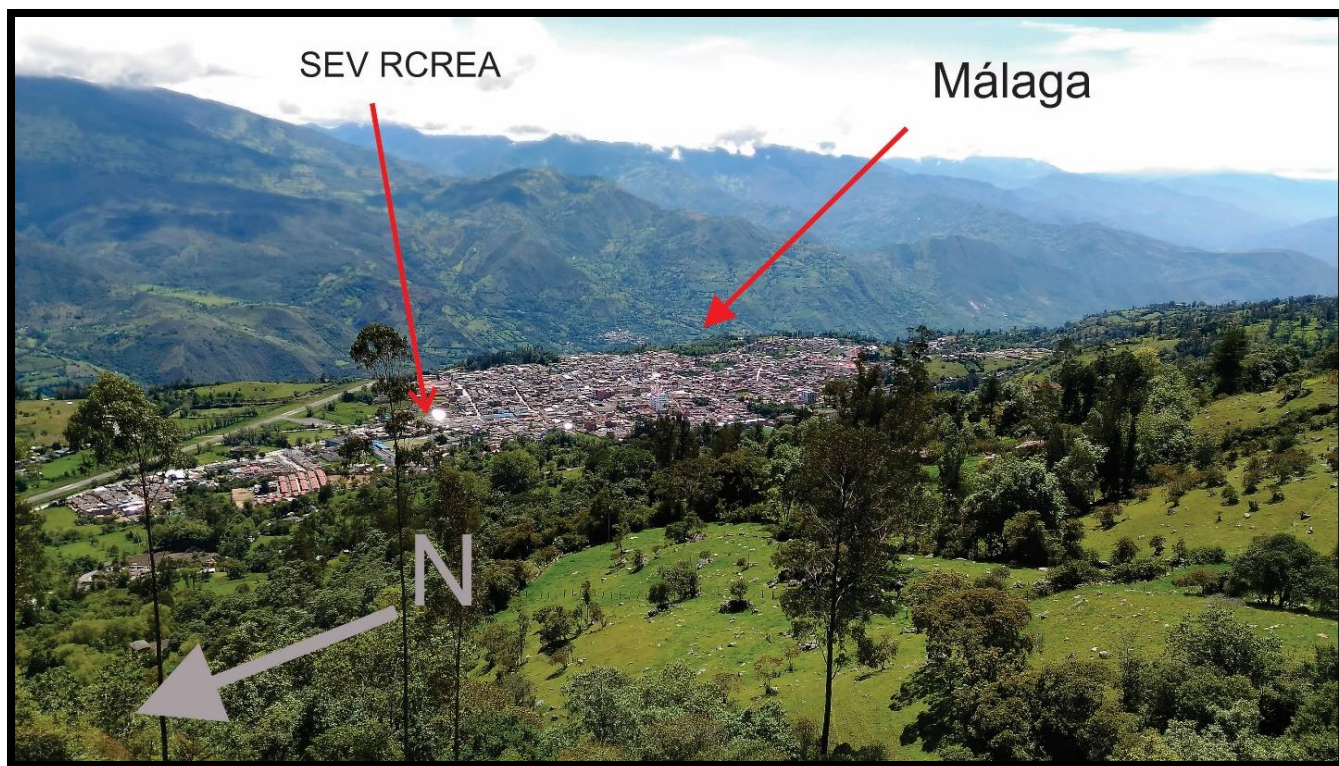


Ilustración 79: Ubicación en el municipio de Málaga del sondeo eléctrico vertical RCREA.

Tabla 12: Registro del sondeo vertical electico RCREA1.

SEV RCREA1		Urbanización Castilla Real		
Coordenadas:	X	1148896		
	Y	1233212		
	Z	2204 +/- 3		
Marca del gps: Garmin gpsmap62s				
Marca y referencia del tomógrafo: ABEM terrameter System 1000				
AB/2	MN/2	ρ	Δ	I
1	0,25	0,24	0,015	100
2	0,25	25,082	0,021	100
3	0,25	25,716	0,013	100
4	0,25	25,961	0,014	100
5	0,25	26,18	0,021	100
7,5	0,25	28,505	0,034	100
10	0,25	31,548	0,101	100
10	1	32,613	0,008	100
12,5	1	36,612	0,029	100
15	1	39,477	0,023	100
17,5	1	41,53	0,019	100
20	1	43,082	0,047	100
25	1	45,365	0,126	100
25	5	45,462	0,11	100
30	5	48,164	0,065	100
35	5	50,84	0,162	100
40	5	53,118	0,161	100
45	5	55,04	0,474	100
50	5	55,854	0,488	100
60	5	57,113	1,05	100
60	5	57,378	0,917	100
60	10	57,03	1,39	100
60	10	56,246	0,424	100
70	10	57,997	2,27	100
70	10	58,2	1,16	100
80	10	58,671	1,22	100

Tabla 13: Registro del sondeo vertical eléctrico RCREA2.

SEV RCREA2		Urbanización Castilla Real		
Coordenadas	x	1148910		
	y	1233250		
	z	2205 +/- 3		
Marca del gps: Garmin gpsmap62s				
Marca y referencia del tomógrafo: ABEM terrameter System 1000				
AB/2	MN/2	ρ	Δ	I
1	0,25	16,402	0,171	100
2	0,25	18,941	0,167	100
3	0,25	19,755	0,014	100
4	0,25	18,949	0,084	100
5	0,25	18,861	0,0711	100
7,5	0,25	20,229	0,205	100
10	0,25	22,089	0,16	100
10	1	32,276	0,065	100
12,5	1	36,322	0,059	100
15	1	39,591	0,038	100
17,5	1	42,08	0,076	100
20	1	44,34	0,035	100
25	1	48,034	0,07	100
25	5	46,193	0,075	100
30	5	48,753	0,177	100
35	5	50,022	0,197	100
40	5	51,417	0,086	100
45	5	52,055	0,056	100
50	5	52,401	1,41	100
60	5	54,655		100
60	10	53,328	0,209	100
70	10	54,802	0,492	100
80	10	56,065	0,955	100

4.4.1.2 Sondeos Verticales RHOVI.

En el sector occidental se realiza parte de la campaña SEV, ubicada en la hacienda El Oviedo, aprovechando el flanco oeste del sinclinal que da con la zona de recarga. Allí se ejecutan dos sondeos eléctricos verticales, RHOVI1 y RHOVI2.



Ilustración 80: Adquisición de datos del sondeo eléctrico vertical RHOVI.

Tabla 14:registro del sondeo vertical eléctrico RHOVII

SEV RHOVII		Hacienda Oviedo		
Coordenadas:	X	1148396		
	Y	1233884		
	Z	2252		
Equipo:	ABEM TERRAMETER SYSTEM 1000			
Descripción:	Km1 Via Málaga -Bucaramanga Hacienda Oviedo			
AB/2	MN/2	ρ	δ	I
1	0,25	70,413	0,023	100
2	0,25	66,437	0,018	100
3	0,25	66,399	0,066	100
4	0,25	66,11	0,03	100
5	0,25	59,674	0,03	100
7,5	0,25	44,905	0,023	100
10	0,25	39,662	0,732	100
10	1	43,475	0,038	100
12,5	1	43,475	0,009	100
15	1	46,606	0,029	100
17,5	1	46,03	0,125	100
20	1	46,314	0,141	100
25	1	53,436	0,1	100
25	5	66,286	0,685	100
30	5	70,414	1,41	100
30	5	70,894	6,129	100
35	5	67,042	1,54	100
35	5	67,8	0,116	100
40	5	66,969	1,68	100
40	5	65,503	0,718	100
45	5	68,21	6,499	100
50	5	68,87		100
60	5	75,028	0,147	100
60	10	76,715	0,755	100
60	10	77,057	0,05	100
70	10	80,951	0,083	100
80	10	87,4	4,73	100
80	10	80,773	0,45	100
90	10	92,685	0,308	100
90	10	93,097	0,24	100
90	10	92,913	0,085	100

Tabla 15: Registro del sondeo vertical eléctrico RHOVI2 a 49 metros de distancia del RHOVI1

SEV ROVI2		Hacienda Oviedo		
Coordenadas:		X	1148395	
		Y	1233933	
		Z	2256	
GPS	Garmin gpsmap62s			
Equipo:	ABEM TERRAMETER SYSTEM 1000			
Descripción:	Km1 Vía Málaga -Bucaramanga Hacienda Oviedo a 50 m del punto SEV9			
AB/2	MN/2	ρ	δ	I
1	0,25	73,764	0,04	100
1	0,25	73,73	0,021	100
2	0,25	49,925	0,014	100
3	0,25	46,637	0,021	100
4	0,25	45,323	0,021	100
5	0,25	45,714	0,021	100
7,5	0,25	48,34	0,051	100
10	0,25	53,227	0,019	100
10	1	48,462	0,1	100
12,5	1	52,461	0,016	100
15	1	55,827	0,028	100
17,5	1	57,979	0,048	100
20	1	60,351	0,039	100
25	1	63,516	0,082	100
25	5	64,468	0,019	100
30	5	69,677	0,025	100
35	5	72,908	0,02	100
40	5	73,074	0,098	100
45	5	72,807	0,063	100
50	5	73,852	0,109	100
60	5	67,787	0,182	100
60	10	68,787	0,031	100
70	10	68,6	0,068	100
80	10	70,777	0,153	100
90	10	71,523	1,41	100
90	10	70,711	0,18	100

4.4.1.3 Sondeo Vertical RYERB.

En la parte sur del municipio de Málaga se realiza un Sondeo Eléctrico Vertical aprovechando que se conoce la roca “in situ” Observable directamente sobre la via, la adquisición se realiza para conocer directamente las resistividades de ese tipo de litología superficial.

Tabla 16: registro del sondeo vertical eléctrico RYERB

RYERB		Estación Yerbabuena			
Coordenadas:	X	1148732			
	Y	1231551			
	Z	2191			
GPS	Garmin gpsmap62s				
Equipo:	ABEM TERRAMETER SYSTEM 1000				
Descripción:					
	AB/2	MN/2	ρ	δ	I
	1	0,25	339	0.033	100
	2	0,25	590	0.007	100
	3	0,25	670	0.071	100
	4	0,25	706	0.089	100
	5	0,25	722	0.087	100
	7,5	0,25	717,8	0.079	100
	10	0,25	763,78	0.072	100
	12,1	0,25	2834,9	0.01	100
	15	0,25	2955,1	0.076	100
	17,5	0,25	2652,8	0.014	100
	10	1	689,83	0.019	100
	12,1	1	705,05	0.01	100
	15	1	740,81	0.076	100
	17,5	1	661,18	0.014	100
	20	1	690,97	0.03	100
	25	1	664,39	0.013	100
	25	5	766,28	0.013	100
	30	5	718,96	0.026	100

35	5	638,84	0.012	100
40	5	554,42	0.014	100
45	5	473,29	0.02	100
50	5	401,23	0.035	100
53	5	301,09	0.079	100
70	5	196,89	0.037	100

5. Tratamiento De Datos Obtenidos

5.1 Procesamiento Y Tratamiento De La Muestra Obtenida En Campo.

Se toma una muestra de la formación Tibú-Mercedes correspondiente a biomicrita, ubicada al sur del municipio de Málaga (Afloramiento 2), zona en la que se practica una tomografía sobre la Laguna Seca y el sondeo eléctrico vertical RYERB. En esta zona se observan hornos para la procesar la roca caliza que toman del lugar.



Ilustración 81: Fotografía del Afloramiento 2 en el sector Sur del Municipio de Málaga.

Una vez obtenida la muestra se corta para elaborar un paralelepípedo de 8 cm x 10 cm x 17 cm para realizar pruebas de resistividad en laboratorio, junto con el ABEM Terrameter 1000, para lo cual se introduce una corriente reproduciendo las condiciones de la roca en diferentes condiciones; seca, húmeda y saturada para conocer directamente su resistividad con fines de correlacionarla con las obtenidas en campo en dicho lugar, para lo cual se tiene en cuenta las

dimensiones de la muestra ensayada, dichos resultados se comparan con los resultados obtenidos en los sondeos eléctricos verticales y tomografías eléctricas.



Ilustración 82: Bloque de muestra cortado para analizar.



Ilustración 83: Equipo y bloque adecuado en un contenedor para su análisis.

Con ayuda de un balde para agua y 4 pequeños agujeros en la parte superior y lateral del bloque se inició la prueba en condiciones seca obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 17: Resultados de resistividad en roca caliza en condiciones secas.

Prueba	Resistividad (ohm.m)
1	5649.2
2	5645.9
3	5643.7
4	5692.9
5	5676.0
6	5661.7
7	5638.2



Ilustración 84: Inicio de la prueba en condiciones secas.

La segunda secuencia de pruebas recrea la roca en condiciones húmedas, se procede a se humedecer superficialmente la muestra, sin saturarla. Para el ensayo se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 18: Resultados de resistividad en roca caliza en condición húmeda.

Prueba	Resistividad (ohm.m)
1	2809.1
2	2795.4
3	2790.0
4	2785.1
5	2773.9



Ilustración 85: Prueba de resistividad en roca caliza en condiciones húmedas.

La tercera prueba se realiza en condiciones saturadas llenando el recipiente de agua hasta la mitad del bloque, para que la masa de agua no entre en contacto directo con la corriente eléctrica como muestra la figura, Los resultados de resistividades se encuentran a continuación:

Tabla 19: Resultados de resistividad en roca caliza en condición saturada.

Prueba	Resistividad ohm.m
1	915.07
2	908.49
3	906.12
4	921.82
5	535.94
6	502.65
7	310.61



Ilustración 86: Prueba de resistividad en roca caliza en condición saturada.

5.2 Procesamiento E Inversión De Datos Obtenidos Con Tomografías Eléctricas Del Subsuelo

5.2.1. Línea 1: El Estadio.

La separación entre electrodos para ésta línea es de 3 metros para una extensión total de 168 metros. Una vez obtenido los datos se procesan en el software EarthImager 2D con un total de 8 intentos o iteraciones con el método *robustus*, con la intención de disminuir el error. Una vez concluido el procesamiento, obtenemos la inversión de resistividad aparente a partir de la pseudosección de resistividad aparente adquirida y la pseudosección de resistividad calculada o idealizada aparente.

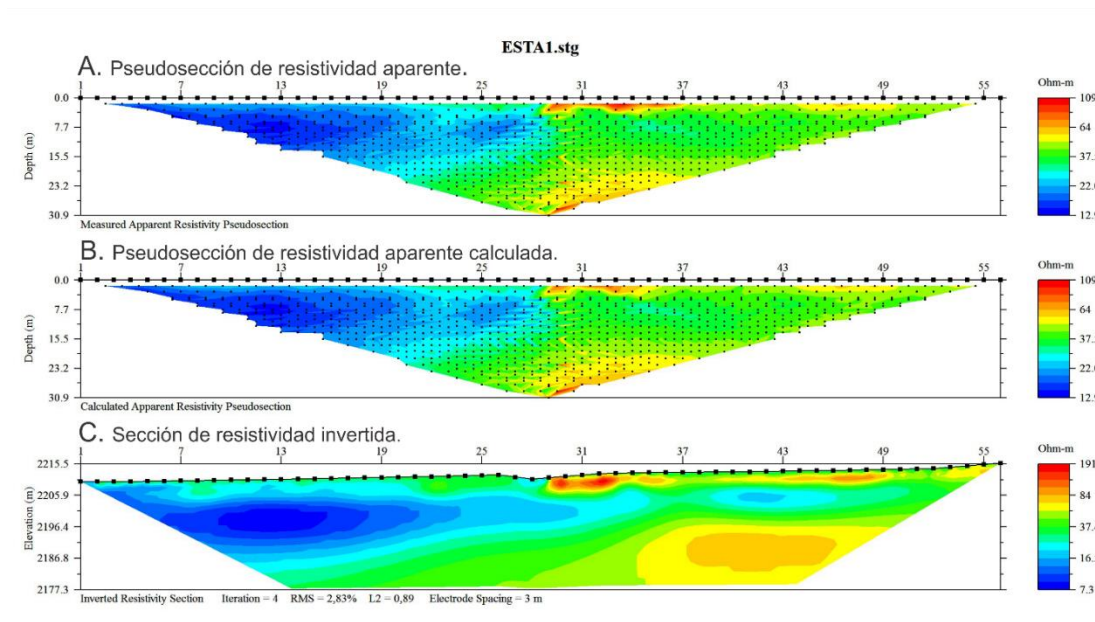


Ilustración 87: Procesamiento de la tomografía del sector del Estadio. La imagen superior corresponde con la pseudisección aparente de resistividad medida, la imagen del medio corresponde con la pseudosección aparente de resistividad calculada y la imagen inferior corresponde con la sección de resistividad invertida siendo el resultado del proceso.

El programa ejecuta 4 iteraciones hasta reducir el error a un 2.83%, valor más que aceptable.

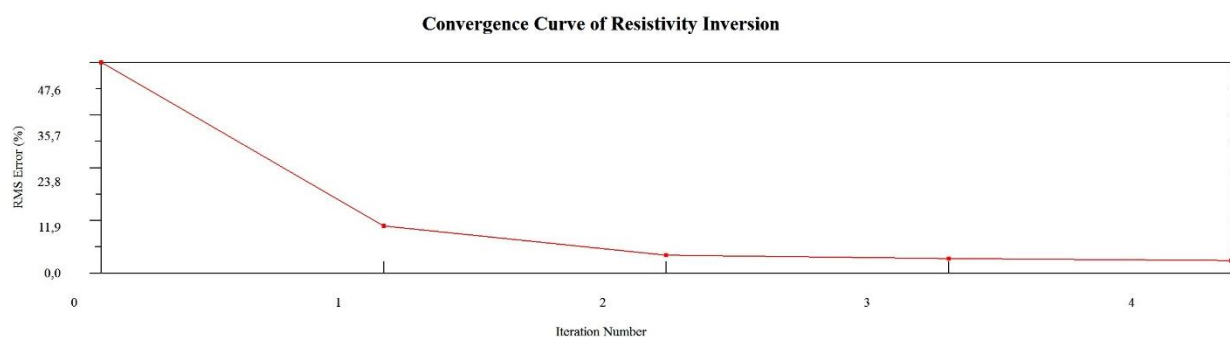


Ilustración 88: Curva de interacción versus error de inversión.

Utilizando la opción “*Misfit Data*” o puntos no ajustados del software se obtiene la iteración de cada punto de la tomografía y su porcentaje de error entre la pseudosección medida en campo, la pseudosección calculada y la sección teórica obtenida por el software.

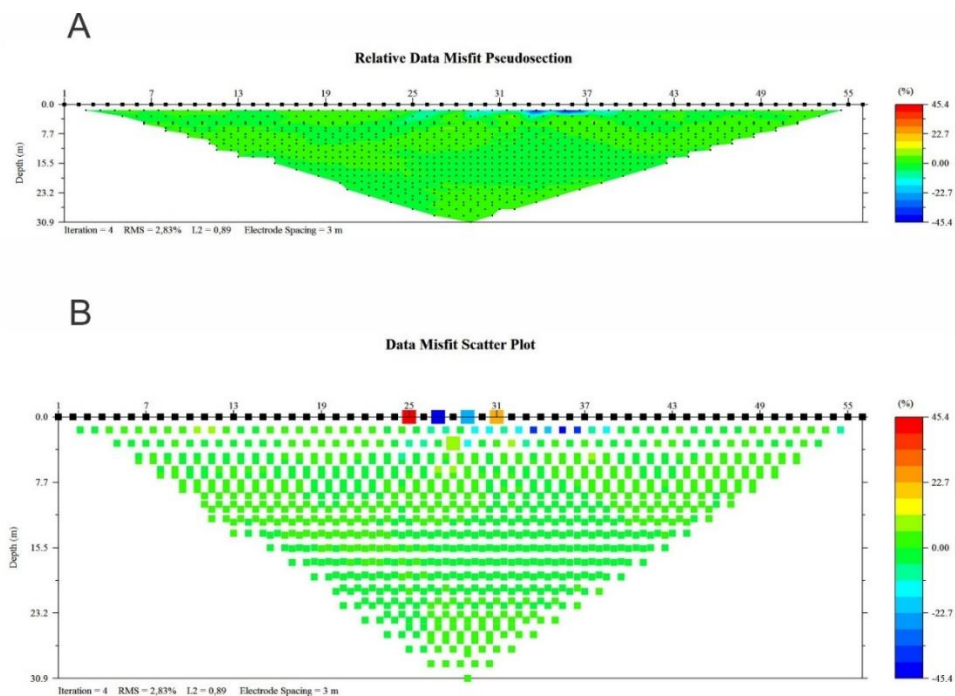


Ilustración 89: Secciones Misfit” de la tomografía del sector del Estadio. A). Se observa los puntos que no están en armonía en la pseudosección. B). Se observa los datos no acordes en la gráfica de dispersión de la tomografía.

También se observa la relación entre los diferentes puntos medidos en la pseudosección contra los obtenidos en la sección teórica ya invertida, en donde la relación es lineal, a medida que la desviación standard aumenta (o aumenta la dispersión en los datos) el error o la diferencia entre los modelos aumenta.

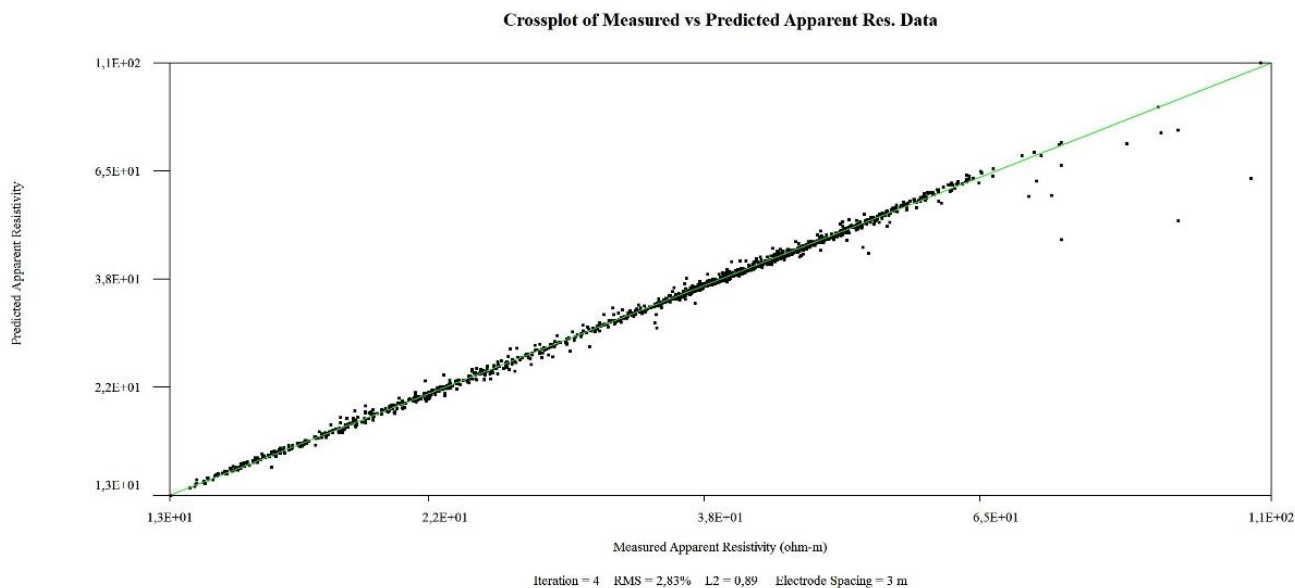


Ilustración 90: Relación entre la resistividad aparente medida y la resistividad aparente predicha o calculada en la tomografía realizada en la zona del estadio.

Finalmente se obtiene la sección de resistividad invertida, con los valores ajustados para su interpretación, una vez se eliminan los datos que superan la desviación estándar, generalmente en porcentajes despreciables respecto a la totalidad de los datos adquiridos, (< a 5% del total siempre).

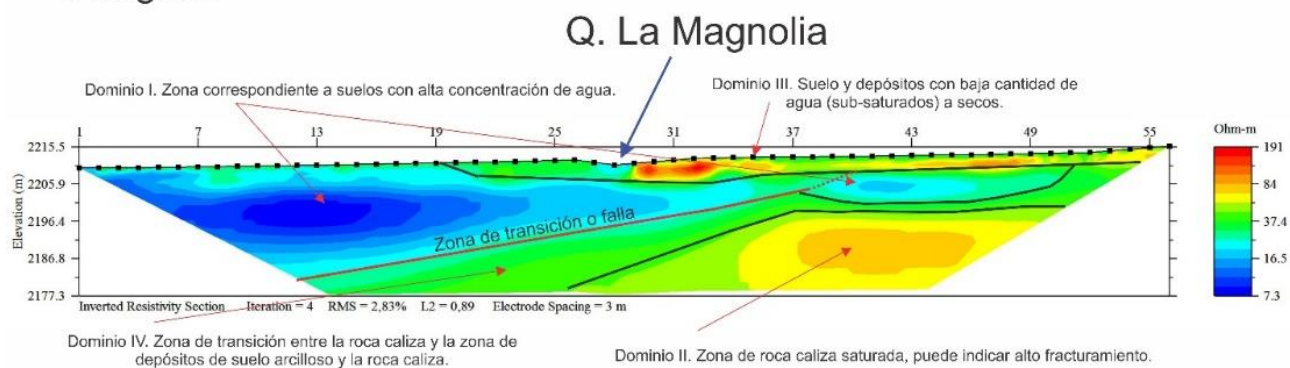
Tabla 20: rangos de resistividad usados para la diferenciación de zonas en las secciones eléctricas invertidas para la línea 1.

zona	Rangos de resistividad (Ω)
I	7.3-19

II	75-84
III	84-191
IV	19-75

SECCIÓN DE RESISTIVIDAD INVERTIDA ESTADIO

1. Original



2. Unificada

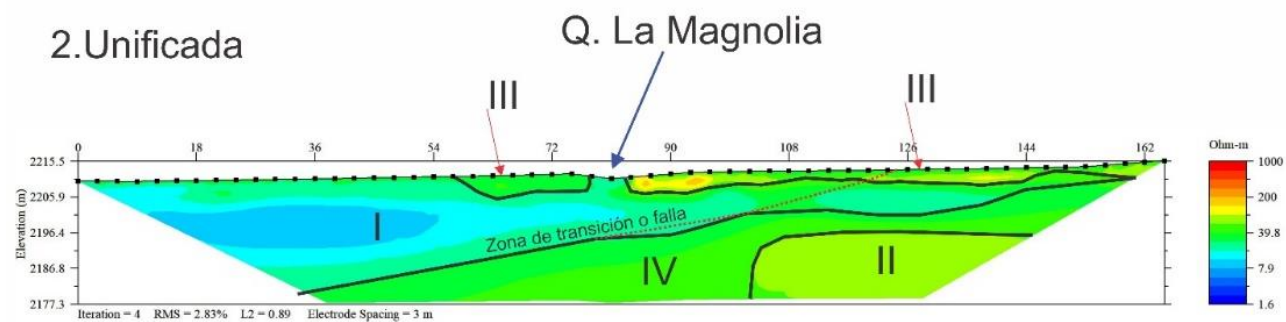


Ilustración 91: Sección eléctrica invertida de la tomografía en el sector del Estadio. 1). Sección de resistividad invertida con la escala de colores desde la resistividad más baja leída a la más alta. 2). Sección de resistividad invertida con la escala de colores unificada para todas las tomografías hechas en el municipio de Málaga.

5.2.2 Línea 2: Aeropuerto

En el aeropuerto se extiende el tomógrafo a la máxima longitud que permite el tomógrafo, con una distancia entre electrodo de 10 metros alcanzando una longitud de 560 metros, se escoge este lugar precisamente porque es uno de los pocos lugares donde se logra extender la totalidad del cable.

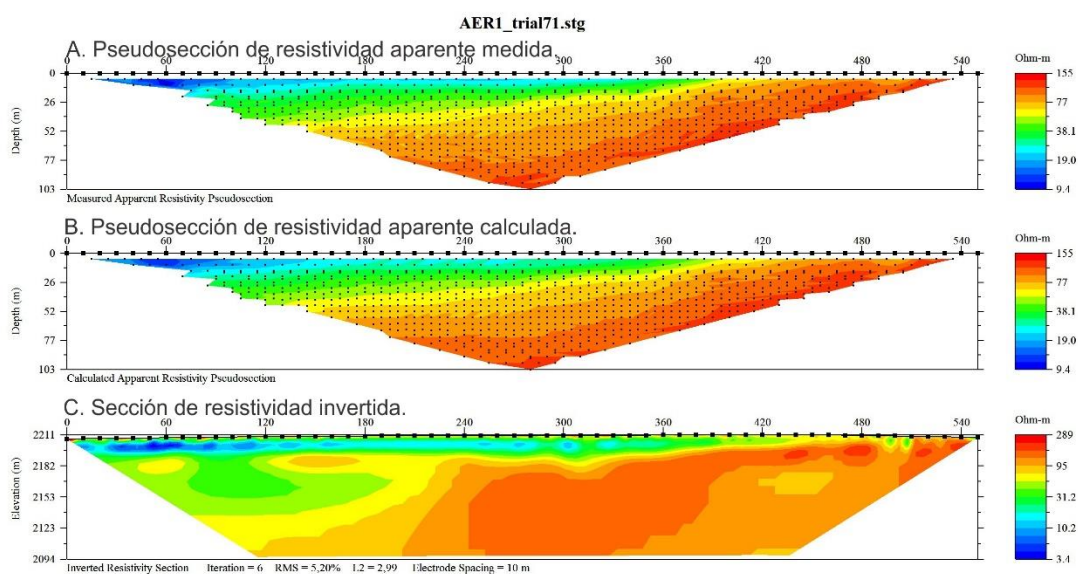


Ilustración 92: Tomografía eléctrica resistiva del sector del Aeropuerto. A) se observa la pseudosección de resistividad aparente obtenida en campo. B) se observa la pseudosección obtenida al calcular la resistividad aparente. C) Se observa la sección de resistividad invertida.

El error obtenido en la tomografía es de 5.20% con un total de 6 iteraciones. Se obtiene las gráficas con las zonas y los puntos erróneos o que no se ajusten en comparación al modelo teórico y los datos obtenidos en campo, observándose en la parte superior una pseudosección con las zonas que más se desajusta y en la parte inferior los puntos que menos se ajustan. Finalmente se obtiene la Pseudosección en 2D en la que se observa la relación entre el modelo teórico y las medidas obtenidas en campo y calculada, con una relación lineal teórica y dispersión de puntos a medida

que los datos en la relación obtenida se alejan de la relación lineal en la diferencias de los dos modelos.

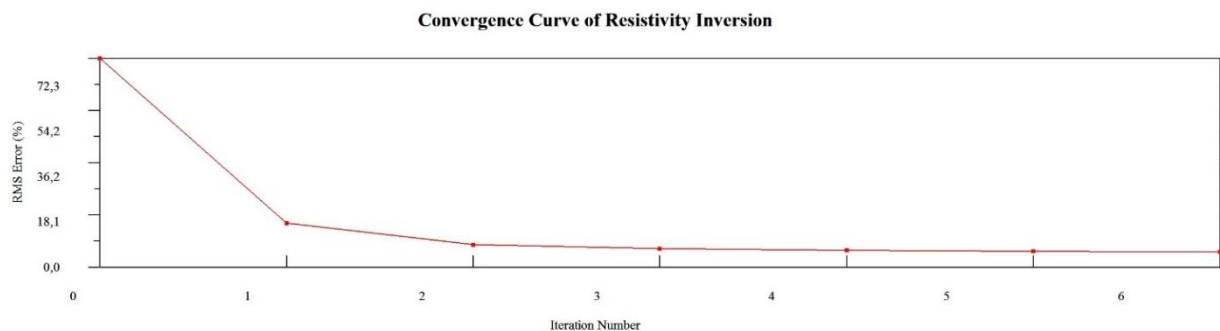


Ilustración 93: Gráfica de interacciones versus error del procesamiento de la tomografía echa en el sector del Aeropuerto.

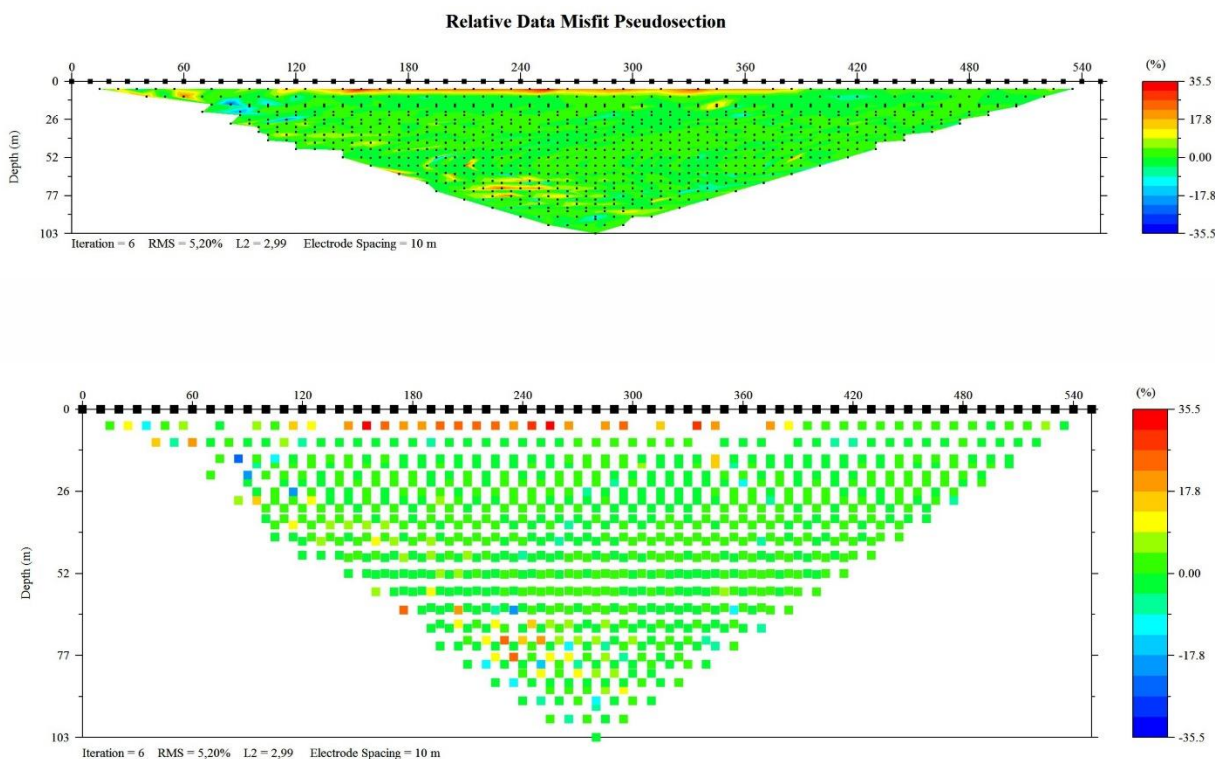


Ilustración 94: Graficas que muestra zonas y puntos que se alejan entre el modelo teórico y obtenido en campo, presentando variación a medidas que menos concuerdan en la tomografía eléctrica resistiva del Aeropuerto.

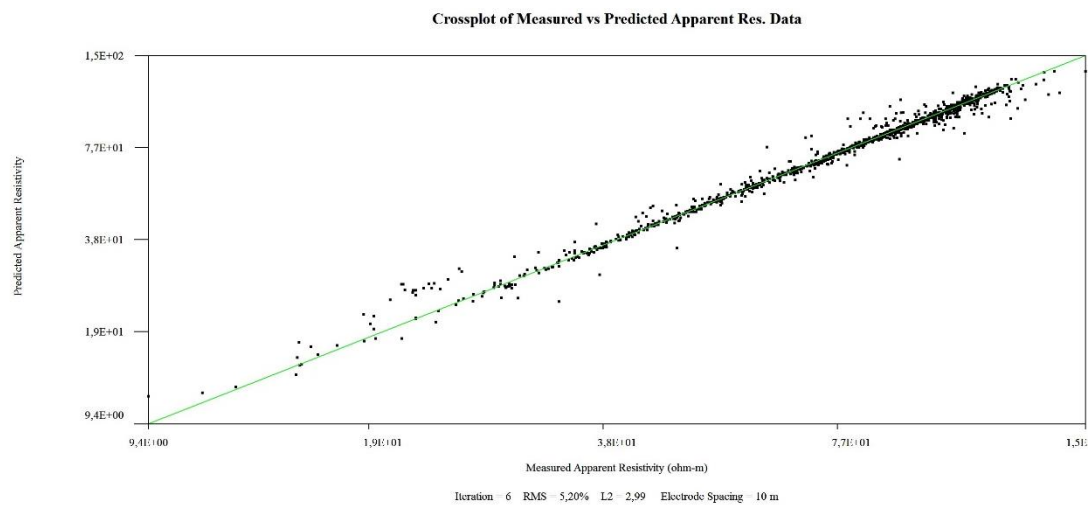
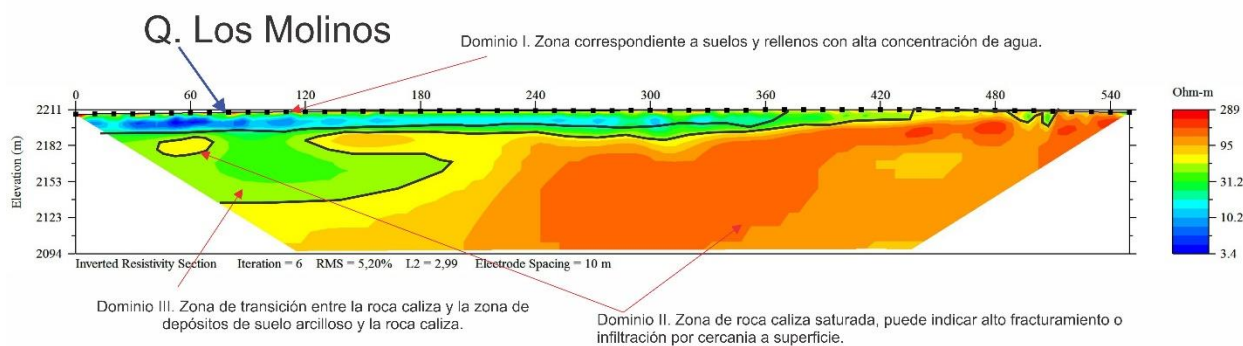


Ilustración 95: Relación entre los puntos obtenidos en campo con los puntos calculados o predichos.

SECCIÓN DE RESISTIVIDAD INVERTIDA AEROPUERTO

1. Original



2. Unificada

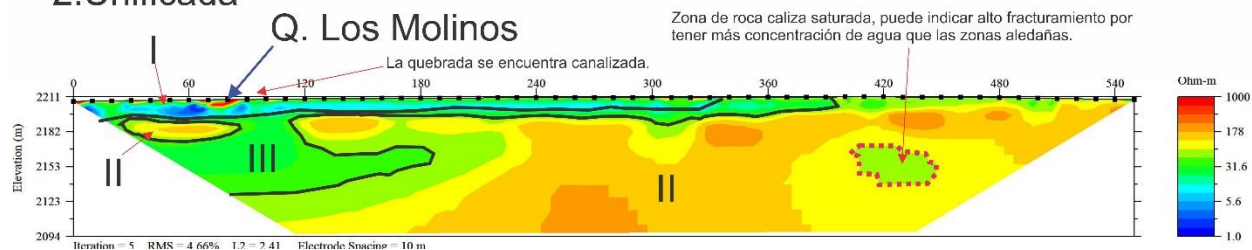


Ilustración 96: Sección de resistividad invertida de la zona del aeropuerto, siendo la imagen 1 la obtenida por el programa desde el dato de resistividad más alto al más bajo y la imagen 2 la sección unificada en la escala de colores.

Tabla 21: Rangos de resistividad usados para la diferenciación de zonas en las secciones eléctricas invertidas para la línea 2.

zona	Rangos de resistividad (Ω)
I	3.4-25
II	60-289

5.2.3 Línea 3: Guácimo

El área se elige por estar ubicada al oriente de la cabecera municipal y del eje del sinclinal que va en dirección norte-sur. Se ejecuta en lotes aledaños a la vía veredal con espacio entre electrodo de 3 metros con una extensión de 168 metros, una vez obtenido los datos se procesaron los datos en el software EarthImager 2D.

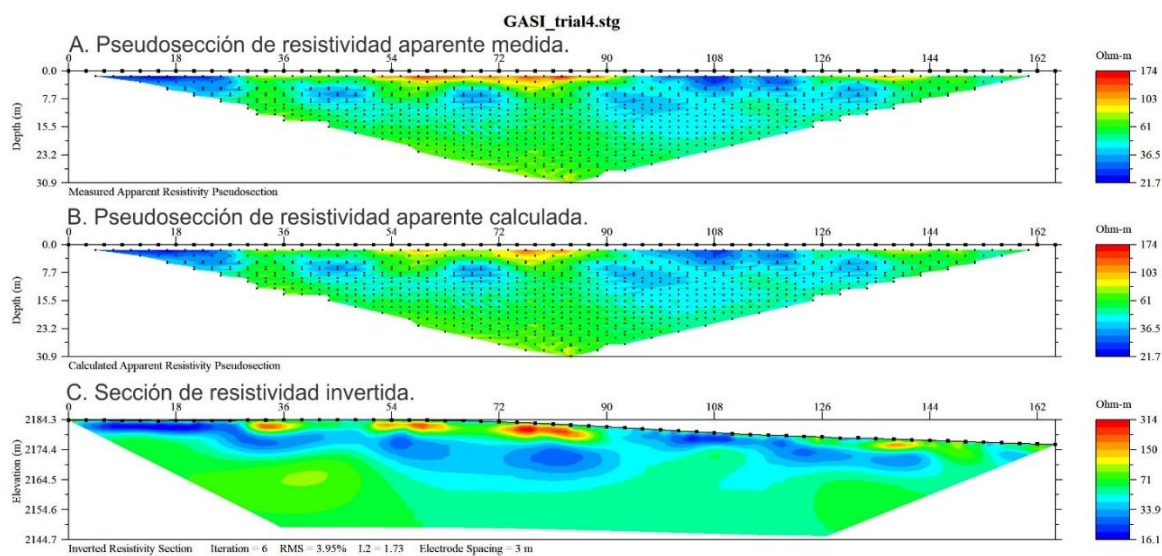


Ilustración 97: Datos procesados de la tomografía eléctrica resistiva del sector vía Guácimo. A) Pseudosección de datos obtenidos en campo. B) Pseudosección de datos obtenidos por cálculo del software EarthImager 2D. C) Sección de resistividad invertida obtenida.

La sección final logra un error de 3.95% con 6 iteraciones.

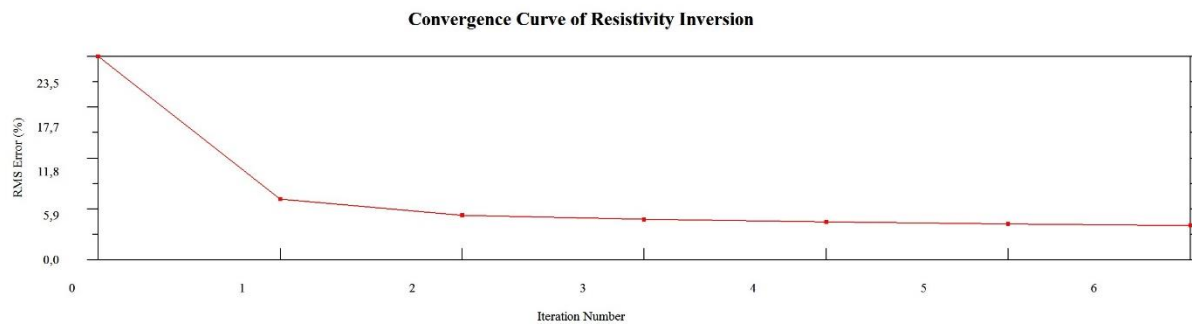
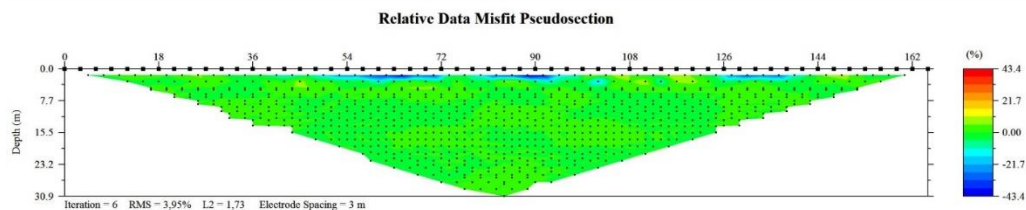


Ilustración 98: Gráfica de interacciones versus error, del procesamiento de la tomografía eléctrica resistiva del sector vía Guácimo.

A



B

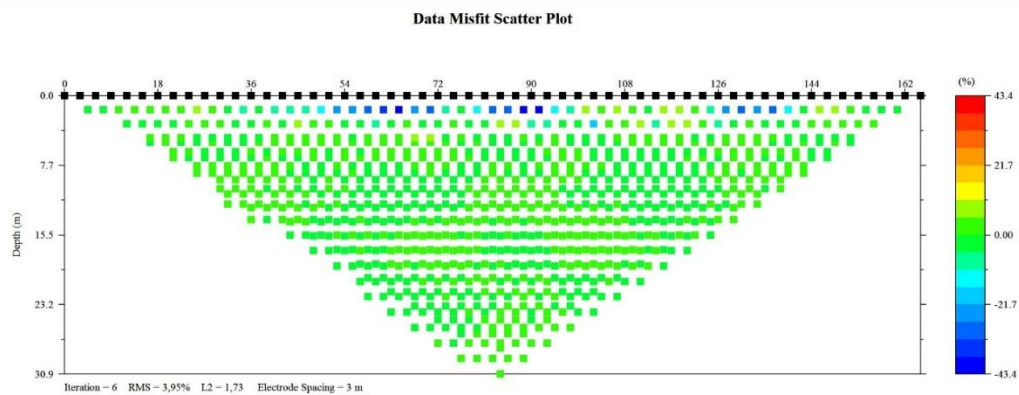


Ilustración 99: Zonas y puntos obtenidos que no se ajustan al modelo obtenido o diferencian del modelo teórico aumentando su error del procesamiento la sección obtenida de adquisición realizada en el sector vía Guácimo.

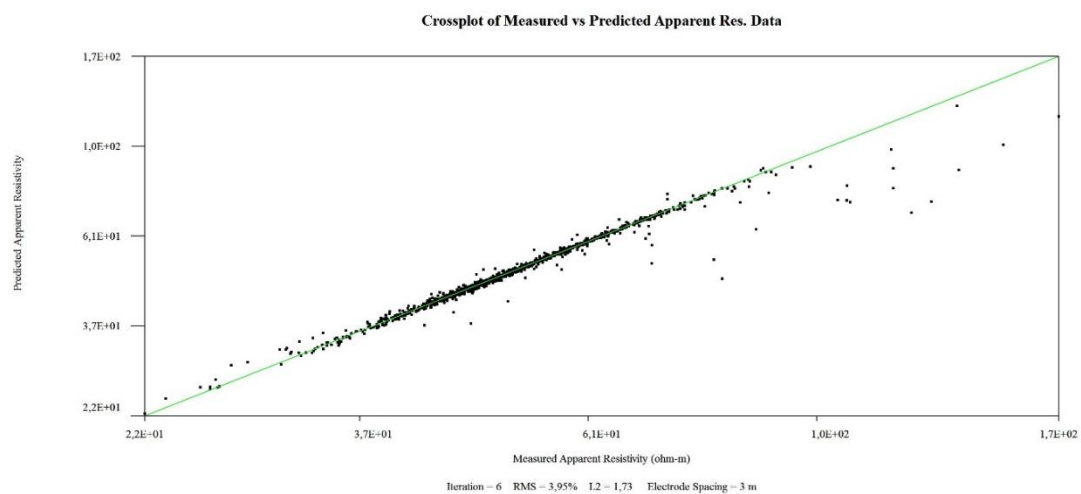
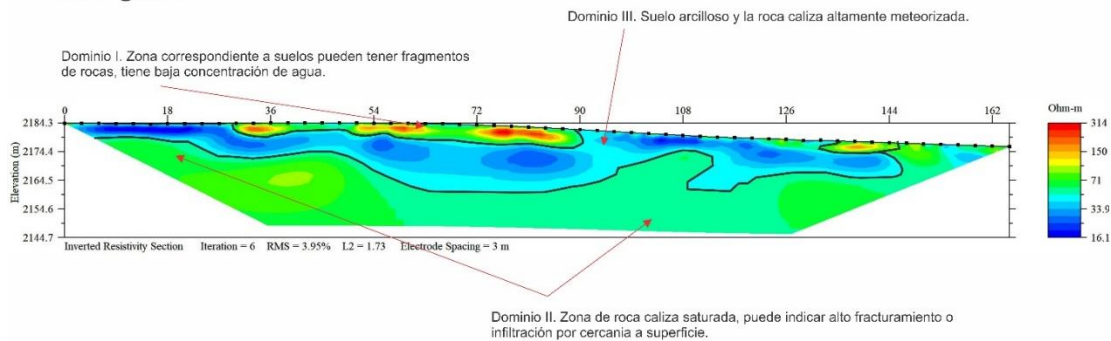


Ilustración 100: Grafica puntos medidos versus datos de puntos obtenidos en el procesamiento de la tomografía del sector vía Guácimo.

Una vez procesada se obtiene la sección eléctrica resistiva para su análisis

SECCIÓN DE RESISTIVIDAD INVERTIDA GUASIMO-NARANJITOS

1.Original



2.Unificada

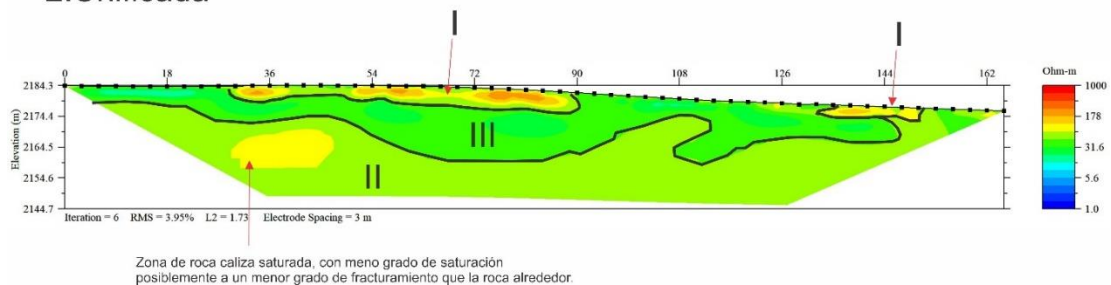


Ilustración 101: Sección de resistividad invertida de la zona de la vía Guasimo-Naranjitos, siendo la imagen 1 la obtenida por el programa desde el dato de resistividad más alto al más bajo y la imagen 2 la sección unificada en la escala de colores.

Tabla 22: rangos de resistividad usados para la diferenciación de zonas en las secciones eléctricas invertidas para la línea 3.

zona	Rangos de resistividad (Ω)
I	71-314
II	16.1-50
III	50-71

5.2.4 Línea 4: Laguna Seca

Obtenidos los datos de campo se procesaron en el software EarthImager 2D

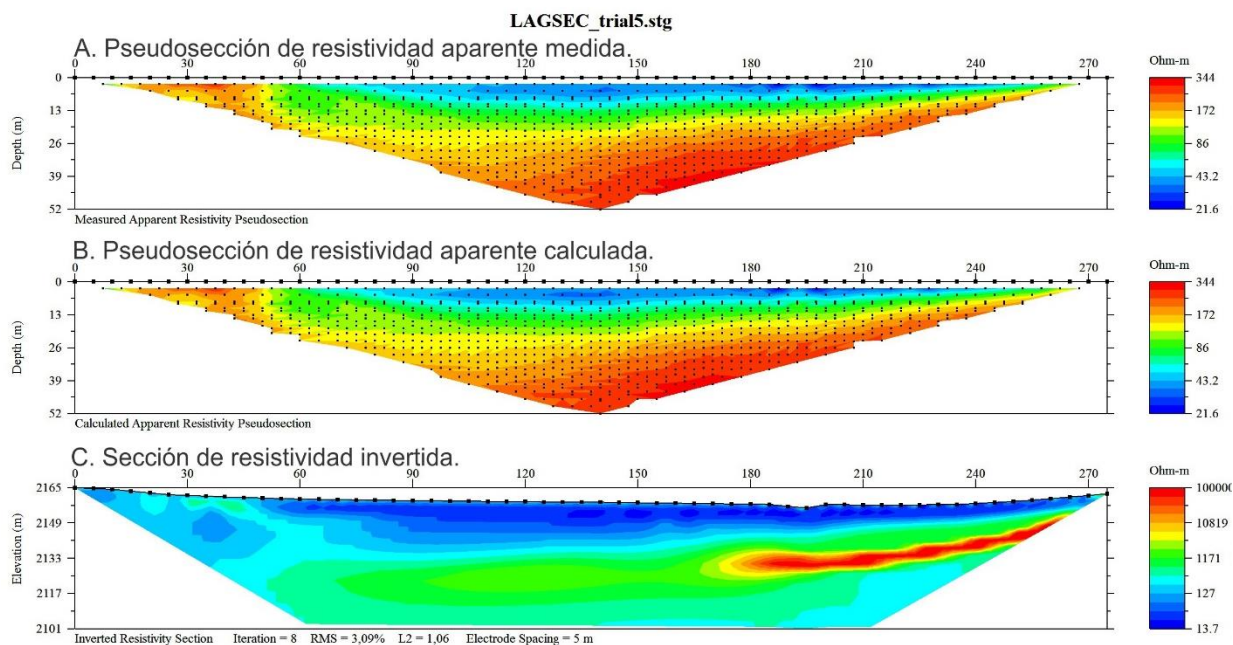


Ilustración 102: Datos procesados de la tomografía eléctrica resistiva del sector de Laguna Seca. A) Pseudosección de datos obtenidos en campo. B) Pseudosección de datos obtenidos por cálculo del software EarthImager 2D. C) Sección de resistividad invertida obtenida.

El número de iteraciones totales es de 8 con un error de 3.09%

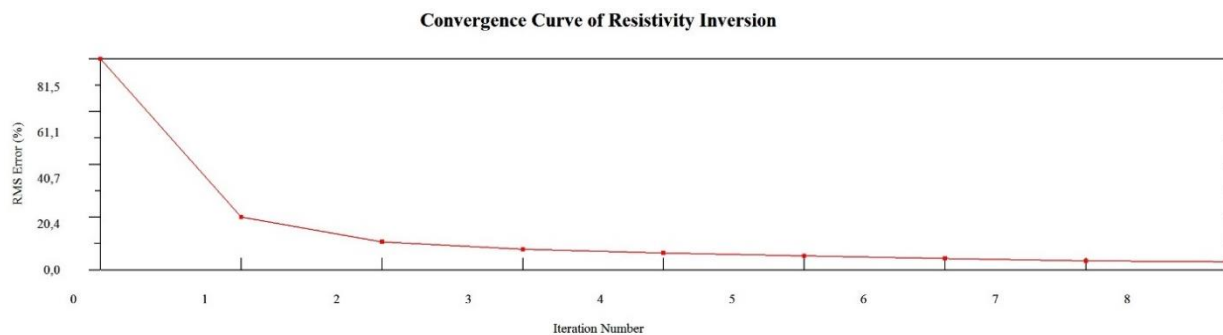


Ilustración 103: Gráfica de interacciones versus error, del procesamiento de la tomografía eléctrica resistiva del sector de Laguna Seca.

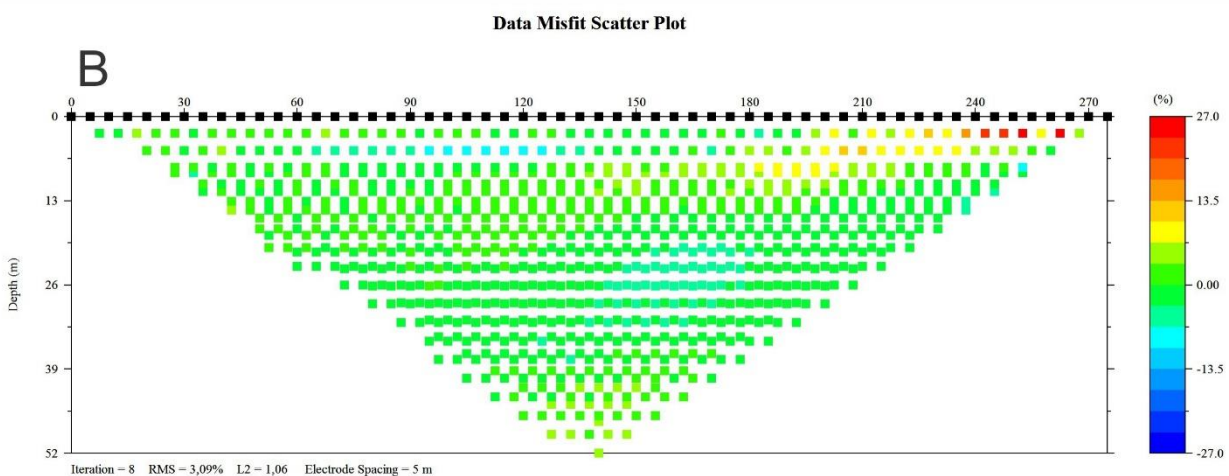
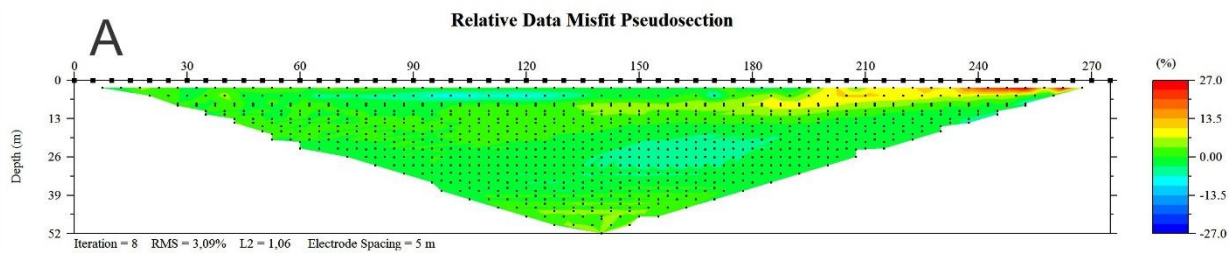


Ilustración 104: Datos anómalos o no acordes del procesamiento de datos de la tomografía del sector de Laguna Seca. A). Se observa los puntos que no están en armonía en la pseudosección. B). Se observa los datos no acordes en la gráfica de dispersión de la tomografía.

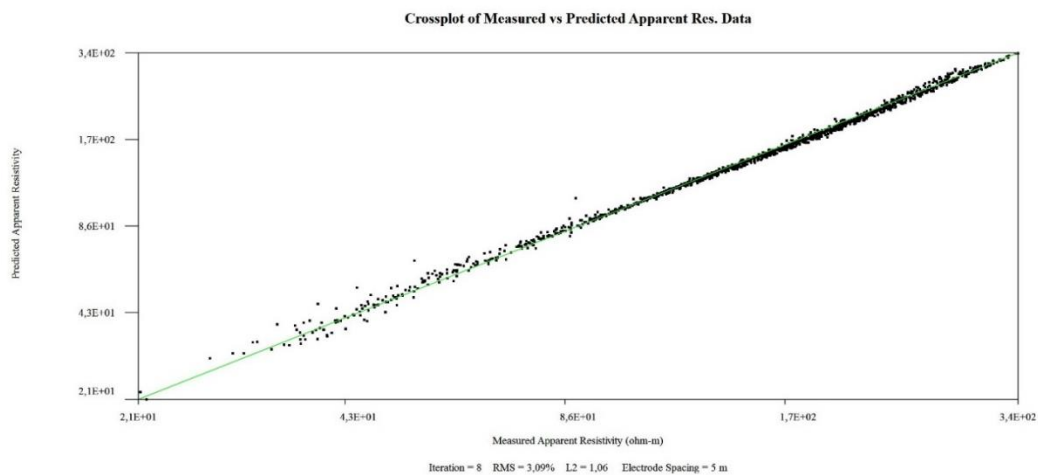
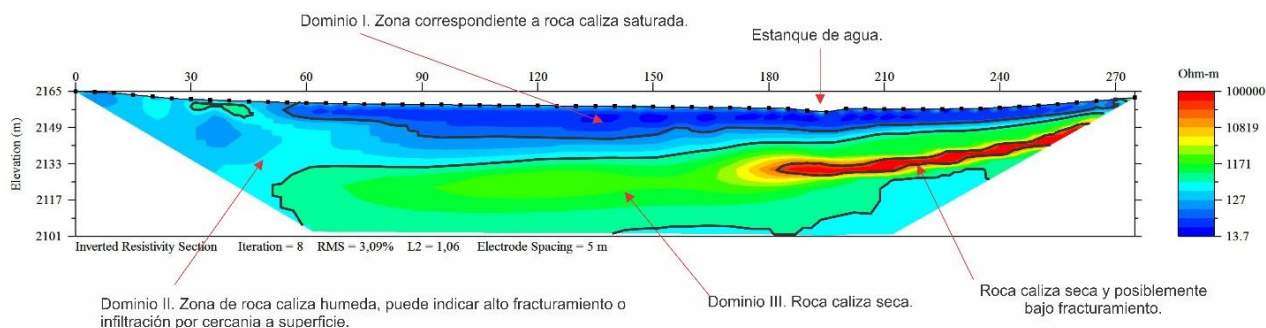


Ilustración 105: Relación entre los puntos obtenidos en campo con los puntos calculados o predichos en el procesamiento de la tomografía realizada en el sector de Laguna Seca.

Una vez terminado el procesamiento se obtiene la sección de resistividad invertida para su análisis.

SECCIÓN DE RESISTIVIDAD INVERTIDA LAGUNA SECA

1.Original



2.Unificada

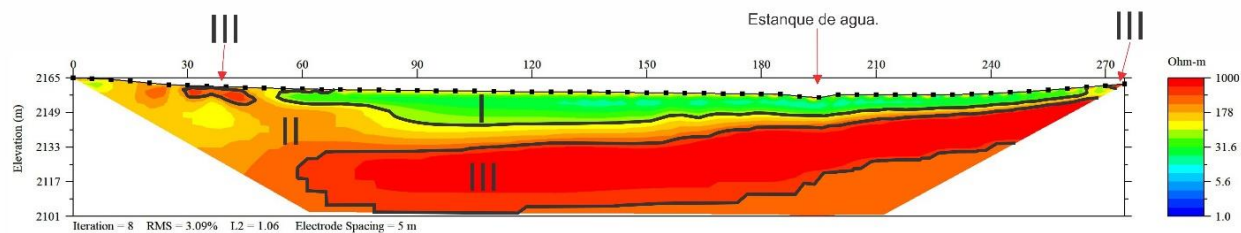


Ilustración 106: Sección de resistividad invertida de la zona de Laguna Seca, siendo la imagen 1 la obtenida por el programa desde el dato de resistividad más alto al más bajo y la imagen 2 la sección unificada en la escala de colores.

Tabla 23: Rangos de resistividad usados para la diferenciación de zonas en las secciones eléctricas invertidas para la línea 4

zona	Rangos de resistividad (Ω)
I	13.7-127
II	127-650

5.2.5 Línea 5: UIS1

Se decide tomar las tomografías en la zona que comprende la sede de la Universidad Industrial de Santander del proyecto de grado “Caracterización del Subsuelo Mediante Prospección Geofísica de Resistividades (Tomografía Eléctrica y Sondeos Eléctricos Verticales SEV’s) con Fines Hidrogeológicos en la Sede de Málaga de la Universidad Industrial de Santander (UIS)” de María Angélica Salamanca Corredor, para conocer el subsuelo en la parte norte del municipio de Málaga y añadir más información al presente estudio.

Con los datos obtenidos en campo en la campaña de tomografía se procesa en el software EarthImager 2D para obtener una sección a profundidad con resistividad para ubicar zonas que almacenen agua.

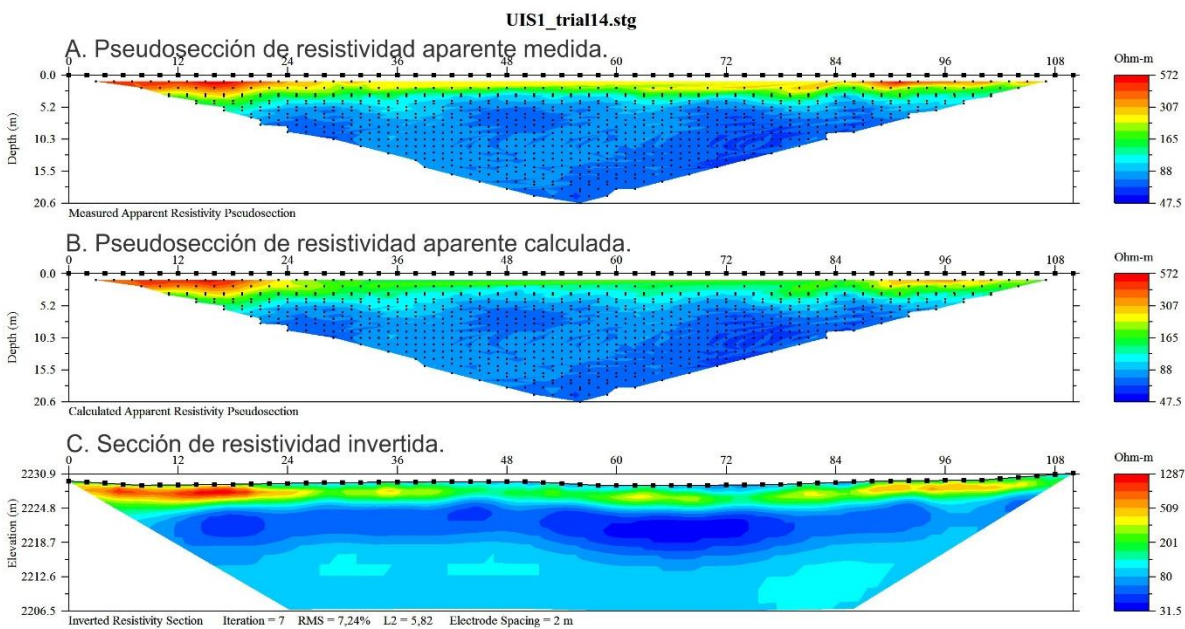


Ilustración 107: Datos procesados de la tomografía eléctrica resistiva UIS 1 en los predios al norte de la Universidad Industrial de Santander sede Málaga. A) Pseudo sección de datos obtenidos en campo. B) Pseudo sección de datos obtenidos por cálculo del software EarthImager 2D. C) Sección de resistividad invertida obtenida.

El número total de iteraciones es de 7 con un error de 7.24%

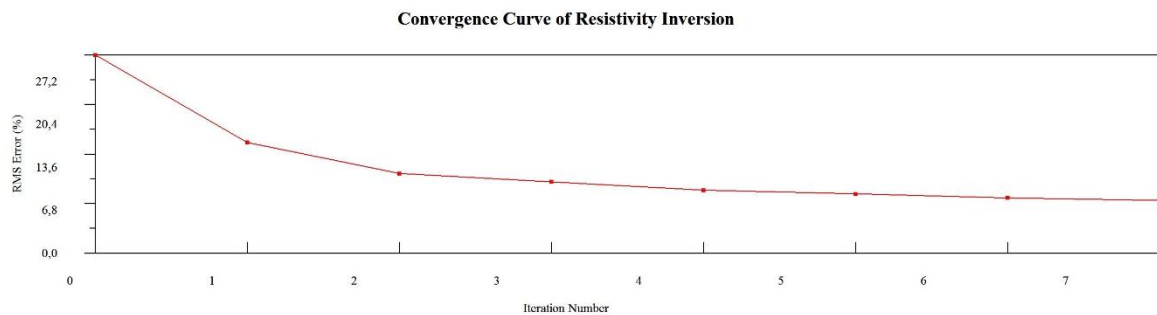


Ilustración 108: Gráfica de interacciones versus error, del procesamiento de la tomografía eléctrica resistiva UIS1 en la Universidad Industrial de Santander sede Málaga.

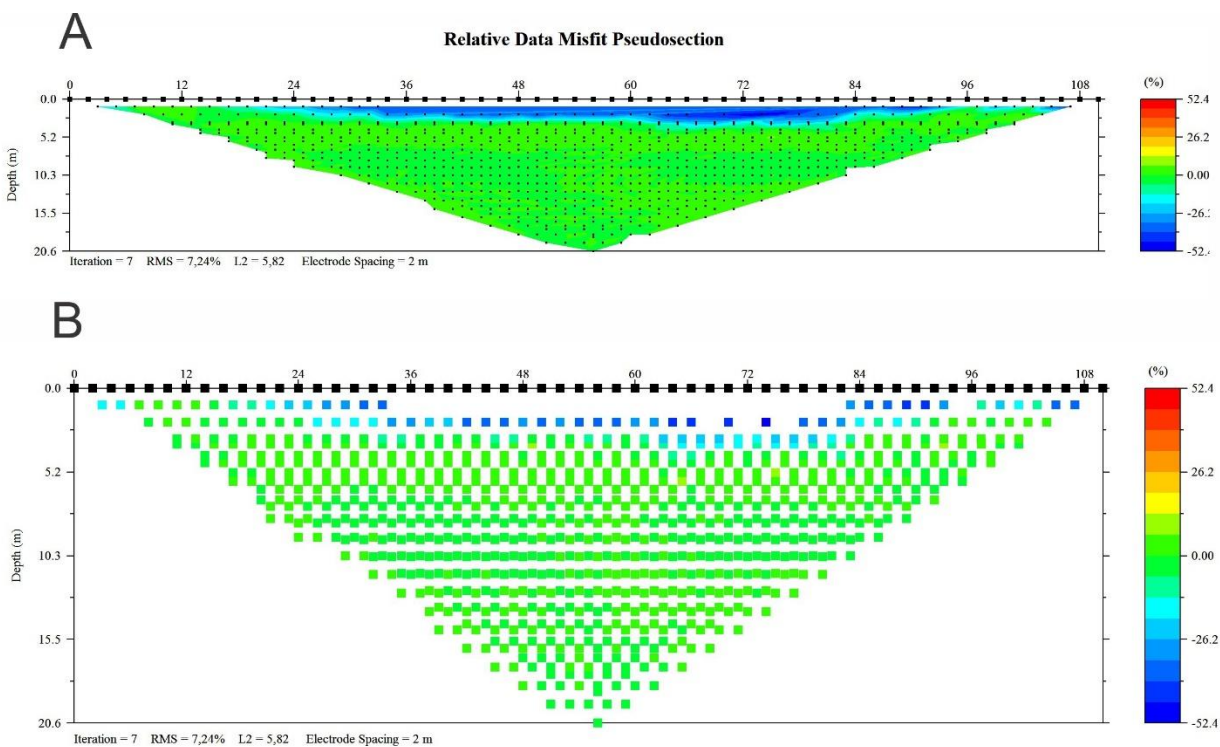


Ilustración 109: Datos anómalos o no acordes del procesamiento de datos de la tomografía UIS1 en la Universidad Industrial de Santander sede Málaga. A). Se observa las zonas que no están en armonía en la pseudosección. B). Se observa los datos por cada punto no acordes en la gráfica de dispersión de la tomografía.

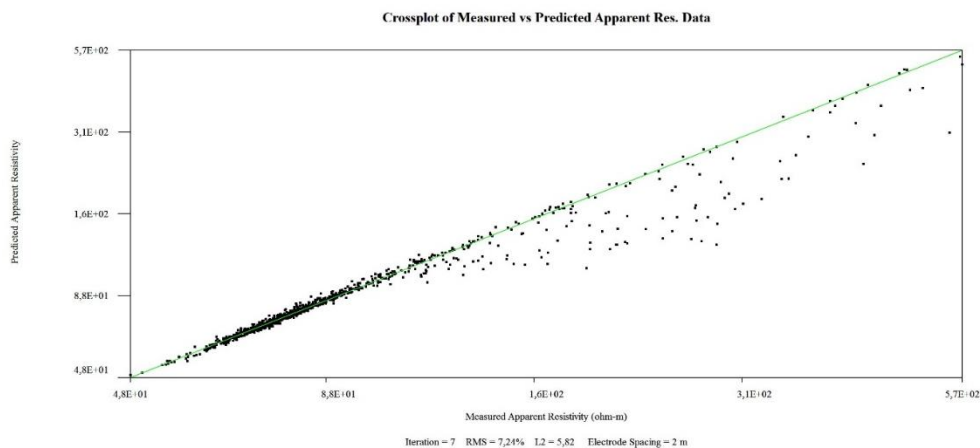


Ilustración 110: Relación entre los puntos obtenidos en campo con los puntos calculados o predichos en el procesamiento de la tomografía UIS1 realizada en la Universidad Industrial de Santander sede Málaga.

Terminado el procesamiento se obtiene la sección de resistividad invertida para su análisis al igual que para las demás.

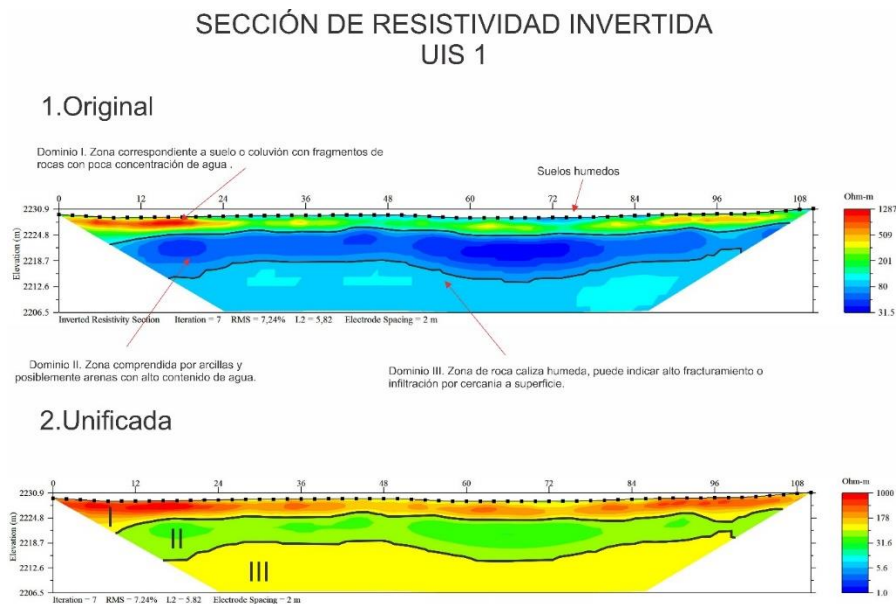


Ilustración 111: Datos procesados de la tomografía eléctrica resistiva UIS1 del sector en la Universidad Industrial de Santander sede Málaga. A) Pseudosección de datos obtenidos en campo. B) Pseudosección de datos obtenidos por cálculo del software EarthImager 2D. C) Sección de resistividad invertida obtenida.

Tabla 24: Rangos de resistividad usados para la diferenciación de zonas en las secciones eléctricas invertidas para la línea 5

zona	Rangos de resistividad (Ω)
I	140-1000
II	31.5-80
III	80-140

5.2.6 Línea 6: UIS2

La tomografía se realiza también para el proyecto UIS Sede Málaga mencionado, de hecho para cruzar la información con la tomografía UIS1 para obtener una mejor visión del subsuelo, la adquisición fue hecha en los predios no construidos al norte de la universidad espacio adquirido por la UIS para ampliar su planta física.

La tomografía UIS2 tiene un espaciamento entre electrodo de 2 metros, una vez hecha la adquisición se procesaron los datos en el software EarthImager 2D obteniendo como resultado una sección de resistividad invertida.

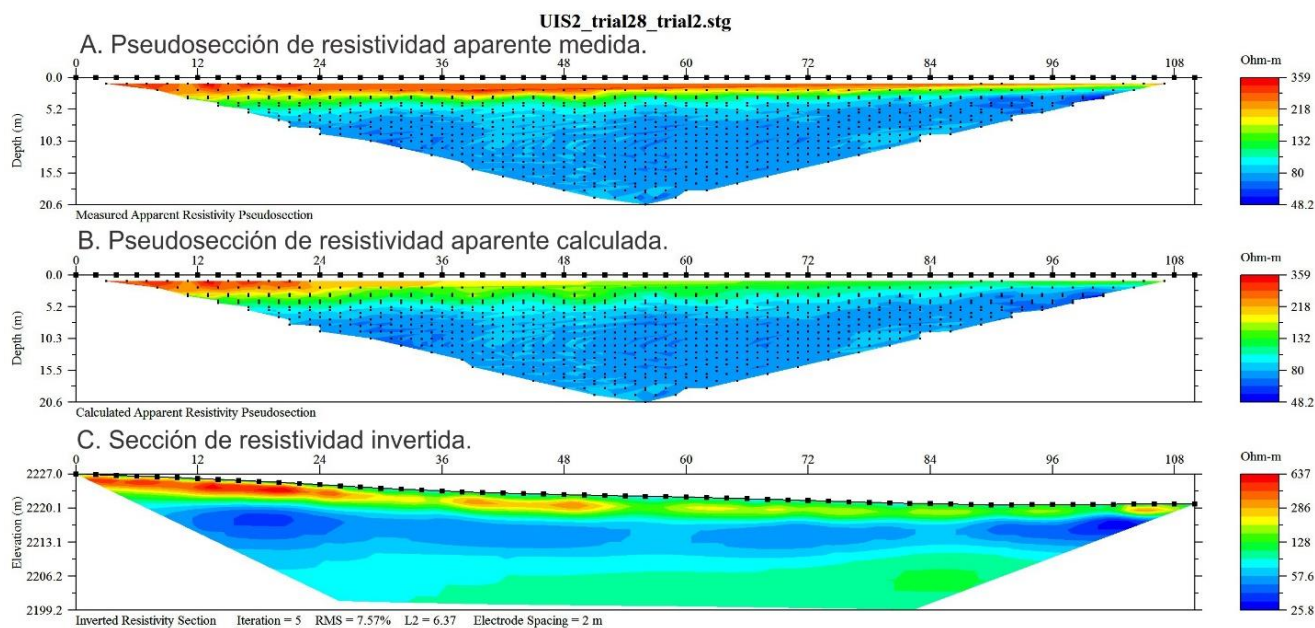


Ilustración 112: Datos procesados de la tomografía eléctrica resistiva UIS 2 en los predios al norte de la Universidad Industrial de Santander sede Málaga. A) Pseudosección de datos obtenidos en campo. B) Pseudosección de datos obtenidos por cálculo del software EarthImager 2D. C) Sección de resistividad invertida obtenida.

En el procesamiento el software hace 6 iteraciones con un error de 7.5%

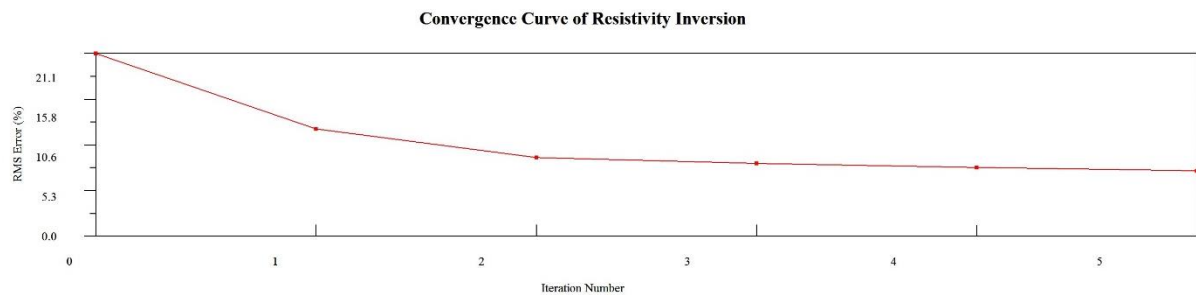


Ilustración 113: Gráfica de interacciones versus error, del procesamiento de la tomografía eléctrica resistiva UIS2 en la Universidad Industrial de Santander sede Málaga.

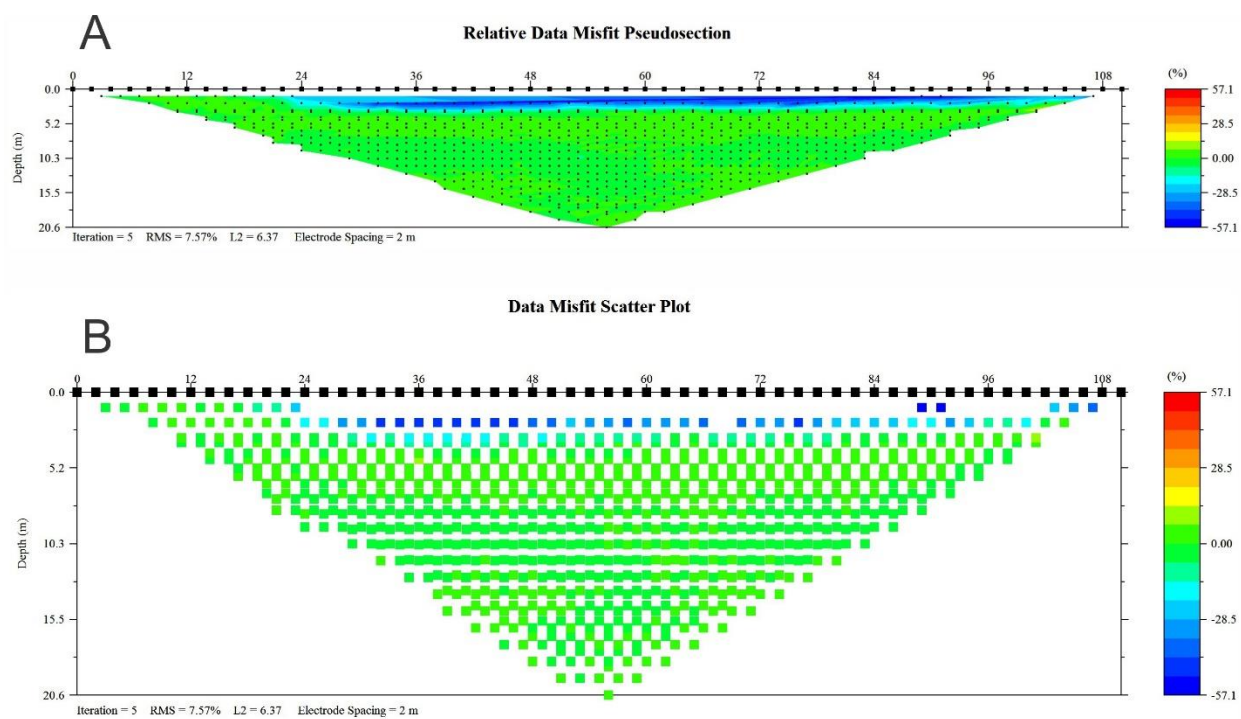


Ilustración 114: Datos anómalos o no acordes del procesamiento de datos de la tomografía UIS2 en la Universidad Industrial de Santander sede Málaga. A). Se observa las zonas que no están en armonía en la pseudosección. B). Se observa los datos por punto no acordes en la gráfica de dispersión de la tomografía.

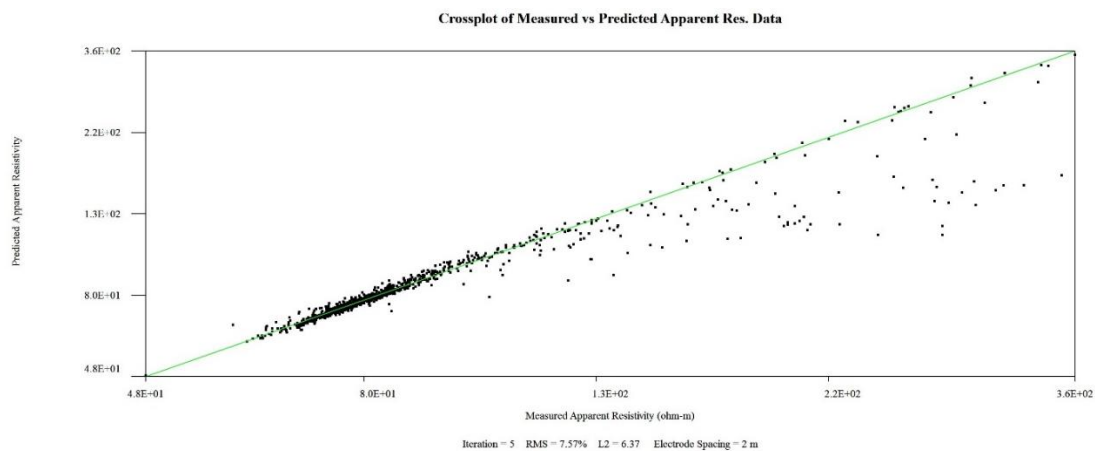
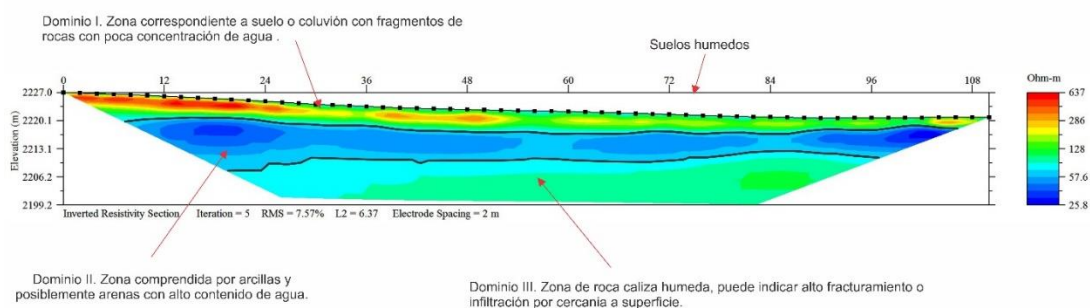


Ilustración 115: Relación entre los puntos obtenidos en campo con los puntos calculados o predichos en el procesamiento de la tomografía UIS2 realizada en la Universidad Industrial de Santander sede Málaga.

Ya obtenidos los resultados del procesamiento de la adquisición de la tomografía se concluye con la toma de datos de campo y se procede a realizar las respectivas interpretaciones.

SECCIÓN DE RESISTIVIDAD INVERTIDA UIS 2

1. Original



2. Unificada

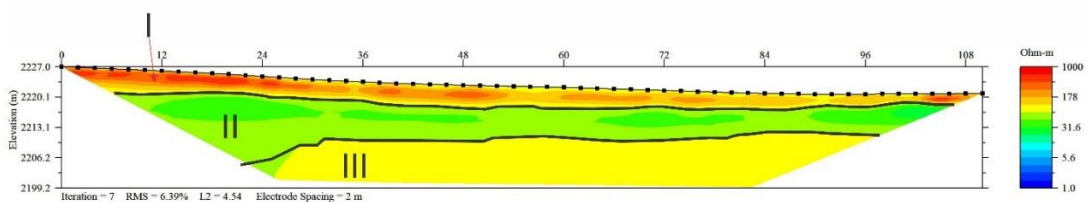


Ilustración 116: Datos procesados de la tomografía eléctrica resistiva UIS2 del sector en la Universidad Industrial de Santander sede Málaga. A) Pseudosección de datos obtenidos en campo. B) Pseudosección

de datos obtenidos por cálculo del software EarthImager 2D. C) Sección de resistividad invertida obtenida.

Tabla 25: Rangos de resistividad usados para la diferenciación de zonas en las secciones eléctricas invertidas para la línea 6.

zona	Rangos de resistividad (Ω)
I	120-637
II	25.8-80
III	80-120

5.3 Tratamiento De Datos Obtenidos Con Sondeos Verticales Eléctricos

5.3.1 Sondeo Eléctrico Vertical RCREA

La primera adquisición del sondeo eléctrico vertical se realiza en las coordenadas Este 1148896, Norte 1233212 y Elevación 2204 +/-3 metros sobre el nivel del mar. Se procesa utilizando el programa IP2Win el SEV RCREA1 obteniendo un error de 0.745% entre la línea obtenida en campo y la línea teórica.

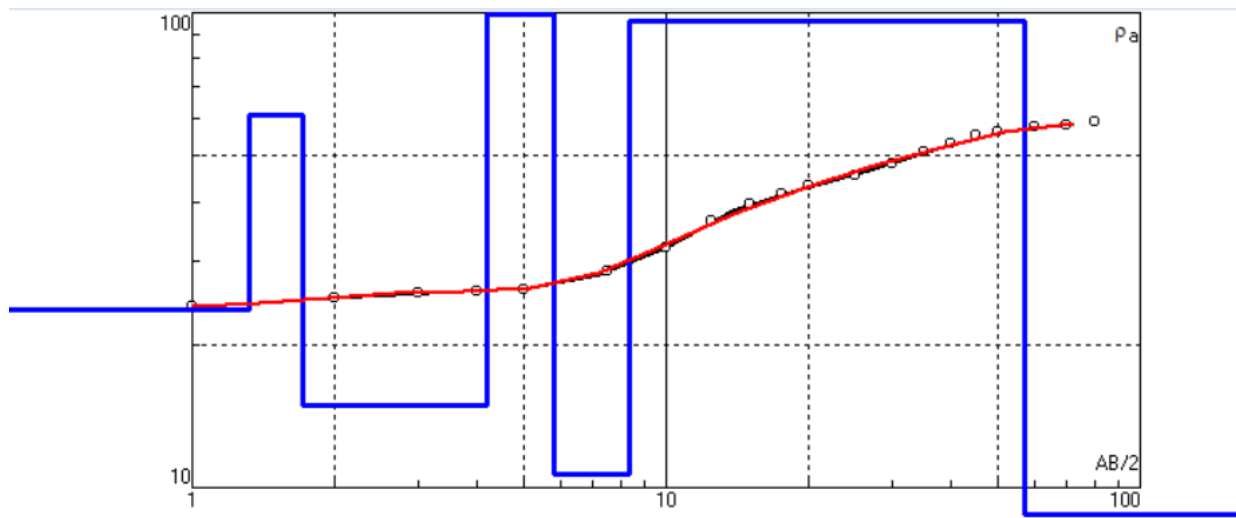


Ilustración 117: procesamiento del SEV RCREA1 utilizando el IP2Win con un error del 0.745% entre las líneas obtenidas.

Tabla 26: Tabla de resultado del procesamiento en el Software IP2Win (Lite) Versión 7.01.03 para el SEV RCREA1

N	ρ	h	d	Alt
1	23.72	1.31	1.31	2203
2	56.92	0.4375	1.747	2202
3	14.46	2.404	4.151	2200
4	293.1	1.628	5.78	2198
5	9.86	2.449	8.229	2196
6	100.1	45.3	53.53	2150
7	8.258			

Tabla 27: Resultado del procesamiento en el Software IP2Win (Lite) Versión 7.01.03 para el SEV RCREA1

Intervalo	Resistividad (Omh.m)	Espesor	Profundidad	Litología
1	23.72	1.31	0 – 1.31	Suelo húmedo
2	56.92	0.4375	1.31 – 1.747	Suelo húmedo con partículas más grandes como arenas o gravas o material de relleno
3	14.46	2.404	1.747 – 4.151	Arcillas y limos (Aluvial)

4	293.1	1.628	4.151 – 5.78	Coluvión
5	9.86	2.449	5.78 – 8.229	Aluvión
6	100.1	45.3	8.229 – 53.53	Caliza altamente fracturada saturada
7	8.38		53.53 - ...	Concentración de agua por alguna estructura o por capa arcillosa-limosa

El SEV RCREA2 ubicado en las coordenadas Este 1148395 y Norte 1233933, se obtiene la curva teórica a partir de los datos recolectados en campo obteniendo el resultado visto en la imagen, utilizando el programa de licencia libre IP2Win, a partir de la curva se obtiene la tabla , donde se observan 5 capas resistivas. Luego de este proceso el error que se obtiene es de 4.3%.

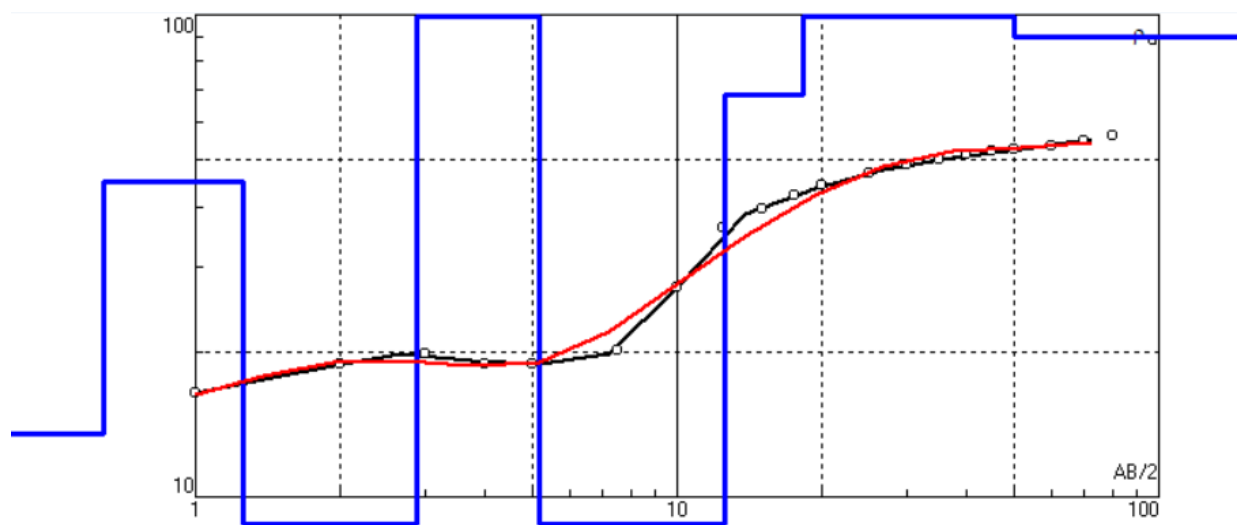


Ilustración 118: Curva obtenida a partir de los datos obtenidos en campo en color negra, curva teórica obtenida a partir del proceso hecho por el programa IP2Win en color roja y capas obtenidas a partir de la curva teórica vistas en la línea azul para RCREA2.

Tabla 28: Tabla de resultado del procesamiento en el Software IP2Win (Lite) Versión 7.01.03 para el SEV RCREA2.

N	ρ	h	d	Alt
1	13.5	0.646	0.646	2203
2	45.1	0.605	1.25	2203
3	6.45	1.64	2.89	2201
4	667	2.3	5.19	2199
5	6.09	7.35	12.5	2191
6	68.1	5.75	18.3	2186
7	243	9.36	27.7	2176
8	1558	22.6	50.3	2154
9	89.6			

Tabla 29: Resultado del procesamiento en el Software IP2Win (Lite) Versión 7.01.03 para el SEV RCREA2.

Intervalo	Resistividad (Omh.m)	Espesor	Profundidad	Litología
1	13.5	0.646	0 – 0.646	Suelo saturado
2	45.1	0.605	0.646 – 1.25	Material de relleno o suelo con partículas tamaño arena o grava
3	6.45	1.64	1.25 – 2.89	Suelo saturado
4	667	2.3	2.89 – 5.19	Coluvión seco
5	6.09	7.35	5.19 – 12.5	Arcillas y limos
6	68.1	5.75	12.5 – 18.3	Caliza saturada
7	243	9.36	18.3 – 27.7	Caliza húmeda
8	1558	22.6	27.7 – 50.3	Caliza húmeda
9	89.6		50.3 - ...	Concentración de agua por alguna estructura o por capa arcillosa-limosa

Ya con estos resultados se obtiene una columna o corte en profundidad de las resistividades entre los dos sondeos eléctricos verticales en el programa IP2Win generando una pseudosección (2D).

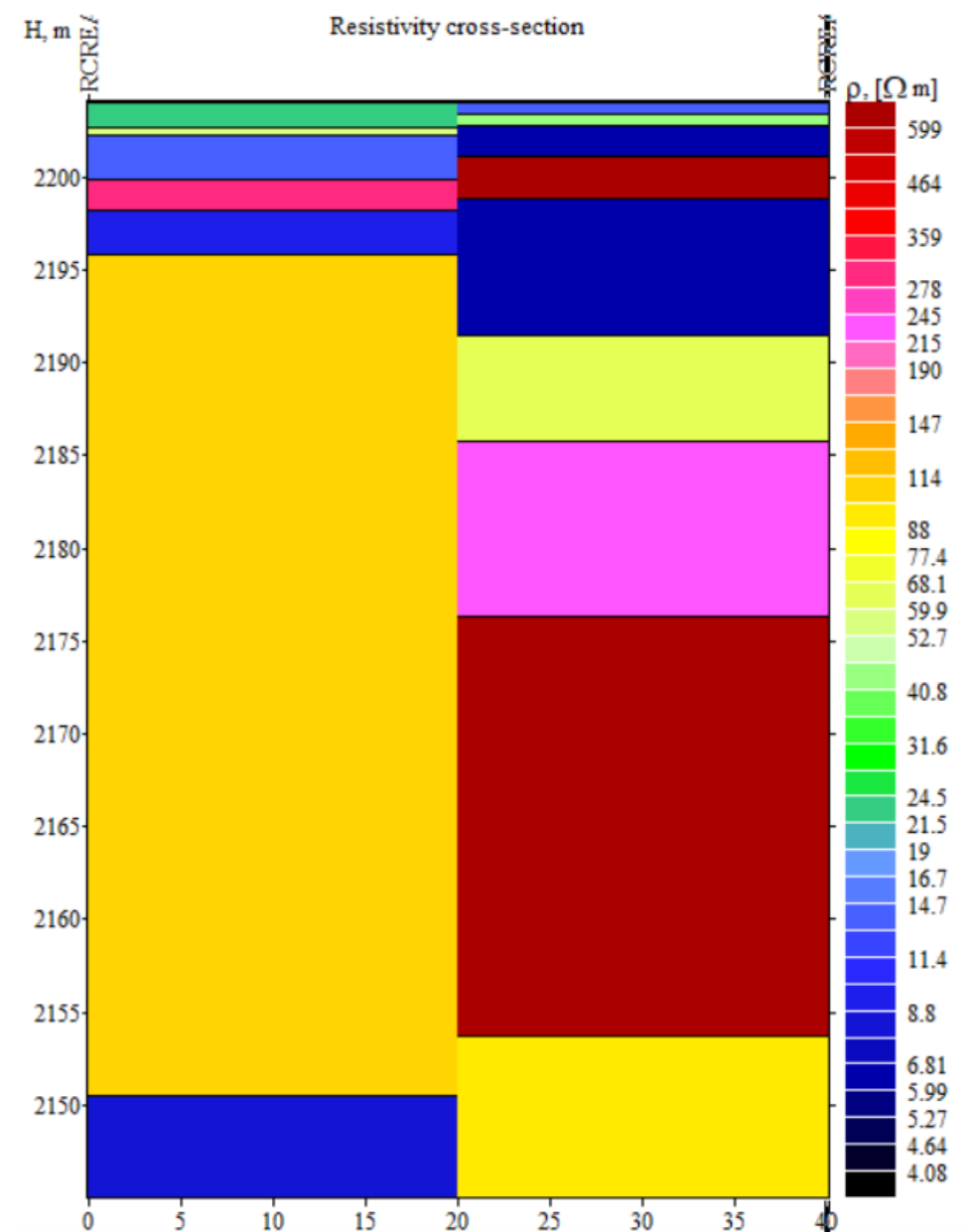


Ilustración 119: Corte de resistividades RCREA obtenido del sondeo eléctrico vertical RCREA1 a la derecha y RCREA2 a la izquierda.

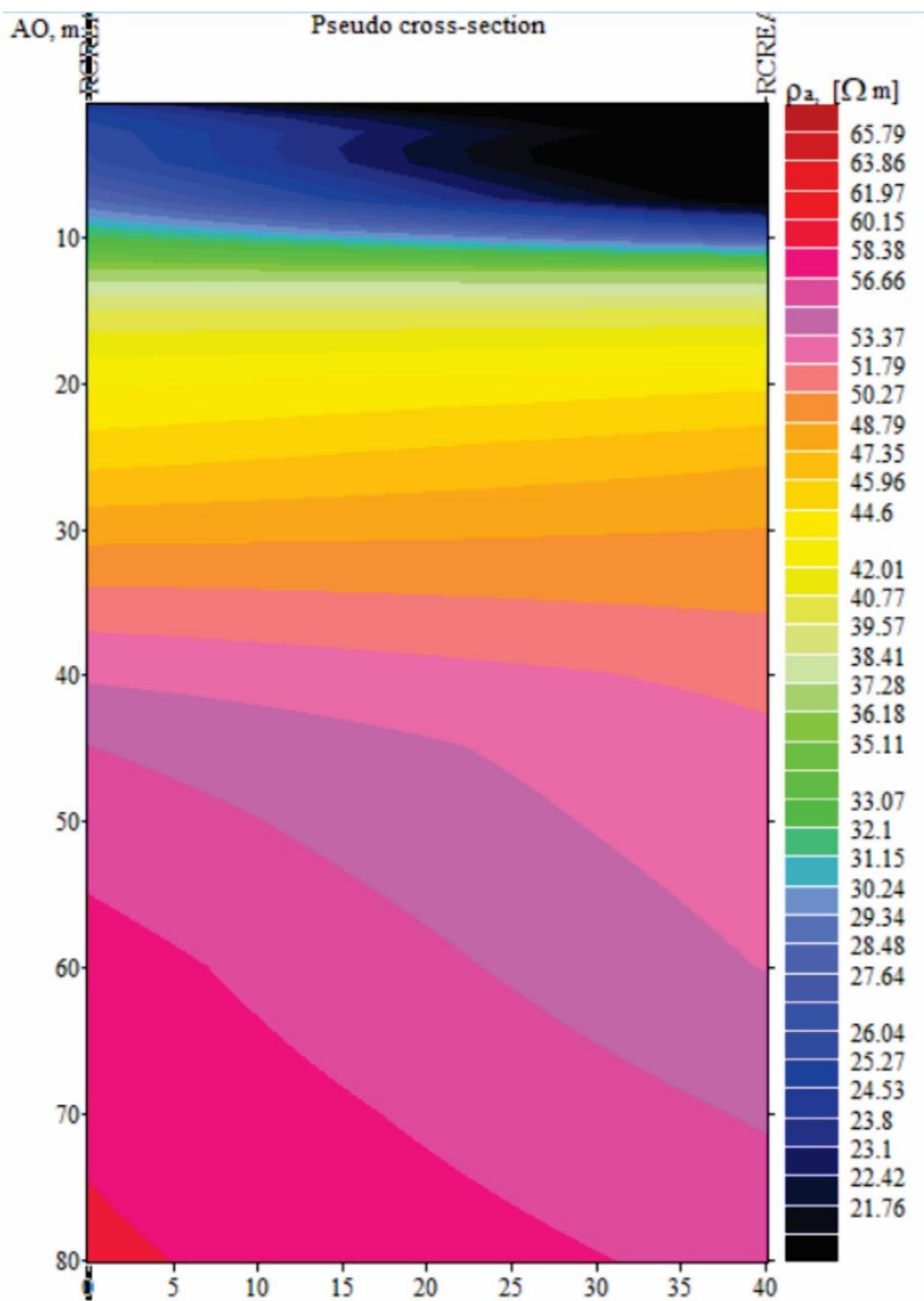


Ilustración 120: Pseudosección RCREA obtenido por los sondeos eléctricos verticales RCREA1 y RCREA2.

5.3.2 Sondeo Eléctrico Vertical RHOVI

Para el Sondeo eléctrico vertical RHOVI1 se procesa utilizando para la interpretación de sondeos de resistividad, utilizando los datos de campo se importaron al programa creando una curva de campo, al crear una interpretación teórica se compara las dos con el objetivo de que las discrepancias sean las menores posibles, en este caso tiene un error de 5.52%, al crear curvas teóricas permite construir capas a partir de la resistividad siguiendo el cambio de la curva a partir de método numéricos desarrollado por el programa conocido como comparaciones sucesivas.

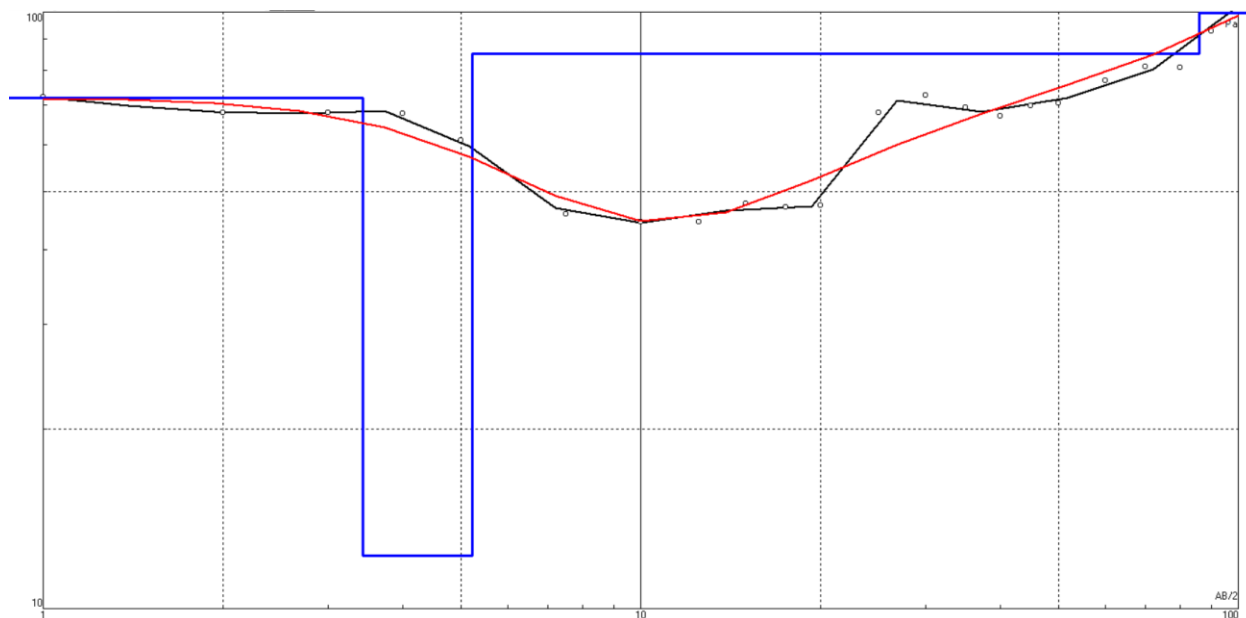


Ilustración 121: Se observa la curva con los datos obtenidos en campo de color negro en contra de la curva teórica obtenida por el programa a partir de método numérico de color rojo y la escala de color azul con los espesores de las capas resistivas y así obtener una sección geoléctrica del subsuelo para RHOVI1.

Tabla 30: Tabla de resultado del procesamiento en el Software IP2Win (Lite) Versión 7.01.03 para el SEV RHOVI1 donde se muestran las capas resultantes según la curva teórica.

N	ρ	h	d	Alt
1	71.69	3.59	3.59	2248
2	11.48	2.215	5.805	2246
3	160.3	11.7	17.55	2234
4	27.57	20.4	37.93	2214
5	7238			

Tabla 31: Resultado del procesamiento en el Software IP2Win (Lite) Versión 7.01.03 para el SEV RHOVI1

Intervalo	Resistividad (Omh.m)	Espesor	Profundidad	Litología
1	71.69	3.59	0 – 3.59	Coluvión seco y suelo seco
2	11.48	2.215	3.59 – 5.805	Suelo saturado
3	160.3	11.7	5.805 – 17.55	Coluvión Seco
4	27.57	20.4	17.55 – 37.93	Coluvión Húmedo
5	7238		37.93 -	Roca caliza seca

Con una separación de 40 m con respecto a RHOVI1, RHOVI2 Se presenta la relación de entre la curva de campo con la curva teórica la cual tiene un error de 1.81%. dándole robustez al resultado.

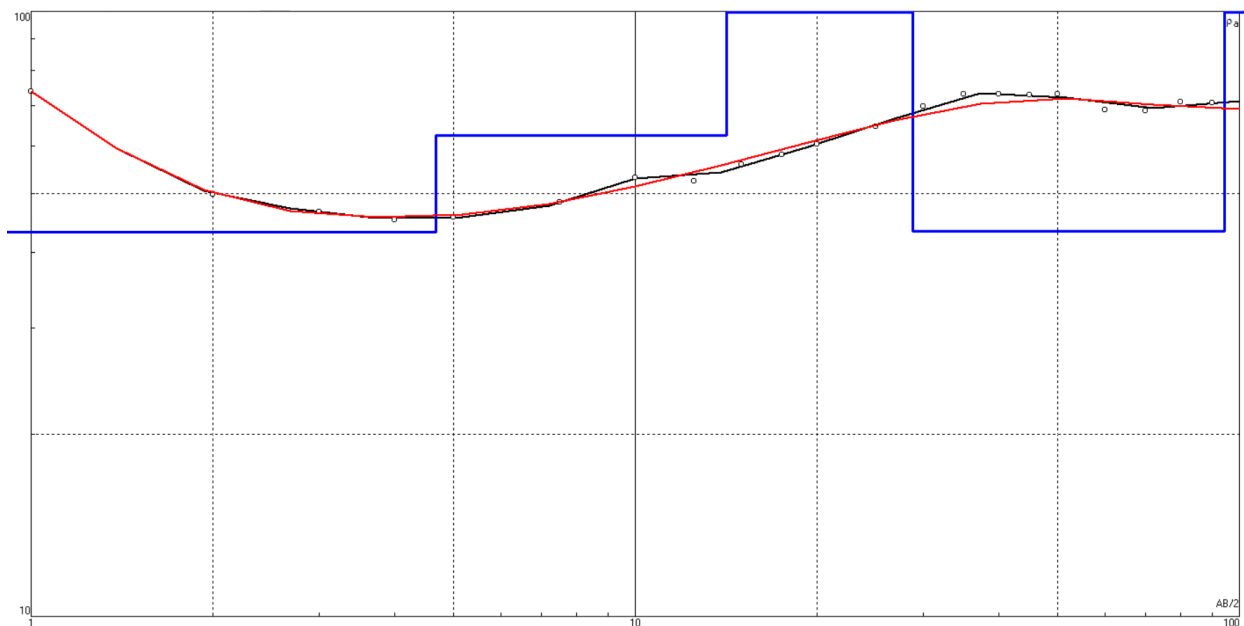


Ilustración 122: Curva teórica para RHOVI2.

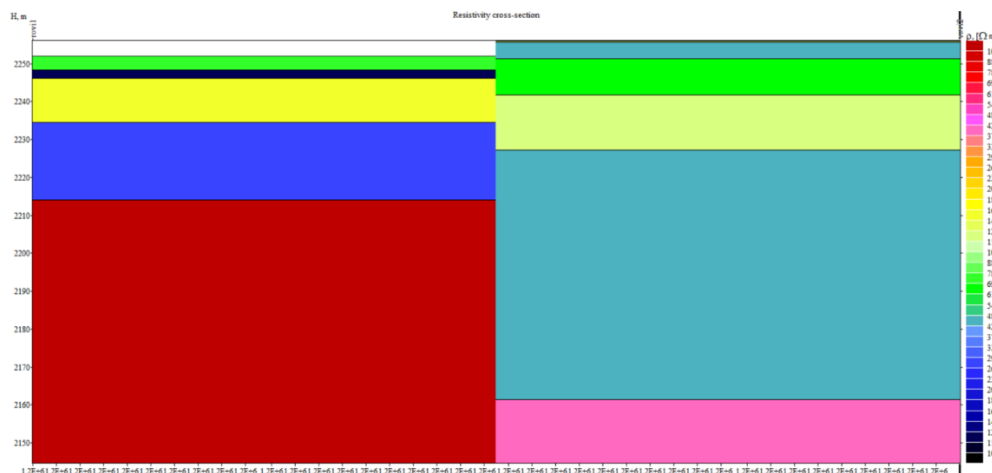
Tabla 32: Taba de resultado del procesamiento en el Software IP2Win (Lite) Versión 7.01.03 para el SEV RHOVI2

N	ρ	h	d	Alt
1	121.2	0.4024	0.4024	2256
2	43.2	4.283	4.685	2251
3	62.42	9.464	14.15	2242
4	116.3	14.67	28.82	2227
5	43.37	65.74	94.56	2161
6	385.4			

Tabla 33: Resultado del procesamiento en el Software IP2Win (Lite) Versión 7.01.03 para el SEV RHOVI2, basados en Cárdenas y Galvis (2011).

Intervalo	Resistividad (Omh.m)	Espesor	Profundidad	Litología
1	121.2	0.4024	0 – 0.4024	Suelo seco
2	43.2	4.283	0.4024 – 4.685	Suelo húmedo, posible concentración mayor en arcillas y limos
3	62.42	9.464	4.685 – 14.15	Suelo húmedo
4	116.3	14.67	14.15 – 28.82	Depósitos Coluviales
5	43.37	65.74	28.82 – 94.56	Calizas altamente fracturadas, saturadas y posible disolución de sales
6	385.4		94.56 - ...	Calizas fracturadas con agua

Una vez hecho los procesamientos de los dos sondeos eléctricos verticales (1D) se unen para obtener una sección en 2 dimensiones entre los puntos tomados, con el objetivo de construir un modelo del subsuelo sobre la zona de interés. La sección entre ROVI_1 y ROVI_2 se le ha llamado ROVI, para cada SEV se identifican capas según la curva teórica y las resistividades leídas en cada una, se unen las dos lecturas con el objetivo de construir la pseudosección que más se ajuste a ellas.



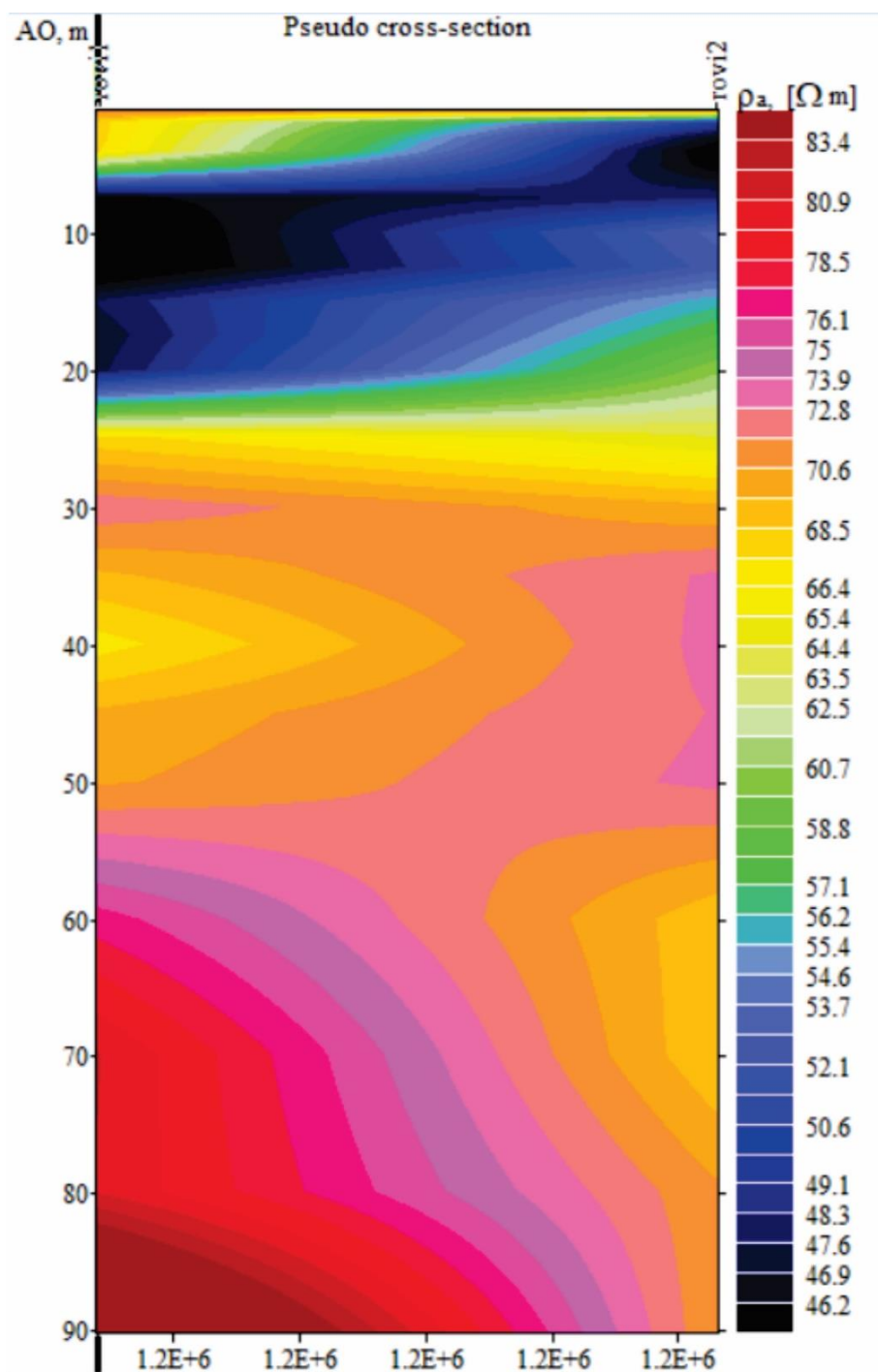


Ilustración 124: Pseudosección realizada por el programa IP2WIN a partir de las curvas teóricas de los sondeos eléctricos verticales RHOVI1 y RHOVI2.

5.3.3 Sonde Eléctrico Vertical RYERB

En la parte sur del municipio de Málaga (coordenadas Este 1148732, Norte 1231551, Con una elevación 2191), se realiza un Sondeo Eléctrico Vertical aprovechando que se observa en un afloramiento del lugar, la roca “in situ” para conocer directamente las resistividades de la misma. Una vez recolectados los datos en la zona se utiliza el software IP2Win versión 7.01.03 para procesar la información. Con los putos obtenidos en campo se logra una curva que al compararla con la curva teórica se obtienen las capas en el subsuelo definidas por su diferencia en resistividad debido al material que cada capa contenga. Durante el procesamiento se logra un error de 4.03%.

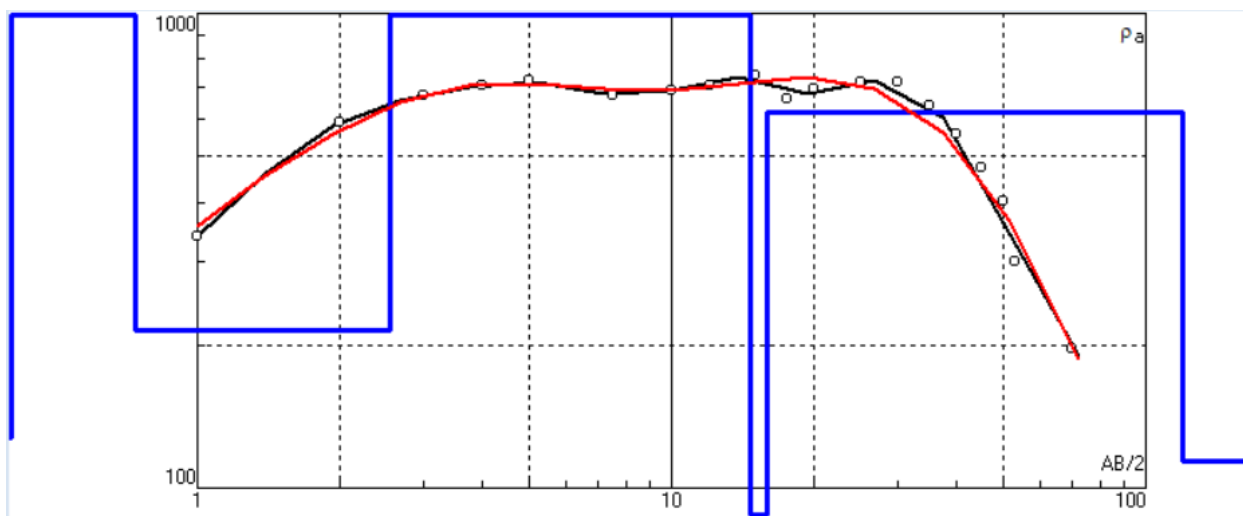


Ilustración 125: Curva obtenida con los datos recolectados en campo (negra), curva teórica obtenida según el mejor ajuste a la curva de puntos obtenidos en campo y división por capas resistivas obtenida a partir de la curva teórica (azul).

Tabla 34: Secuencias resistivas obtenidas al procesar en el software IP2Win versión 7.01.03 del sondeo eléctrico vertical en la zona de Yerba Buena – Laguna Seca en el municipio de San Jose de Miranda al sur del municipio de Málaga.

N	ρ	h	d	Alt
1	128	0.314	0.314	-0.3136
2	5013	0.429	0.743	-0.7429
3	215	1.8	2.54	-2.543
4	1386	12.1	14.7	-14.66
5	0.877	1.23	15.9	-15.89
6	619	104	120	-119.8
7	114			

Tabla 35: Resultado del procesamiento en el Software IP2Win (Lite) Versión 7.01.03 para el SEV RYERB.

Intervalo	Resistividad (Omh.m)	Espesor	Profundidad	Litología
1	128	0.314	0 – 0.314	Suelo Húmedo
2	5013	0.429	0.429 – 0.743	Suelo seco
3	215	1.8	0.743 – 2.54	Caliza Saturada
4	1386	12.1	2.54 – 14.7	Caliza húmeda
5	0.877	1.23	14.7 – 15.9	Concentración de agua o capa con arcilla con alto contenido de agua
6	619	104	15.9 – 120	Caliza saturada
7	114		120 - ...	Capa de arenisca húmeda

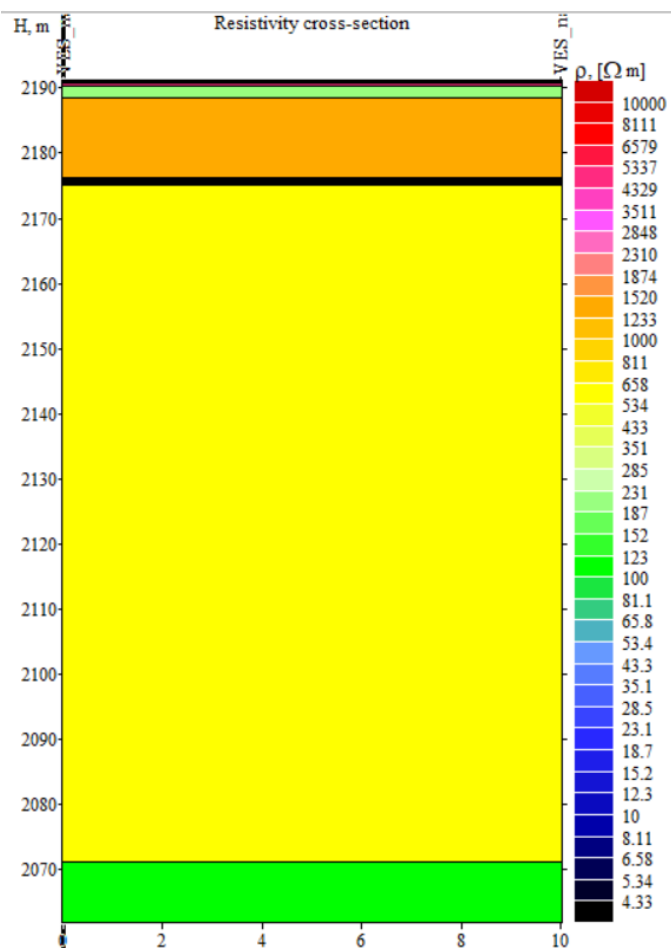


Ilustración 126: Sección resistiva del Sondeo Eléctrico Vertical realizado en la zona de Yerba Buena al Sur del Municipio de Málaga originado a partir del procesamiento de los datos obtenidos de campo en el Software IP2Win en versión 7.01.03 de la Universidad estatal de Moscú.

6. Análisis E Interpretación De Resultados

6.1 Modelo Geológico-Eléctrico

El modelo geológico-eléctrico parte de la interpretación de las resistividades aparentes leídas por el tomógrafo y los sondeos eléctricos verticales en campo y procesadas, en este caso invirtiendo datos utilizando el software EarthImager 2D para las tomografías e IP2Win para los sondeos eléctricos verticales. Una vez concluido el procesamiento para Tomografías y SEV`s, se tiene una sección resistiva invertida en donde se han identificado zonas en la que cada una tiene como característica valores de resistividades similares. Identificadas estas áreas, se compara con los estudios geo-eléctricos previamente hechos en un bloque de roca de la que se compone la zona de estudio, afloramientos visitados y la bibliografía consultada, para hacer equivalencias y obtener una interpretación más cercana a la realidad con la identificación de las zonas donde hay concentraciones de agua.

6.1.1 Interpretación de SEVs

6.1.1.1 Hacienda Oviedo

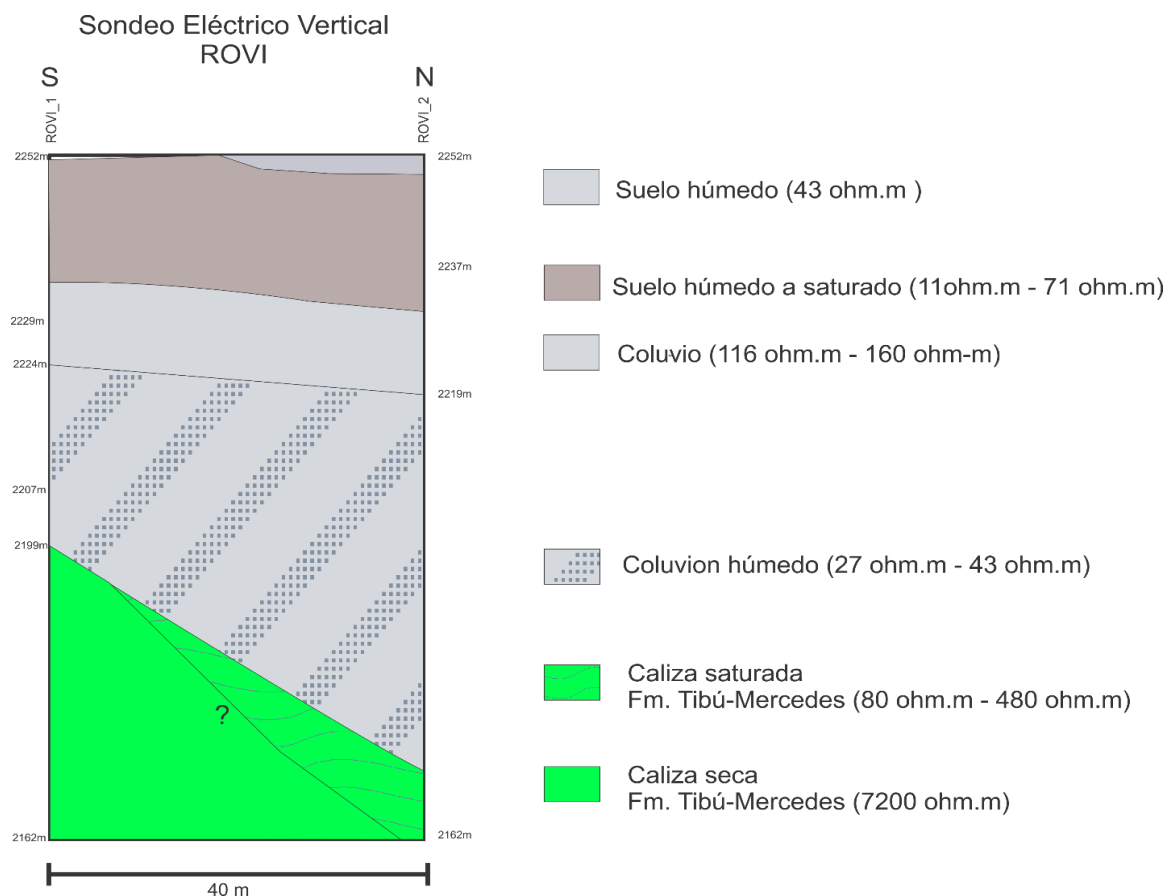


Ilustración 127: Perfil sugerido del subsuelo en el sector de la Hacienda El Oviedo.

El sondeo eléctrico vertical tiene dirección S-N con una extensión entre los sondeos de 40 metros y una profundidad de 90 metros. En total se agrupan 6 zonas basándose en la similitud de la resistividad por áreas, distribuyéndose desde la zona más superficial hacia profundidad. La zona 1 muestra suelos húmedos, con resistividades leídas de 43 ohm.m (López Hidalgo et al, 2012), cabe resaltar que en el momento de la toma en esta zona el

suelo estaba húmedo y había pozos con charcos de agua superficiales. La zona 2 se identifica como zona de suelo húmedo a seco con resistividades entre 62 ohm.m a 71 ohm.m. La zona 3 se identifica como coluvión seco con resistividades entre 116 ohm.m a 160 ohm.m. La zona 4 comprende resistividades entre 27 ohm.m a 43 ohm.m teniendo en cuenta la profundidad, la geomorfología y el rango de resistividades para coluviones se denomina como un coluvión húmedo. La zona 5 con resistividad de 7200 ohm. m corresponde a roca caliza seca. La zona 6 corresponde a roca caliza saturada con resistividades entre 80 ohm.m hasta 480 ohm.m (resistividades obtenidas al procesar RHOVI2).

Basándose en la información anterior las concentraciones de agua se encuentra en la capa 6, encontrándose a una profundidad de 94 metros con la mayor probabilidad de almacenar agua con las condiciones en el que el medio la puede ceder en comparación con capas supra yacentes (estas capas más superficiales por contener materiales de tamaño limos o arcillas no permiten una fácil movilidad del fluido a través de ellas) por lo tanto no son las de mayor interés.

6.1.1.2 Sector norte del casco urbano de Málaga (Cartilla Real)

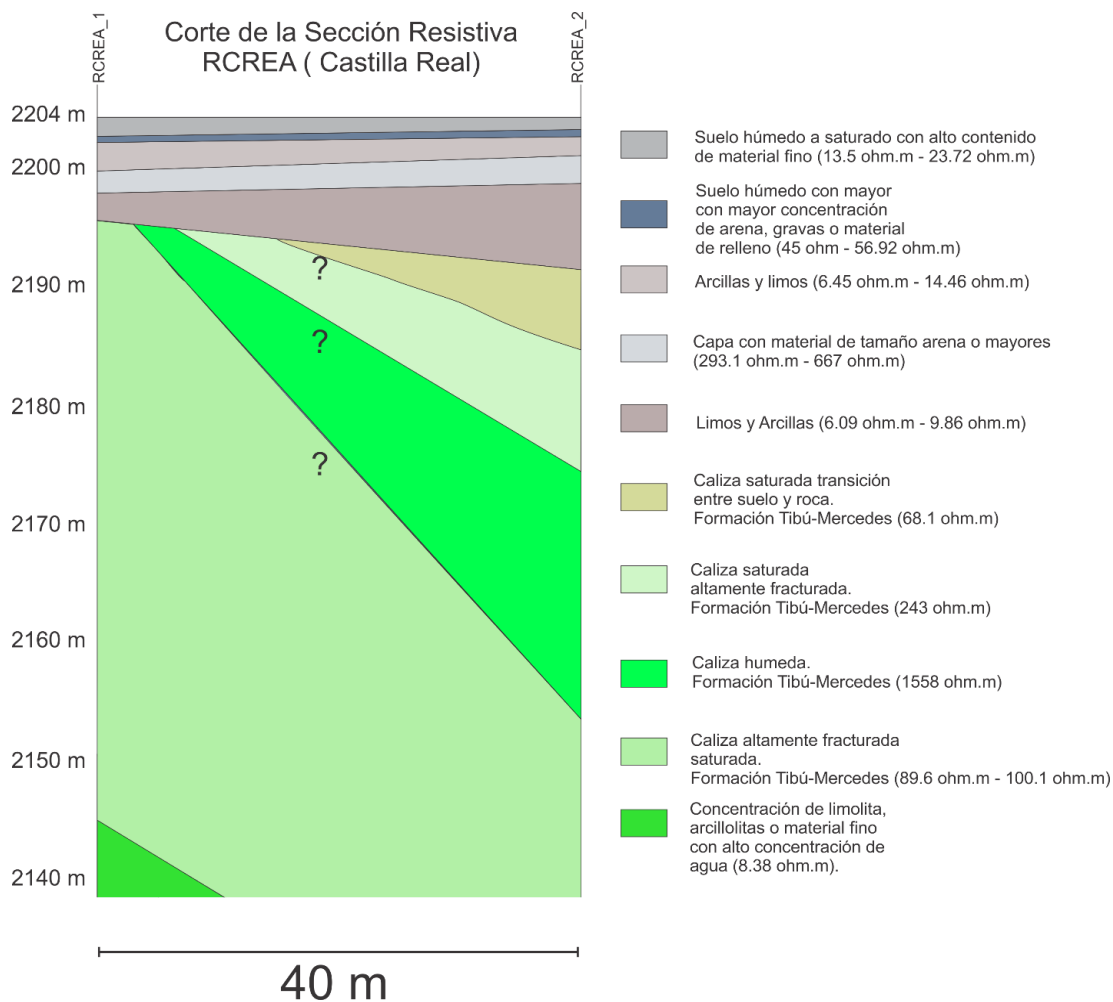


Ilustración 128: posible Columna litológica a partir de la interpretación de los sondeos eléctricos verticales RCREA_1 y RCREA_2.

Entre los sondeos eléctricos verticales RCREA_1 y RCREA_2 existen 40 metros de distancia en dirección Sur Suroeste a Norte Noreste, siendo el punto más cercano al centro del casco urbano de Málaga. Durante el procesamiento se encontraron 10 capas, que representan zonas que tiene una resistividad específica o similar que las diferencia de la demás.

De la capa superior a la inferior se encuentran, capas gráficamente de colores grises y tonos cafés, sobre esta zona posiblemente albergó lagos y humedales, pero el efecto Antrópico sobre esta área ha desaparecido las antiguas concentración de agua y las construcciones ha venido cubriendo el área en su expansión urbana, el lugar actualmente corresponde a una zona plana cercana en la parte norte a una colina de bajo relieve que soporta el Hospital Regional de García Rovira. La primera capa corresponde a suelo húmedo con resistividades entre 13.5 ohm.m a 23.72 ohm.m. La segunda capa (franja azul) la que indica concentración de material más grueso que las capas que la rodean a razón de que se obtuvo en el procesamiento de resistividad entre los 56.92 Ω .m a 45.1 Ω .m.

La diferencia entre las dos capas más superficiales se ha tomado como mayor o menor concentración de material fino, siendo el RCREA_2 el de mayor concentración de estos debido a su baja resistividad de 13.5 Ω .m en comparación a 23.72 Ω .m en RCREA_1 más cercano a la colina del HRGR y al centro del Municipio. Hasta la profundidad de 10 metros se han catalogado como depósitos aluviales básicamente de poco interés ya que se denomina como un acuitardo o incluso acuicludo (según arrojen futuros estudios de capacidades hidráulicas para éstas capas), debido a la concentración de material fino que puede albergar agua incluso hasta la saturación, pero es difícil que la libere por su baja circulación. Las tomas se realizaron en periodo seco de 3 semanas sin lluvias en el Municipio, con el objetivo de leer las condiciones en periodos donde no hay recarga, esto conlleva a decir que la humedad leída es propia del material.

Las capas inferiores corresponden a la Formación Tibú-Mercedes (la capa más inferior podría pertenecer a la parte más superficial de la Formación Rio Negro o a capas de shales, limolitas o arcillolitas de la Formación Tibú-Mercedes), se han dividido a razón que cada zona

varia en resistividad, esto por las características que pueden presentar para que permita diferentes concentraciones o flujo de agua a través de la roca. Las zonas con alta concentración de agua y que son de interés, tiene rangos de resistividades entre 89.6 ohm.m a 243 ohm.m, al sur donde está el SEV RCREA_1, la roca saturadas de interés se encontrar a partir de los 2198 metros de profundidad hasta los 2145 metros. Al norte con las lecturas del SEV RCREA_2 se divide en dos zonas de interés, una comienza a profundidad 2186 metros hasta 2176 metros, seguida por una capa de roca caliza húmeda y continua con la segunda zona de interés a 2154 metros. Debido a que son rocas calizas, los acuíferos o fluidos que la atraviesan generalmente se dan por fracturamiento de la roca o por disolución en sectores.

6.1.1.3 Sondeo Eléctrico Vertical Yerba Buena (RYERB)

Este sonde se encuentra en el sur de la cabecera municipal del Málaga, aunque la zona se encuentra en jurisdicción del municipio de San José Miranda, aún hace parte del casco Urbano de Málaga. El procedimiento se realiza después de una leve lluvia que ocurre al finalizar un periodo de sequía de varias semanas. Se ejecuta solo uno sondeo eléctrico vertical debido a la disponibilidad de espacio, con la intención de conocer la resistividad de la roca in situ, esta roca corresponde a biomicrita con altos contenidos de fósiles de bivalvos y fracturada característica del casco urbano de Málaga. En la zona esta roca es explotada por minas circundantes.

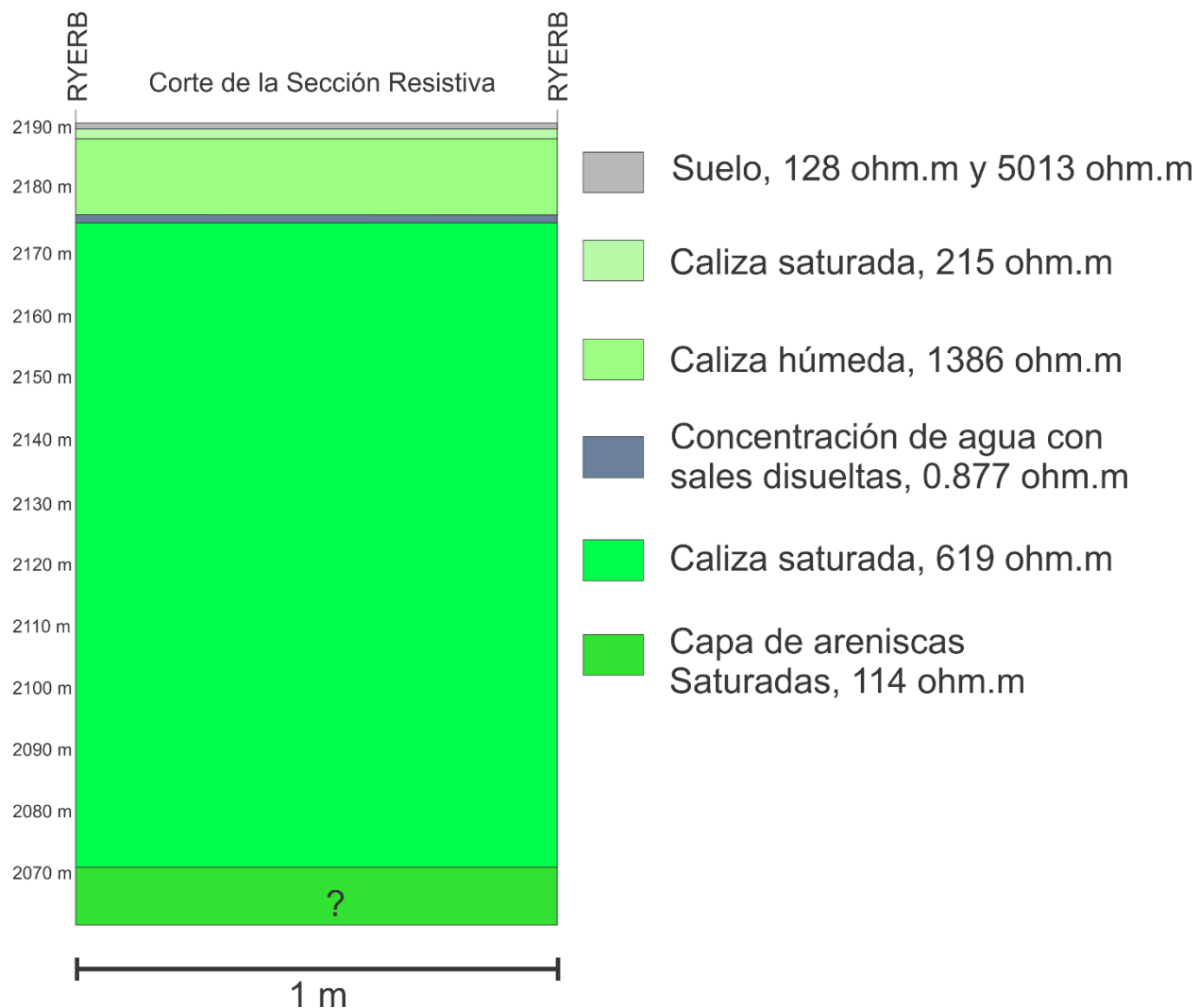


Ilustración 129: Sección geo-eléctrica de la zona Yerba Buena al sur del municipio de Málaga.

La primera zona desde la más superficial corresponde a Suelo húmedo y seco con resistividades entre $128 \Omega.m$ a $5013 \Omega.m$ respectivamente, y con espesor de 0.7 metros. La segunda sección en profundidad corresponde a Caliza saturada con resistividad de $215 \Omega.m$, esto se debe a una alta concentración de agua en fracturas y la lluvia ocurrida poco tiempo antes del sondeo. La tercera zona corresponde a Caliza húmeda con resistividad de $1386 \Omega.m$, esto en base en los

estudios hechos en laboratorio con muestras de roca caliza en condiciones húmedas, saturadas y secas.

La zona 4 corresponde a una concentración de agua o agua con sales disueltas de la caliza debido a la resistividad de $0.877 \Omega.m$ correspondiente a aguas con sales disueltas (las zonas o lugares que presentan estas resistividades son usualmente con alto contenido de sales disueltas, adicionalmente la roca caliza puede disolverse dependiendo del pH ácido del agua que tiene contacto con ella) con un espesor de 1.23 metros. La zona 5 corresponde a calizas saturadas con resistividad de 619 ohm.m a una altura de 2174 metros y espesor de 104 metros, convirtiéndola en la zona de mayor interés por tener mayores concentraciones de agua en un medio que permite su fácil circulación. La zona 6 con resistividad de 114 ohm.m indica cambio litológico a areniscas húmedas o con contenido de arcillas y limos, pertenecientes a la Formación Rio Negro o capas arenosas de la Formación Tibú-Mercedes, se pone aquí un interrogante debido a la profundidad de la interpretación que llega a 120 metros donde comienza esta capa y la lectura del sondeo eléctrico vertical llego a 70 metros, lo cual no es comparable.

6.1.2 Interpretación de tomografías

6.1.2.1 Línea 1 (Estadio)

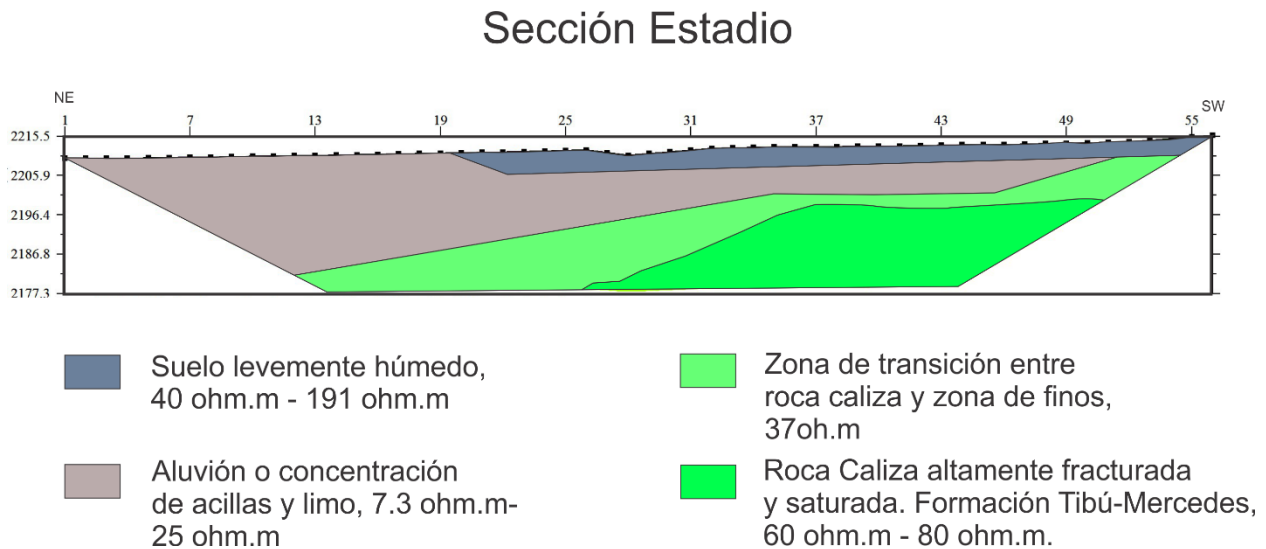


Ilustración 130: Rocas y suelos que componen la sección en la que fue hecha la tomografía Estadio.

En la sección se encuentran 4 zonas con resistividades similares, estas se identifican según la bibliografía consultada y el reconocimiento de campo realizado en el lugar, a suelos y rocas que se distribuyen de la siguiente manera:

La capa de color azul más superficial, corresponde a suelo levemente húmedo, a su vez a suelo residual según Rueda y Tavera (2016), con resistividades entre 191 ohm.m a 40 ohm.m. Esta zona no es de interés para prospección de agua por su leve espesor con un aproximado de 5 metros y por el material que lo compone compuesto por materia orgánica y partículas de tamaño limo y arcillas que no la hacen de interés, además de necesitar mucha energía para extraer su contenido hídrico.

Hacia el Noreste se encuentra una zona de aluvión con concentración de arcillas y limos. Según Rueda y Tavera (2016), corresponde en superficie a suelo residual y suelo Antropogénico (rellenos), según las tomografías realizadas, esta zona tiene resistividades entre 7 ohm.m a 20 ohm.m, por ende, de acuerdo al reconocimiento de campo y la bibliografía consultada corresponde a resistividades propias de suelos arcillosos y limosos, propios de un Aluvión o incluso un Coluvión; también podría corresponder a material originado de la roca *in situ* meteorizada y convertida en suelo, favorecido por la topografía de Málaga; su baja resistividad nos indica que esta zona tiene altos porcentajes de agua, pero al corresponder a un material fino, la extracción de agua se hace compleja, casi nula; por lo cual es una zona con bajo potencial para obtener agua ya que esta debe encontrarse en la micro porosidades propias de un acuitardo más que la de un acuífero, con baja conductividad hidráulica, haciendo difícil su Transmisividad.

La tercera zona denominada “Zona de transición entre roca caliza y zona de finos” corresponde a la zona donde se ubica, con resistividad esta entre los 20 ohm.m a 40 ohm.m, con un espesor de 2 metros y aumentando a medida que avanza hacia el centro del sinclinal. Por la composición de la roca de la zona según Julivert (1960) se estima a que está en la transición entre la roca Caliza de la Formación Tibú-Mercedes, además de la tomografía corresponde al buzamiento del flanco occidental del sinclinal Miranda-Málaga y la zona de suelos supra yacente, caracterizada por un alto grado de meteorización y relativo bajo grado de desarrollo de suelo o material orgánico debido a la profundidad. La zona al ser catalogada de esta manera también podría corresponder como un material con concentración de finos que hace que su resistividad disminuya, indicando que esta zona contenga agua que pueda liberar no tan fácilmente, causado por la tensión superficial y la presión capilar pero que tiene una mayor conductividad hidráulica que la capa que

la suprayace. También cabría la posibilidad de tener baja resistividad debido a la Falla de Málaga o la alta pendiente del flanco del sinclinal, aunque esto se encuentra en discusión, pero geográficamente se ubica en la zona donde se realiza esta tomografía.

Por último, se encuentra la zona denominada “Roca Caliza fracturada y saturada. Formación Tibú-Mercedes” se denomina así por la descripción de Julivert (1960) y Clavijo y Royero (2001), por los afloramientos ubicados al sur y al norte de Málaga y la resistividad obtenida entre 40 ohm.m a 100 ohm.m, esta roca esta fracturada por su ubicación en una zona tectónicamente compleja y en especial por encontrarse en un área donde está en discusión una posible falla o una diaclasamiento fuertemente marcado, que aumenta la posibilidad de contener altas concentraciones de agua, adicionando posibles concentraciones de sales disueltas obtenidas a través de su viaje desde la zona de recarga, la cual se estima por reconocimiento de campo, en las zonas Altas del sinclinal al Occidente de Málaga (flanco oeste del sinclinal) en zonas mucho más elevadas del lugar donde se realiza la tomografía.

6.1.2.2 Línea 2 (Aeropuerto)

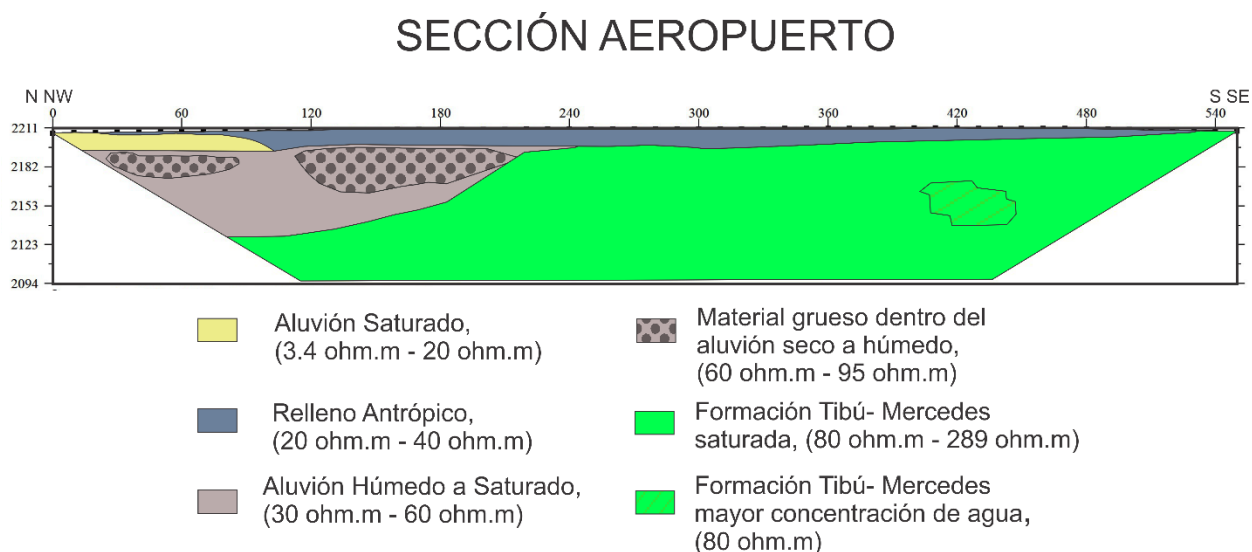


Ilustración 131: Suelo y rocas que compone la tomografía del Aeropuerto.

El área denominada “Aluvión Saturado” por efecto de la quebrada Los Molinos, los humedales que estuvieron en la zona y la baja resistividad (3.4 ohm.m – 20 ohm.m) registrada. A pesar de que indica concentraciones de agua no es de interés para este estudio ya el material donde se encuentra no permitiría una fácil movilidad del agua que contiene.

La zona denominada “Relleno Antrópico” muestra con una resistividad entre 20 ohm.m a 40 ohm.m, según Ruda y Tavera (2016) corresponde a un suelo antropogénico (alterado por el hombre), con el fin de nivelarlo para construir la pista del aeropuerto. En el extremo occidental es atravesado por una quebrada (el Molino), mostrando las resistividades más bajas de la tomografía de esta área con una lectura de 3.4 ohm.m y en el extremo oriental a la margen Norte se encuentra depósitos coluviales.

La zona correspondiente a la Formación Tibú-Mercedes según las resistividades obtenidas entre 80 ohm.m a 289 ohm.m obtenidas en campo y denominada de esta manera por la bibliografía consultada y los ensayos hechos en laboratorio sobre el bloque de caliza, en donde se obtienen valores de 100 a 600 ohm.m en condiciones saturadas, obteniendo como resultado roca caliza saturada, convirtiéndola en zona de interés. Esta área comienza a una profundidad de 15 metros. En la parte inferior del electrodo 220 se observa que tiene una fuerte inclinación, se debe al buzamiento del flanco del sinclinal en el lado oriental.

En la formación Tibú-Mercedes encontramos una zona denominada Burbuja Tibú-Mercedes, presenta una mayor concentración de agua debido al alto fracturamiento por donde transita el fluido en cavidades, debido a la disolución de la roca caliza. Encontrar estos valores de resistividad en esta zona es de importancia ya que indican características ideales para capas que soportan acuíferos. En la zona más oriental sobre el costado sur de la pista del aeropuerto se encontró un sumidero, adicionalmente en el escarpe oriental de Málaga bajo la zona donde fue construido el aeropuerto a una altitud de 2188 metros sobre el nivel del mar se ubicó un afloramiento de agua o manantial, comprobando así la ocurrencia de flujos de subterráneos en medios Karstificados.

La zona denominada “aluvión húmedo a saturado” con resistividad de 30 ohm.m a 60 ohm.m, debido a la topografía y al carácter estructural del sinclinal que permitió que el material estuviese ahí, aunque cabe la discusión si podría ser la meteorización de roca que compone la Formación Tibú-Mercedes o efecto de la quebrada Los Molinos que pasa sobre esta área. La idea que permite sostener que se compone por un aluvión es la formación de pequeños lagos y humedales que históricamente se estuvieron en la zona según relatos de

la comunidad, acumulando sedimentos de tamaños limos y arcillas en el eje del sinclinal. A pesar de denominarse como húmedo a saturado, tiene mayor resistividad que la capa supra yacente exactamente encima por donde está el material por donde pasa la quebrada.

Dentro de la zona “Aluvión Húmedo a Saturado” se observa un umbral de resistividad de 60 ohm.m a 95 ohm.m, se interpreta como relleno hecho por el hombre para construir la pista del aeropuerto, esta zona contiene materiales con un mayor tamaño de partículas, afectando la lectura del tomógrafo al no tener la misma concentración de agua que las zonas aledañas el cual permite que la resistividad aumente.

6.1.2.3 Línea 3 (Guácimo)

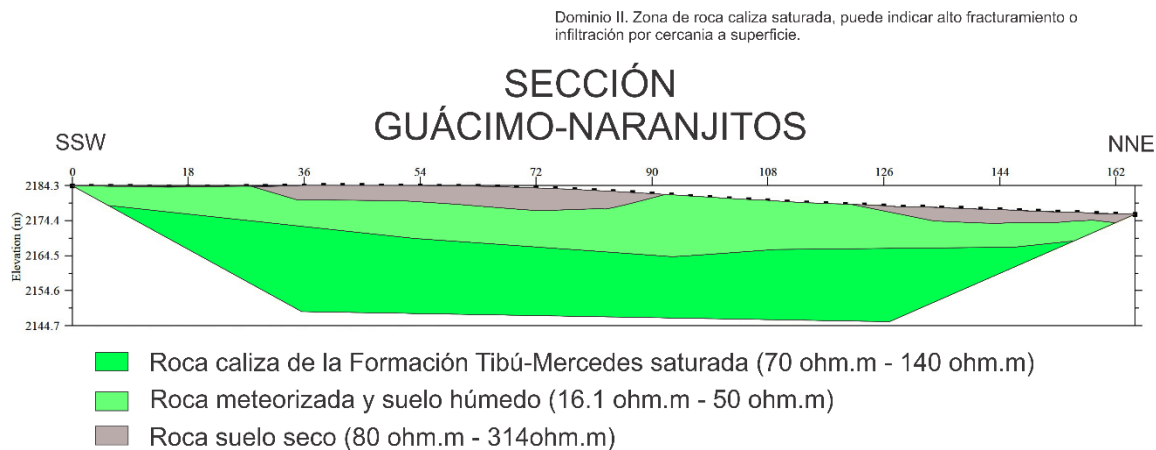


Ilustración 132: Rocas y suelos que componen la sección en la que fue hecha la tomografía denominada Guácimo.

La sección Guácimo, se conforman de tres secciones:

La zona más superficial se ha interpretado como “Suelo seco”, muestra resistividades entre 80 ohm.m a 314 ohm.m, resistividades propias precisamente de suelos secos.

La zona intermedia con resistividad entre 16.1 ohm.m y 50 ohm.m, se catalogó como zona meteorizada de antigua roca in situ y suelo húmedo, con espesor de 5 metros a 8 metros. No se considera de interés acuífero sino como un acuitardo.

La sección inferior corresponde a la roca caliza de la Formación Tibú-Mercedes saturada, tiene resistividades entre 70 ohm.m a 140 ohm.m, según la literatura consultada la roca del lugar pertenece a la Formación Tibú-Mercedes. Los resultados obtenidos en pruebas hechas en laboratorio con bloques de caliza biomicrita de la formación Tibú-Mercedes comparado con la resistividad obtenida en campo, permiten determinar que la zona corresponde a roca Caliza de la formación mencionada en condiciones saturadas. La roca caliza característica de la zona necesita condiciones de fracturamiento o karstificación para conformar un acuífero, que permita que las aguas subterráneas fluyan a través de ella. La zona comienza a los 13 metros de profundidad se considera una zona con potencial acuífero, con la presencia de agua y con el grado de fracturamiento o disolución que necesita para poder albergar el agua claramente evidenciada en la lectura de resistividades.

6.1.2.4 Línea 4 (Laguna Seca)

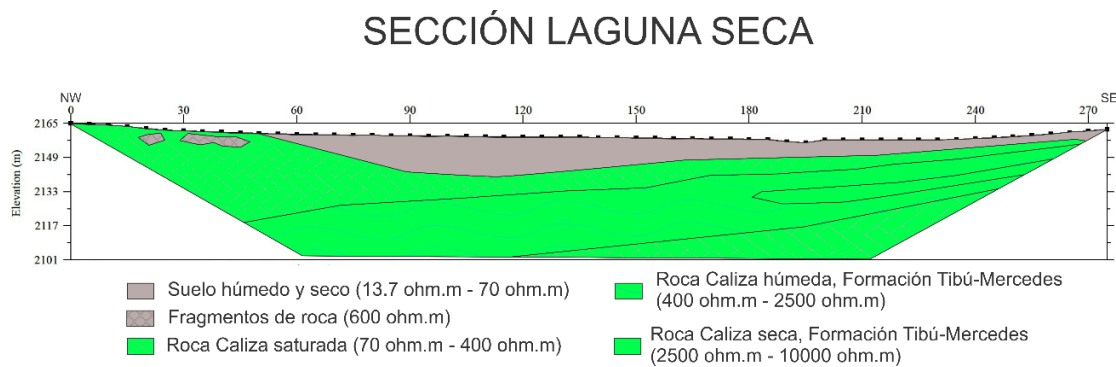


Ilustración 133: Rocas y suelos que componen la sección en la que fue hecha la tomografía denominada Laguna Seca.

Las secciones mostradas representan zonas con resistividades comunes dentro de ella pero que varían significativamente entre una y otras zonas.

La sección superior y más joven corresponde a “Suelos húmedos y secos” con resistividades entre 13.7 ohm.m a 70 ohm.m, en parte denominada de esta manera por la evidencia en campo al observar hoyos de 1.5 metros de profundo en el suelo con agua estancada en lo profundo de ellos bastante similar a lo que puede llegar a ser un aluvión o depósito lacustre en donde la resistividad leída en el lugar es similar en toda la zona, adicional la bibliografía consultada en Loke (2012) y Cárdenas y Galvis (2011).

La zona denominada “Fragmento de roca” con resistividad de 600 ohm.m, es pequeña y está rodeada de un área con menor resistividad, se ha clasificado como una zona de rocas o un fragmento de roca con saturación de agua. Dichos fragmentos de roca son de caliza o roca calcárea.

La zona que se ha denominado “Roca Caliza saturada” muestra resistividades entre 70 ohm.m a 400 ohm.m, que corresponde con las canteras de roca caliza circundantes y los datos obtenidos a partir de un bloque de roca caliza de la zona la cual se midió la resistividad en condiciones saturadas, obteniendo resultados con valores similares. Esta zona es de Gran interés como acuífero.

La zona denominada “Roca Caliza húmeda, Formación Tibú-Mercedes” tiene resistividades entre 400 ohm.m a 2500 ohm.m. Se clasificado de esta manera por la roca caliza circundante y los valores obtenidos en campo comparados con los valores obtenidos a partir de ensayos con un bloque de roca caliza en condiciones húmedas con valores similares. La zona no tiene tanto interés para este estudio, aunque al estar en condiciones húmedas no indica una saturación por lo tanto el agua concentrada puede deberse por acción capilar en caso de estar fracturada (o fisurada) o poca filtración en comparación con zonas aledañas.

La zona denominada “Roca Caliza seca, Formación Tibú-Mercedes” muestra resistividades entre 2500 ohm.m a mayores de 10000 ohm.m. Tales valores son propios en calizas secas, Loke (2012) y Auge (2008), también se observan valores de resistividades similares en ensayos con un bloque de roca caliza del área midiendo la resistividad en ella, en condiciones secas. La zona no es de interés por no registrar agua dentro de ella, esto puede deberse a que esta área es poco fracturada y no permite la infiltración de agua, no hace parte del acuífero.

6.1.2.5 Línea 5 (UIS1)

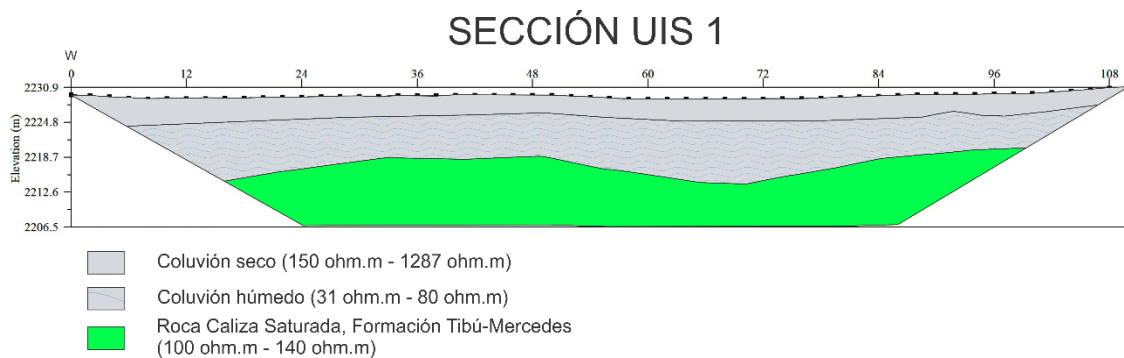


Ilustración 134: Rocas y suelos que componen la sección en la que fue hecha la tomografía denominada UIS 1.

Se divide en tres zonas, la zona más superficial corresponde a coluvión seco con resistividad entre 150 ohm.m a 1287 ohm.m se determina de esta manera por lo observado en campo y la medida de resistividad semejante al área superficial. Con profundidad promedio de 6 metros.

La zona intermedia se interpreta como un “coluvión húmedo” con resistividades entre 31 ohm.m a 80 ohm.m, tiene un espesor promedio de 9 metros. Presenta zonas con resistividades menores a 50 ohm.m por lo que indica saturación, aunque debido a la naturaleza de un coluvión compuesto por material heterogéneo incluyendo limos y arcillas indicaría que no tenga un comportamiento como el de un acuífero.

La zona inferior corresponde a la Formación Tibú-Mercedes y se ha interpretado “Roca Caliza Saturada, Formación Tibú-Mercedes” con resistividades entre 100 ohm.m a 140 ohm.m a partir de los 15 metros de profundidad. Se dedujo el tipo de roca debido a la bibliografía consultada en la Plancha 136 Málaga del Servicio Geológico Colombiano,

Julivert (1960), (López Hidalgo et al, 2012), Ward et al (1973), afloramientos al norte y al sur del Municipio que corroboraron la información. La baja resistividad obtenida comparada con la gama de resistividades de la roca caliza se infiere que tiene concentraciones de agua que fluye por el fracturamiento de la roca. Debido a que las pruebas se realizaron en periodos secos para obtener los datos en épocas en donde el agua de lluvia no recargara, se estima que la zona puede comportarse como un acuífero, depende de si es confinado o libre del efecto que tenga las dos capas suprayacentes registradas en la tomografía a lo largo de su extensión.

6.1.2.6 Línea 6 (UIS2)

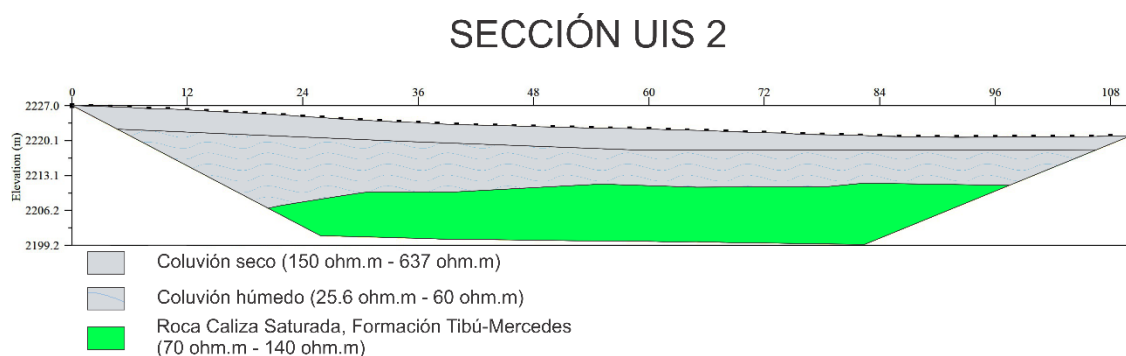


Ilustración 135: Rocas y suelos que componen la sección en la que fue hecha la tomografía denominada UIS 2.

De la misma manera que la tomografía denominada UIS 1 se ha dividido la tomografía UIS 2.

La sección más superficial se interpreta como un “Coluvión Seco” con resistividad entre 150 ohm.m a 637 ohm.m con un espesor promedio de 7 metros, caracterizada con este tipo de material por la evidencia vista en campo.

La sección intermedia se denominó “Coluvión húmedo” tiene zonas con resistividades inferiores a 50 ohm.m hasta 25.6 ohm.m lo que indica saturación. Con espesor de 9 metros en promedio. Debido a la concentración de material fino de tamaño limos y arcillas por la naturaleza del coluvión no sería apropiado denominar acuífero.

La zona inferior perteneciente a la Formación Tibú-Mercedes interpretada como “Roca Caliza Saturada, Formación Tibú-Mercedes” con resistividades entre 100 ohm.m a 140 ohm.m, comenzando a una profundidad promedio de 16 metros debido a que la tomografía se realiza en periodo de sequía se espera que los niveles de agua se encuentren en niveles bajos en comparación con periodos húmedos o de precipitación. Adicional la gama de resistividades en caliza indica en este caso que la roca está saturada por medio del fracturamiento debido a los factores tectónicos a los que se ha sometido, teniendo la capacidad de sostener un caudal a través del medio fracturado, indicando un acuífero.

7. Conclusiones

Los puntos de agua (afloramientos, aljibes y pozos profundos) encontrados en la zona urbana del municipio, corresponden en su mayoría a áreas topográficamente bajas, depósitos principalmente Aluviales compuestos de material fino, lo que impide que la infiltración de agua de escorrentía se haga de manera rápida, por lo que la variación de las masas de agua en estos puntos es lenta, lo que hace que el aprovechamiento de estas capas sea prácticamente nulo.

Existe una capa rocosa con capacidad de almacenamiento y transporte de agua (calizas fracturadas) entre los 50 y 70 metros de profundidad bajo el perímetro del casco urbano del municipio de Málaga infrayaciendo una capa superficial que se comporta como un acuitardo debido a su composición de mariales finos, ambas capas, se extiende desde el casco urbano hacia el norte del municipio, aumentando su espesor en la misma dirección.

Bajo el casco urbano del municipio de Málaga, se observa variaciones en las resistividades eléctricas que infieren una secuencia estratigráfica en la que el miembro de calizas fracturadas corresponde a la capa con mayor vocación acuífera.

La capa con vocación acuífera (caliza fracturada) posee diferentes niveles de profundidad, que varían según la ubicación con respecto al eje del sinclinal, así; entre más próximo al eje del sinclinal, más profunda es la ubicación de esta capa, llegando hasta los 70 metros y se hace más superficial a medida que se aleja del eje del sinclinal hacia el oriente u occidente y al sur.

El municipio de Málaga Santander, tiene posibilidades de captar Aguas para dotación del acueducto Municipal, con las Aguas Subterráneas que yacen bajo el casco Urbano y área perimetral a él, a través de pozos profundos en la Formación Tibú –Mercedes.

8. Recomendaciones.

Es necesario realizar una investigación estructural de la zona delimitada en el presente estudio, para confirmar la naturaleza de la infiltración de agua.

Se recomienda, un estudio estructural en el estadio Municipal para definir o explicar el origen de la geomorfología presente, ya sea por un fallamiento o por una convergencia del sinclinal, definiendo la génesis de este lugar, para dar claridad al origen de las aguas subterráneas de esa zona.

Se recomienda hacer un estudio de isotopía (deuterio y tritio) y de trazadores para determinar el origen del agua subterránea, su antigüedad y como mayor aporte, definir la zona de recarga del sistema hidrogeológico para el casco urbano del Municipio de Málaga.

Re-perforar los Pozos construidos hacia el año 1998 en la zona del estadio y en la parte Norte del casco urbano, para realizar ensayos de bombeo, de calidad del agua, y definir con ellos las propiedades hidráulicas del acuífero, para determinar las reservas y los volúmenes del agua subterránea disponible.

Referencias

- Allen R. G., Pereira L.S., Raes D. And Smith M., (2006). -Evapotranspiración Del Cultivo, Guía Para La Determinación De Los Requerimientos De Agua De Los Cultivos, Food And Agriculture Organization Of The United Nations.
- Auge, M., (2008). -Métodos Geoeléctricos Para La Prospección De Agua Subterránea, Universidad De Buenos Aires.
- Caballero V. Y Sierra H. (1991), -“Estratigrafía Del Cretácico En El Área De San Andrés Santander”, Universidad Industria De Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Calvetty Amboni, B. (1984). -Aplicación De Técnicas Geoeléctricas En El Estudio De Prefactibilidad Para La Construcción De Un Dique En El Angosto De Andalucía. Provincia De Catamarca. IX Congreso Geológico Argentino. Simposio De Geotecnia. Bariloche.
- Calvetty Amboni, B. (2004). -Métodos Eléctricos De Prospección. Fcaglp. Unlp. Inéd. La Plata.
- Calvetty Amboni, B. 2005. -Prospección Geoeléctrica Aplicada En Hidrogeología. Maestría En Evaluación Ambiental De Sistemas Hidrológicos. Unlp. Inéd. La Plata.
- Cooper M.A., Addison F.T., Alvarez M.C., Graham R.H., Hayward A.B., Howe S., Martinez J., Naar J., Peña R., Pulham A.J., Taborda A., (1995). -Basin Development And Tectonica History Of The Llanos Basin, Eastern Cordillera And Middle Magdalena Valley, Colombia. Aapg Bulletin, V. 79, No. 10 (October 1995), P. 1421-1443.
- Díaz, E. P. (2010). -Implementación Del Código Zondres2d Para La Modelación Directa E Inversa De Datos De Tomografías De Resistividad Eléctrica 2d. Facultad De Ingeniería Universidad Autónoma De México. Tesis Para Otorgar El Grado De Ingeniera Geofísica.
- Esquema De Ordenamiento Territorial Del Municipio De Málaga (Eot), 2015.

Estudio Nacional Del Agua, Ideam, 2010.

Fabre, A. (1981). -Dinámica De La Sedimentación Cretácica En La Región De La Sierra Nevada Del Cocuy (Cordillera Oriental). Proyecto Cretácico. Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas, (16) Capítulo Xix.; 1-20. Bogotá.

Folk, R.L. (1974). -Petrology Of Sedimentary Rocks. Hemphill Publishing Co., Austin, 170 P.

Friedman G. And Sanders J. (1978). -Principles Of Sedimentology.

Fundación Centro Internacional De Hidrogeología Subterránea, Área De Geofísica Aplicada (Iag, Ugr, Provença, 102, 6ª Planta 08029 Barcelona – España; Teléfono +34 93 363 54 80; E-Mail: Gerencia@Fcihs.Org; Www.Fcihs.Org), Tema 2. Prospección Eléctrica En Corriente Continua, 2013.

Guía Meteorológica Para El Balance Hídrico De América Del Sur, Unesco, 1982.

Dunham, R.J. (1962) Classification Of Carbonate Rocks According To Depositional Texture. American Association Of Petroleum Geologists, 1, 108-121.

Howell, Benjamin F. (1962). -Introducción A La Geofísica. Omega, Barcelona, 435 Págs.

Instituto Colombiano De Geología Y Minería (Ingeominas). -Las Aguas Subterráneas Un Enfoque Práctico (2011).

Julivert, M., (1960) -Geología De La Región Occidental De García Rovira. Boletín De Geología, Universidad Industrial De Santander, Numero 5, P. 5-32.

Lascano, E., Martino, L., Bonomo., N., Osella, A., Ratto, N., (2005). -Electrical And Gpr Joint Prospecting At The Palo Blanco Archaeological Site, Nw Argentina. A Case History, Geophysics, 71(6), 193-199.

- Llamas, R., (1988). -El Agua Subterránea Como Recurso Económico-Ecológico Y Como Agente Geológico. Discurso De Acceso A La Real Academia De Ciencias, Madrid 95pp.
- Lock M.H. (2012). -Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging survey (www.geotomosoft.com)
- López Hidalgo A. A., Loke M. H., Fanton G. O., Cara E., (2012). -Técnicas Prácticas Para Investigación De Resistividad En Dos Y Tres Dimensiones (Tomografía Eléctrica 2d Y 3d).Manilla, A. A. (2003). -Geofísica Aplicada En Los Proyectos Básicos De Ingeniería Civil. Publicación Técnica No. 229. Secretaria De Comunicaciones Y Transporte. Instituto Mexicano Del Transporte.
- Mariotte, E. (1866). -Tratedes Mouvements Des Eaux Et Des Autres Corps Fluids. E. Michalet. Paris.
- Martinez Gil, F.J. (1972). -Aspectos Históricos Y Evolución De Las Ideas Acerca De Las Aguas Subterráneas Desde Los Tiempos Más Remotos Hasta El Nacimiento De La Ciencia Hidrogeológica. [Http://Hidrologia.Usal.Es](http://Hidrologia.Usal.Es).
- Notestein, F., Hubman, C. And Bowler. J., (1994). -Geology Of The Barco Concession, Republic Of Colombia South America. Bulletin Geological Society Of America, 55 : 1165-1216. New York.
- Orellana, E. (1982). Prospección Geoeléctrica En Corriente Continua. 2 Ed. Ediciones Paraninfo S.A.
- Palissy, B. (1580). - Discours Admirable De La Nature Des Eaux Et Des Fontaines. Version Inlgesa: Univ. Illinois Press, 1957.
- Perrault, P. (1674). -De L'origine Des Fontaines. Pierre Le Petit Ed. Paris.
- Plan De Desarrollo Del Municipio 2016-2019 Málaga (En: [Http://Www.Malaga-Santander.Gov.Co/Index.Shtml](http://Www.Malaga-Santander.Gov.Co/Index.Shtml))

- Plata, J.L. (2000) -“Técnicas Convencionales De Geofísica De Superficie Aplicadas En Hidrogeología”. Actualidad De Las Técnicas Geofísicas Aplicadas En Hidrogeología. Ed. Igme. Pp. 21-32.
- Richards, H., 1968. -Cretaceous Section In Barco Area Of Northeaster Colombia. American Association Of Petroleum Geologists Bulletin, 52 (12): 2324-2326. Tulsa.
- Romero J.M., Clavijo J. (2001). – Mapa Geológico Generalizado Departamento De Santander.
- Rueda A. F., Tavera C. A., (2016). -Zonificación De La Susceptibilidad Relativa Por Movimientos En Masa Empleando El Método Matemático De Lógica Difusa En Un Área De 150 Km² Pertenecientes A La Plancha 136-I-B Escala 1:25.000. Universidad Industria De Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Salamanca M. A., (2017). -Caracterización Del Subsuelo Mediante Prospección Geofísica De Resistividades (Tomografía Eléctrica Y Sondeos Eléctricos Verticales Sev's) Con Fines Hidrogeológicos En La Sede De Málaga De La Universidad Industrial De Santander (Uis). Universidad Industrial De Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Samper, J. (2013-2014). -Historia De La Hidrología Del Suelo. Texto Extraído Y Editado De La Conferencia De Llamas (1988). [Ftp://Ceres.Udc.Es](ftp://Ceres.Udc.Es)
- Sánchez, F. J. (2011). -Conceptos Fundamentales De Hidrogeología. Universidad De Salamanca. (En: <Http://Hidrologia.Usal.Es>).
- Serrano J., (2003). -Caracterización Geofísica De Filtraciones De Agua En El Subsuelo. Tesis De Grado Universitat Polictencnica De Catalunya.

Sutton, F.A., 1946. -Geology Of Maracaibo Basin, Venezuela. American Association Petroleum Geologists Bulletin, 30 (10) : 1621-1741. Tulsa.

Tolman, C.F. (1937). -Ground Water. Mcgraw-Hill. 593 Pp.

United Nations Environment Programme (Unep). Chapter2-5 Freshwater (Agua Dulce, Versión En Español), 2002.

Universidad Nacional De La Plata. Introducción. (2012, March 26). Retrieved July 21, 2017, From Facultad De Ciencias Astronómicas Y Geofísicas Web Site: <Http://Catedras.Fcaglp.Unlp.Edu.Ar/Geofisica/Metodos-Electricos-De-Prospeccion/Teoria-1/Introduccion>.

Vargas, R., Arias, T., Jaramillo, L., Tellez, N., (1984). -Servicio Geológico Colombiano, Geología De La Plancha 136 Málaga.

Vargas, R., Arias, T., Jaramillo, L., Tellez, N., (1984). -Servicio Geológico Colombiano, Memorias Explicativas Geología Del Cuadrángulo I-13 Málaga, Geología Plancha 152 Soatá.

Ward, D.E., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz J., Restrepo, H., Gómez, E. (1973). - Geología De Los Cuadrantes H-12 Bucaramanga Y H-13 Pamplona, Departamento De Santander. Boletín Geológico V.Xxi, No. 1-3.