

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA SUBCUENCA MIRANDA DE LOS ESTADOS CARABOBO Y YARACUY, MEDIANTE EL ANÁLISIS DE IMÁGENES SATELITALES CON SIG E INTEGRACIÓN DE DATOS GEOFÍSICOS.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para optar al Título de Ingeniero Geofísico
Por las Br. Yanolieris Figuera y
Samantha Quijada

Caracas, mayo de 2021.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA
SUBCUENCA MIRANDA DE LOS ESTADOS CARABOBO Y
YARACUY, MEDIANTE EL ANÁLISIS DE IMÁGENES
SATELITALES CON SIG E INTEGRACIÓN DE DATOS
GEOFÍSICOS.**

TUTOR: ING. JANCKARLOS REYES

CO-TUTOR: ING. JOSÉ CAVADA

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para optar al Título de Ingeniero Geofísico
Por las Br. Yaniolieris Figuera y
Samantha Quijada

Caracas, mayo de 2021.

ACTA DE APROBACIÓN DE TESIS

Caracas, 27 de mayo de 2021

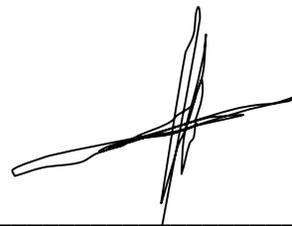
Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la **Br. Yaniolieris Y. Figuera M.**, titulado:

“Caracterización hidrogeológica de la Subcuenca Miranda de los estados Carabobo y Yaracuy, mediante el análisis de imágenes satelitales con SIG e integración de datos geofísicos”

consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducentes al título de Ingeniero Geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas del autor, lo declaran **APROBADO.**



Prof. Michael Schmitz
Jurado



Prof. Crisanto Silva Aguilera
Jurado



Prof. Janckarlos Reyes L.
Tutor Académico

ACTA DE APROBACIÓN DE TESIS

Caracas, 27 de mayo de 2021

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la **Br. Samantha D. Quijada N.**, titulado:

“Caracterización hidrogeológica de la Subcuenca Miranda de los estados Carabobo y Yaracuy, mediante el análisis de imágenes satelitales con SIG e integración de datos geofísicos”

consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducentes al título de Ingeniero Geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas del autor, lo declaran **APROBADO.**



Prof. Michael Schmitz
Jurado



Prof. Crisanto Silva Aguilera
Jurado



Prof. Janckarlos Reyes L.
Tutor Académico

DEDICATORIA

A la Yani de hace 10 años que estaba llena de ilusiones. Si se pudo

A mi madre, Yanira Morales, porque soy lo que soy gracias a ella, porque la amo demasiado y porque es el mejor ejemplo que puedo tener.

A mi padre, Alirio Figuera, porque su amor me ayuda a ser mejor.

A mis abuelos Erasmo y Luis, dos ángeles que me cuidan desde el cielo.

A la vida y al amor.

Yaniolieris Figuera

Primeramente, a Dios, por jamás dejarme sola y permitirme tener la oportunidad de
llegar a este momento.

A la memoria de mi abuelito Manuel Quijada, a quien amo con todo mi corazón, a ti
te dedico todo lo que he logrado en mi vida y todo lo que lograré, eres mi guía desde
lo más alto del cielo, sé que estás orgulloso de mí. Todo esto es gracias a ti.

A mi familia, mi madre Patricia Navarro, mi padre Manuel Quijada, mis hermanos
Manuel y Fabiana, que con su amor incondicional y apoyo me ayudaron a alcanzar
mis metas.

Samantha Quijada.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero agradecer a Dios todopoderoso, por demostrarme con cada situación que su tiempo es perfecto y que estamos en donde debemos estar.

A mis padres Alirio Figuera y Yanira Morales, porque sin ustedes no lo hubiese logrado, porque sus consejos y valores me hicieron creer en mí y en lo que puedo lograr con esfuerzo y dedicación. Gracias por su amor y por cada “si puedes mami”.

A mi hermana Sireilonay Figuera por ser la mejor amiga, gracias por ser mi bastoncito para siempre, por nunca decirme que no y por tu amor y apoyo incondicional.

A mi novio Carlos Medina, por creer en mí, apoyarme sin dudar, sostenerme, cuidarme y motivarme, porque mis logros son tuyos. Eres lo más bonito que me paso en la UCV.

A mi compañera de tesis Samantha Quijada por elegirme, por su confianza, por cada mensaje de motivación, pero sobre todo por su entrega y responsabilidad. Gracias por ser la mejor co-equiper del mundo.

A mi tutor Janckarlos Reyes y co-tutor José Cavada, dos grandes profesores que con generosidad, compromiso y valiosos consejos nos brindaron un gran aprendizaje e hicieron de este un increíble proyecto. Gracias por confiar en mí

A Manuel Alonso, Luis Contreras, Luis Guerrero, José Núñez y Jessica Pi, por ayudarnos durante la adquisición de los datos geofísicos, un trabajo arduo y de gran esfuerzo que sin ellos no hubiese sido posible. De igual forma, agradezco a Andrés Osorio, el IVACEA y la Hacienda La Concepción por todo el apoyo que nos brindaron.

A todos mis compañeros del “bunquer” por su amistad y por el mejor campo vivido.

A todos los profesores que con su sabiduría nos hicieron mejores, especialmente a los profes Inirida, Michael y Nuris por toda la asesoría que nos brindaron. Finalmente, quiero agradecer a mi ilustre Universidad Central de Venezuela por abrirme sus puertas y darme la oportunidad de crecer académica y personalmente.

Yaniolieris Figuera

AGRADECIMIENTOS

Me faltarán páginas para agradecer a las personas que se han involucrado en la realización de este trabajo, sin embargo, merecen reconocimiento especial mi madre Patricia Navarro y mi padre Manuel Quijada que con su esfuerzo, apoyo y dedicación me ayudaron a culminar mi carrera universitaria.

Al profesor Janckarlos Reyes y al profesor José Cavada por su desempeño como tutor y cotutor de este trabajo especial de grado, por transmitirnos sus valiosos conocimientos, su paciencia y motivación a lograr todo lo que nos propusimos, sin ustedes no estaría hoy en día en este momento tan especial para mí.

A mi compañera de tesis Yanielieris Figuera, por acompañarme en toda esta etapa, por escucharme, ayudarme y juntas llegar al momento en el que nos encontramos hoy con nuestro trabajo culminado.

Un reconocimiento especial a Andres Osorio, a IVACEA y Hacienda La Concepción por prestarnos su apoyo, por brindarnos un lugar donde estar y por su ayuda económica, sin ustedes esto no habría sido posible, infinitamente muy agradecida.

A Jessica Pi, José Nuñez, Manuel Alonso y Luis Guerrero, por su ayuda durante el proceso de adquisición sísmica y eléctrica, no me alcanzan las palabras para expresar mi gratitud hacia ustedes.

A todos mis amigos que estuvieron en todos mis años de carrera universitaria, por su amistad incondicional, por todos juntos vivir esta etapa como una de las mejores de mi vida. A mi casa de estudio, la ilustre Universidad Central de Venezuela, por abrirme sus puertas y enseñarme tanto.

Samantha Quijada.

Yaniolieris Figuera, Samantha Quijada

**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA
SUBCUENCA MIRANDA, ESTADOS CARABOBO Y YARACUY,
INTEGRANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
Y MÉTODOS GEOFÍSICOS.**

Tutor: Ing. Janckarlos Reyes. Co-tutor: José Cavada. Tesis, Caracas UCV.

Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2020, p. 297.

Palabras claves: hidrogeología, acuíferos, SIG, ADMC, AHP, sondeos eléctricos verticales, refracciones sísmicas, gravimetría, morfometría, hipsometría.

Resumen: La subcuenca hidrográfica de Miranda se ubica al noroeste del estado Carabobo, en el límite con el estado Yaracuy, ocupando parte de los municipios Miranda y Nirgua. En las últimas décadas ha venido presentando una disminución en la extracción, suministro y disponibilidad de agua potable, por lo que surge la importancia de buscar alternativas que puedan solventar la falta de recursos hídricos y que además ofrezcan una localización efectiva de aguas subterráneas. Es por ello, que el objetivo principal de este estudio fue el caracterizar los sistemas acuíferos de la subcuenca hidrográfica de Miranda, mediante el manejo de imágenes satelitales, Sistemas de Información Geográfica (SIG) e integración de estudios geofísicos. Para esto, inicialmente se generó un mapa de zonas potenciales para la exploración de acuíferos mediante la aplicación de SIG y la evaluación multicriterio de imágenes satelitales (ADMC) en conjunto con el proceso de análisis jerárquico (PAJ). Posteriormente, se realizó una adquisición geofísica de métodos eléctricos y sísmicos, con el fin de identificar las zonas potenciales para la explotación de sistemas acuíferos mediante el análisis integrado de SEV, refracciones sísmicas y SIG. Además, se adquirieron datos gravimétricos, que se procesaron e interpretaron para generar un modelo estructural del subsuelo, con el fin de definir la geometría de la cuenca e integrar los resultados de sondeos eléctricos, sísmica de refracción y geología disponible. Finalmente, se creó una base de datos geoespacial que reunió la información satelital y geofísica adquirida en el estudio. Se determinó que la subcuenca se encuentra en su fase de vejez y es propensa a sufrir inundaciones por precipitaciones intensas. Además, se identificó mediante la integración geofísica y SIG que las zonas con alto potencial acuífero se ubican hacia el noreste, noroeste y suroeste de la zona aluvional.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Localización del área de estudio	5
1.4 Justificación.....	7
1.5 Antecedentes.....	8
1.5.1 Teledetección, SIG e hidrogeología.....	8
1.5.2 Estudios geofísicos	10
1.5.3 Estudios geológicos	11
CAPÍTULO II.....	13
MARCO GEOLÓGICO	13
2.1 Sistema montañoso de la Cordillera de la Costa (CdC).....	13
2.1.1 División geográfica de la Cordillera de la Costa	17
2.2 Estratigrafía.....	18
2.3 Geología estructural	20
2.3.1 Geología estructural de la subcuenca de Miranda	22
2.4 Litología.....	23
2.4.1 Aluviones	23
2.4.2 Complejo San Julián	24

	Página
2.4.3 Fase Nirgua (Complejo la Costa).....	24
2.4.4 Esquistos Las Mercedes.....	25
CAPÍTULO III.....	26
ASPECTOS CLIMÁTICOS Y AMBIENTALES	26
3.1 Aspectos climáticos de Venezuela	26
3.1.1 Clima.....	26
3.1.2 Relieve.....	27
3.1.3 Hidrografía.....	29
3.1.4 Vegetación	29
3.2 Aspectos climáticos de la subcuenca de Miranda	30
3.2.1 Clima.....	30
3.2.2 Relieve.....	31
3.2.3 Hidrografía.....	32
3.2.4 Vegetación	34
CAPÍTULO IV	36
MARCO TEÓRICO	36
4.1 Aguas subterráneas.....	36
4.2 Ciclo hidrológico.....	36
4.2.1 Precipitación, evaporación, escurrimiento superficial y subterráneo ...	37
4.3 Acuífero.....	37
4.4 Tipos de acuífero.....	38
4.4.1 Según las características litológicas o tipo de porosidad.....	38
4.4.2 Según la presión hidrostática	39

	Página
4.5 Formaciones geológicas según su hidrogeología.....	42
4.5.1 Acuífero	42
4.5.2 Acuicludo.....	42
4.5.3 Acuitardo	42
4.5.4 Acuífugo.	42
4.6 Características hidrogeológicas de un acuífero.....	43
4.7 Depósitos aluviales.....	44
4.7.1 Espesor de los limos arcillosos superficiales	44
4.7.2 Profundidad de la capa acuífera.....	44
4.7.3 Calidad de los aluviones	45
4.8 Recarga natural.....	45
4.9 Descarga natural.....	46
4.10 Nivel freático y nivel piezométrico.....	46
4.11 Morfometría e hipsometría.....	46
4.11.1 Curva hipsométrica	51
4.12 Sistema de Información Geográfica (SIG).....	51
4.12.1 Base de datos geoespacial.....	52
4.12.2 Sistema de información geográfica para búsqueda de aguas.....	52
4.13 Percepción remota o teledetección espacial (TE)	53
4.14 Los sistemas de percepción remota o teledetección.....	53
4.14.1 Satélites artificiales	53
4.14.2 Resoluciones en percepción remota.....	54
4.15 Proceso de percepción remota.....	55

	Página
4.16 Principios básicos de la percepción remota	56
4.17 Fuentes de energía en percepción remota	58
4.18 Energía incidente y atmósfera de la Tierra	59
4.19 Reflectancia espectral (firmas espectrales)	60
4.20 Sensores remotos.....	61
4.21 Tipos de sensores (fuentes de energía).....	61
4.21.1 Sensores pasivos (ópticos).....	61
4.21.2 Sensores activos (radar)	62
4.22 Misión Sentinel-2	62
4.23 Satélite ALOS PALSAR	64
4.24 Modelo Digital de Elevación (MDE).....	64
4.25 Análisis de Decisiones Multi-Criterio (ADMC)	65
4.26 Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ)	66
4.27 Comparaciones pareadas de PAJ	66
4.28 Matriz de comparaciones pareadas	67
4.29 Procedimiento para sintetizar juicios	68
4.30 Razón de consistencia (RC)	68
4.31 Evaluación de los recursos de agua subterránea utilizando SIG y ADMC..	69
4.32 La geofísica en estudios de agua subterránea	70
4.33 Métodos eléctricos	70
4.34 Resistividad eléctrica	70
4.35 Resistividad de las rocas	71
4.36 Resistividad de las aguas naturales	72

	Página
4.37 Sondeos eléctricos verticales.....	73
4.38 Distancias de electrodos de corriente.....	74
4.39 Parámetros de Dar Zarrouk	75
4.40 Polígonos de Thiessen.....	76
4.41 Métodos sísmicos	76
4.42 Ondas sísmicas.....	77
4.43 Método de refracción sísmica	78
4.44 Velocidad en función de la temperatura, salinidad del agua y profundidad	79
4.45 Refracción sísmica para la caracterización de la estructura de un acuífero y su contenido de humedad.....	79
4.46 Métodos gravimétricos.....	80
4.47 Gravedad teórica	80
4.48 Gravedad de la Tierra.....	81
4.49 Medidas de la gravedad.....	81
4.50 Variaciones de la gravedad con la altura.....	81
4.50.1 Corrección de aire libre.....	82
4.50.2 Corrección de Bouguer	82
4.50.3 Corrección topográfica	82
4.51 Anomalías gravimétricas.....	82
4.51.1 Anomalía de aire libre.....	83
4.51.2 Anomalía de Bouguer	83
4.51.3 Anomalía regional.....	83
4.51.4 Anomalía residual	83

	Página
4.52 Separación regional-residual	84
4.52.1 Filtro Pasabanda.....	84
4.52.2 Filtro Butterworth	84
4.52.3 Continuación hacia arriba	84
4.52.4 Filtro Gaussiano regional/residual	85
4.52.5 Continuación analítica del campo.....	85
4.53 Análisis espectral	85
4.54 Deconvolución de Euler	86
4.55 Modelado gravimétrico	86
CAPÍTULO V.....	87
MARCO METODOLÓGICO.....	87
5.1 Metodología de pre-adquisición.....	87
5.1.1 Recopilación y revisión de información previa disponible	87
5.1.2 Morfometría e hipsometría	88
5.1.3 Delimitación de la subcuenca hidrográfica de Miranda	90
5.1.4 Elaboración de mapas temáticos.....	90
5.1.5 Mapa de potencial acuífero.....	107
5.2 Metodología de adquisición	110
5.2.1 Métodos eléctricos	110
5.2.2 Métodos sísmicos.....	113
5.2.3 Métodos gravimétricos	116
5.3 Estadística de los datos geofísicos	119
5.4 Metodología de procesamiento	119

	Página
5.4.1	Métodos eléctricos 120
5.4.2	Métodos sísmicos..... 121
5.4.3	Mapas elaborados a partir del procesamiento de datos sísmicos y eléctricos.....123
5.4.4	Cortes geoelectricos y columnas estratigráficas 129
5.4.5	Métodos gravimétricos 129
5.4.6	Modelado 3D de la topografía con integración de datos de pozo y nivel freático.....135
CAPÍTULO VI 137	
ANÁLISIS Y RESULTADOS 137	
6.1	Morfometría e hipsometría de la cuenca 137
6.2	Mapa de potencial acuífero 140
6.3	Métodos eléctricos 142
6.3.1	Control estadístico del procesamiento de los sondeos eléctricos verticales.....143
6.3.2	Resistividades aparentes de los sondeos eléctricos verticales 147
6.3.3	Mapa de polígonos de Thiessen..... 148
6.3.4	Resistividad óptima..... 151
6.3.5	Mapa de conductancia longitudinal 152
6.4	Métodos sísmicos 154
6.4.1	Control estadístico para refracciones sísmicas 155
6.4.2	Inversión de datos de refracciones sísmicas 161
6.4.3	Mapas de velocidad de la onda P..... 162
6.4.4	Mapa de nivel freático 166

	Página
6.5 Integración de métodos eléctricos y sísmicos	167
6.6 Clasificación de acuíferos propuestos según su uso	198
6.7 Métodos gravimétricos.....	201
6.7.1 Control estadístico para datos gravimétricos	201
6.7.2 Mapas gravimétricos.....	202
6.7.3 Análisis espectral	208
6.7.4 Análisis de profundidad a través de la deconvolución de Euler	210
6.7.5 Modelado 2D geológico.....	211
6.7.6 Modelado topográfico 3D con integración de datos de pozo y nivel freático.....	216
6.8 Base de datos geoespacial	220
CAPÍTULO VII	222
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	222
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	228
APÉNDICE A.....	242
Imágenes y tablas que complementan el capítulo II, correspondiente al marco geológico.....	242
APÉNDICE B	248
Imágenes y tablas que complementan el capítulo V, correspondiente al marco metodológico.....	248
APÉNDICE C	260
Imágenes y tablas complementarias de los resultados obtenidos a partir de métodos eléctricos correspondientes al capítulo V.....	260
APÉNDICE D.....	270

	Página
Imágenes y tablas complementarias de los resultados obtenidos a partir de métodos sísmicos correspondientes al capítulo V.	270
APÉNDICE E	280
Imágenes y tablas complementarias de los resultados obtenidos a partir de métodos gravimétricos correspondientes al capítulo VI.....	280

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1 Mapa de localización del área de estudio.....	6
Figura 2.1 Ubicación regional de la Cordillera de la Costa.....	13
Figura 2.2 Mapa geológico simplificado de la zona central de la Cordillera de la Costa. El recuadro rojo representa el área de estudio.	16
Figura 2.3 División geográfica de Venezuela norcentral con respecto a la Cordillera de la Costa. El recuadro rojo representa la zona de estudio..	18
Figura 2.4 Mapa neotectónico geológico norcentral de Venezuela. El recuadro rojo representa el área de estudio.	19
Figura 2.5 Corte geológico de norte-sur, que muestra las principales estructuras y sistemas de fallas predominantes en el ramal interior de La Cordillera de la Costa... ..	22
Figura 2.6 Mapa geológico y estructural de la subcuenca hidrográfica de Miranda, Edo. Carabobo y Yaracuy.	23
Figura 3.1 Distribución (1961-1990) de los tipos climáticos según Thornthwaite.....	26
Figura 3.2 Mapa de precipitación media anual de Venezuela. Coordenadas UTM WGS 1984.....	27
Figura 3.3 Mapa topográfico de Venezuela.....	28
Figura 3.4 Mapa de drenaje de Venezuela.....	29
Figura 3.5 Mapa de vegetación de Venezuela.	30
Figura 3.6 Mapa de precipitación de la subcuenca hidrográfica de Miranda. Edo. Carabobo y Yaracuy.	31
Figura 3.7 Mapa topográfico de la subcuenca hidrográfica de Miranda. Edo. Carabobo y Yaracuy..	32
Figura 3.8 Zona que abarca la Cuenca alta del río San Carlos.	33
Figura 3.9 Mapa de drenaje de la subcuenca hidrográfica de Miranda. Edo. Carabobo y Yaracuy..	34
Figura 3.10 Mapa de vegetación de la subcuenca hidrográfica de Miranda. edo. Carabobo y Yaracuy.	35

	Página
Figura 4.1 Representación del ciclo hidrológico.	36
Figura 4.2 Acuífero.	37
Figura 4.3 Tipos de acuíferos según las características litológicas. Sistema Integrado de Información del Agua.....	39
Figura 4.4 Tipos de acuíferos según las presiones hidrostáticas.....	41
Figura 4.5 Esquema de acuíferos confinados y no confinados.....	41
Figura 4.6 Diferencia entre nivel piezométrico y nivel freático.	46
Figura 4.7 Proceso de la percepción remota.	56
Figura 4.8 Rangos del espectro electromagnético.	57
Figura 4.9 Partes de una onda.....	58
Figura 4.10 Factores que afectan la radiación.....	60
Figura 4.11 Firma espectral.....	61
Figura 4.12 Sensor pasivo, de acuerdo al origen de la fuente de radiación.	61
Figura 4.13 Sensor activo, de acuerdo al origen de la fuente de radiación.....	62
Figura 4.14 Gráfico de la distribución de las bandas de la Misión Sentinel 2, según la longitud y tipo de onda.....	63
Figura 4.15 Proceso de realización de un ADCMC.....	65
Figura 4.16 Dispositivo electródico tipo Schlumberger.	73
Figura 4.17 Dispositivo electródico tipo Wenner.....	74
Figura 4.18 Parámetros de Dar Zarrouk.....	75
Figura 4.19 Sísmica de refracción.....	79
Figura 5.1 Representación esquemática de la metodología general de trabajo.	87
Figura 5.2 Ubicación de los pozos productores de agua en la zona de estudio.	88
Figura 5.3 Esquema con la metodología para obtener la morfometría de la cuenca. .	89
Figura 5.4 Metodología general aplicada durante la elaboración de los mapas temáticos.	91
Figura 5.5 Metodología para elaborar la capa de la red de drenajes.....	92
Figura 5.6 Mapa correspondiente a la red de drenajes (orden 2, afluentes tipos ríos).	93

	Página
Figura 5.7 Metodología para obtener el mapa de la densidad de drenajes.	95
Figura 5.8 Mapa correspondiente a la densidad de drenajes.....	96
Figura 5.9 Mapa de densidad de lineamientos.....	99
Figura 5.10 Metodología para realizar la capa correspondiente al mapa de permeabilidad de las rocas.....	100
Figura 5.11 Mapa de permeabilidad de las rocas.....	101
Figura 5.12 Metodología para obtener la capa correspondiente al mapa de pendientes del terreno.	102
Figura 5.13 Mapa de pendientes del terreno en grados	103
Figura 5.14 Metodología para elaborar la capa correspondiente al mapa de precipitación.....	104
Figura 5.15 Mapa de precipitación (desde el 2011 hasta el 2019).....	105
Figura 5.16. Metodología para generar la capa correspondiente al índice de vegetación.	106
Figura 5.17 Mapa del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (IVDN)..	107
Figura 5.18. Metodología para generar el mapa de potencial acuífero.....	108
Figura 5.19 Ubicación de los puntos medios de los sondeos eléctricos verticales..	111
Figura 5.20 Metodología de adquisición de métodos eléctricos.....	113
Figura 5.21 Ubicación de los puntos medios de los tendidos sísmicos	114
Figura 5.22 Metodología de adquisición de métodos sísmicos.	115
Figura 5.23 Ubicación de las estaciones gravimétricas ordinarias levantadas.	116
Figura 5.24 Deriva instrumental por 24 horas del gravímetro Scintrex CG-5.....	117
Figura 5.25 Esquema del circuito realizado para el levantamiento de la estación base.	118
Figura 5.26 Metodología de adquisición de los métodos gravimétricos.	119
Figura 5.27 Metodología de procesamiento de los datos obtenidos por los métodos eléctricos.	120
Figura 5.28 Metodología de procesamiento de datos por refracción de ondas P.....	122
Figura 5.29 Metodología de procesamiento de los datos gravimétricos.....	130

	Página
Figura 6.1 Curva hipsométrica de la subcuenca Miranda.	140
Figura 6.2 Mapa de potencial acuífero.....	141
Figura 6.3 Curva de inversión del SEV-02.	143
Figura 6.4. Histograma de frecuencias para resistividad aparente en general.	146
Figura 6.5 Histograma de frecuencia para resistividad de inversión en general.....	147
Figura 6.6 Curvas de resistividades aparentes de los sondeos eléctricos verticales.	148
Figura 6.7 Mapa de polígonos de Thiessen de las curvas de resistividad para la subcuenca de Miranda.....	149
Figura 6.8 Mapa de resistividad óptima.....	152
Figura 6.9 Mapa de profundidad de la capa con resistividad óptima.	152
Figura 6.10 Mapa de conductancia longitudinal.	154
Figura 6.11 Dromocrónica y modelo 2D para el sondeo R-02.	155
Figura 6.12 Histograma de frecuencia y diagrama de caja de velocidades y espesores de la capa 1.....	157
Figura 6.13 Histograma de frecuencia y diagrama de caja de velocidades y espesores de la capa 2.....	158
Figura 6.14 Histograma de frecuencia y diagrama de caja de velocidades para la capa 3.....	159
Figura 6.15 Histograma de frecuencia y diagrama de caja de velocidades para la capa 4.....	160
Figura 6.16 Histograma de frecuencia para todas las velocidades.	161
Figura 6.17 Velocidad de la onda P en la capa 1.	163
Figura 6.18 Velocidad de la onda P en la capa 2.	164
Figura 6.19. Velocidad de la onda P en la capa 3.	165
Figura 6.20. Velocidad de la onda P en la capa 4.	166
Figura 6.21 Nivel freático de la zona aluvional de la subcuenca de Miranda.	167
Figura 6.22 Clasificación hidrogeológica para SEV-01 e información geológica de pozos cercanos P1 y P4.....	170

	Página
Figura 6.23 Clasificación hidrogeológica para SEV-02 e información geológica de pozos cercanos P1 y P5.....	172
Figura 6.24 Clasificación hidrogeológica para SEV-03 e información geológica de pozos cercanos P1 y P4.....	174
Figura 6.25 Clasificación hidrogeológica para SEV-04 e información geológica de pozos cercanos P6.....	176
Figura 6.26 Clasificación hidrogeológica para SEV-05 e información geológica de pozos cercanos P2 y P3.....	178
Figura 6.27 Clasificación hidrogeológica para SEV-06 e información geológica de pozos cercanos P4.....	180
Figura 6.28 Clasificación hidrogeológica para SEV-07 e información geológica de pozos cercanos P7.....	182
Figura 6.29 Clasificación hidrogeológica para SEV-08 e información geológica de pozos cercanos P7.....	184
Figura 6.30 Clasificación hidrogeológica para SEV-09 e información geológica de pozos cercanos P5 y P6.....	186
Figura 6.31 Clasificación hidrogeológica para SEV-10 e información geológica de pozos cercanos P2.....	188
Figura 6.32 Clasificación hidrogeológica para SEV-11 e información geológica de pozos cercanos P7.....	190
Figura 6.33 Clasificación hidrogeológica para SEV-12, SEV-13, SEV-15 y SEV-16.....	196
Figura 6.34 Clasificación hidrogeológica para SEV-14 e información geológica de pozos cercanos P1.....	198
Figura 6.35 Clasificación de los acuíferos propuestos según su uso.....	200
Figura 6.36 Histograma de frecuencia y diagrama de caja de anomalía de Bouguer.....	202
Figura 6.37 Mapa topográfico del área sedimentaria de la subcuenca de Miranda, estados Carabobo y Yaracuy.....	203

	Página
Figura 6.38 Mapa de anomalía de aire libre del área sedimentaria de la subcuenca de Miranda, estados Carabobo-Yaracuy.....	204
Figura 6.39 Mapa de anomalía de Bouguer total del área sedimentaria de la subcuenca de Miranda, estados Carabobo-Yaracuy (densidad 2.3 g/cm ³).	205
Figura 6.40 Mapa de anomalía regional por continuación analítica hacia arriba a 800 m del área sedimentaria de la subcuenca de Miranda, estados Carabobo-Yaracuy (densidad 2.3 g/cm ³).....	206
Figura 6.41 Mapa de anomalía residual por continuación analítica hacia arriba a 800 m del área sedimentaria de la subcuenca de Miranda, estados Carabobo-Yaracuy (densidad 2.3 g/cm ³).....	208
Figura 6.42 Espectro de potencia con los niveles de profundidad elaborado en Excel.	209
Figura 6.43 Solución obtenida para la deconvolución de Euler (I=1.0, T=20, W=8).	210
Figura 6.44 Perfiles A-A' y B-B' sobre el mapa de anomalía residual y el mapa geológico de la zona.....	212
Figura 6.45 Modelo geológico del perfil gravimétrico A-A'	214
Figura 6.46 Modelo geológico del perfil gravimétrico B-B'	216
Figura 6.47 Modelado topográfico 3D con integración de datos de pozo y nivel freático (vista A).	219
Figura 6.48 Modelado topográfico 3D con integración de datos de pozo y nivel freático (vista B).....	220
Figura A.1 Mapa geológico de Salom	243
Figura A.2 Mapa geológico de Bejuma	244
Figura A.3 Mapa geológico de Miranda	245
Figura A.4 Mapa geológico de Las Matas	246
Figura A.5 Mapa geológico de El Palmar.....	247
Figura B.1 Configuración general para un dispositivo tipo Wenner con su respectiva progresión geométrica.....	253

	Página
Figura B.2 Configuración general de la geometría de una refracción sísmica de onda P para un tendido de 200 m.....	256
Figura B.3 Esquema general del circuito cerrado empleado para la adquisición de datos gravimétricos.....	257
Figura B.4 Información de la estación San Blas, Carabobo.	258
Figura B.5 Información de la estación gravimétrica de Montalbán, Carabobo	259
Figura C.1 Curvas de resistividad aparente originales de todos los sondeos eléctricos verticales tipo Wenner	262
Figura C.2 Curva de resistividades aparentes del SEV-01 al SEV-04.	263
Figura C.3 Curva de resistividades aparentes del SEV-05 al SEV-08.	263
Figura C.4 Curva de resistividades aparentes del SEV-09 al SEV-12.	264
Figura C.5 Curva de resistividades aparentes del SEV-13 al SEV-16.	264
Figura C.6 Curva de resistividades verdaderas del SEV-01 al SEV-04.	265
Figura C.7 Curva de resistividades verdaderas del SEV-05 al SEV-08.	265
Figura C.8 Curva de resistividades verdaderas del SEV-09 al SEV-12.	266
Figura C.9 Curva de resistividades verdaderas del SEV-13 al SEV-16.	266
Figura D.1 Tendido R-01 ubicado en la Hacienda Monterrey.....	271
Figura D.2 Tendido R-02 ubicado en la Hacienda Monterrey.....	272
Figura D.3 Tendido R-03 ubicado en la Agropecuaria San Miguel	272
Figura D.4 Tendido R-04 ubicado en el Sector La Gripta.....	273
Figura D.5 Tendido R-05 ubicado en la Urbanización San Roque.....	273
Figura D.6 Tendido R-06 ubicado en Sabana de Arriba.....	274
Figura D.7 Tendido R-07 ubicado en la Urbanización San Roque.....	274
Figura D.8 Tendido R-08 ubicado en la Finca El Milagro	275
Figura D.9 Tendido R-09 ubicado en la Finca El Milagro	275
Figura D.10 Tendido R-10 ubicado en la Agrícola Las Clavelinas	276
Figura D.11 Tendido R-11 ubicado en la urbanización la Guaruga	276
Figura D.12 Tendido R-12 ubicado en la Finca El Milagro.	277
Figura D.13 Tendido R-13 ubicado en el Sector las Parchas	277

	Página
Figura D.14 Tendido R-14 ubicado en la Cooperativa Dos Frontera.	278
Figura D.15 Tendido R-15 ubicado en la Finca de Andrés Olivo	278
Figura D.16 Tendido R-16 ubicado en la Cooperativa Dos Fronteras	279
Figura D.17 Tendido R-17 ubicado en la Hacienda Guayabal	279
Figura E.1 Mapa topográfico del área sedimentaria de la subcuenca de Miranda, estados Carabobo-Yaracuy.	290
Figura E.2 Mapa de anomalía de aire libre del área sedimentaria de la subcuenca de Miranda, estados Carabobo-Yaracuy.....	291
Figura E.3 Mapa de anomalía de Bouguer total del área sedimentaria de la subcuenca de Miranda, estados Carabobo-Yaracuy, densidad 2.3 g/cm ³	292
Figura E.4 Mapa de anomalía regional por continuación analítica hacia arriba a 800 m del área sedimentaria de la subcuenca de Miranda, estados Carabobo-Yaracuy, densidad 2.3 g/cm ³	293
Figura E.5 Mapa de anomalía residual por continuación analítica hacia arriba a 800 m del área sedimentaria de la subcuenca de Miranda, estados Carabobo-Yaracuy, densidad 2.3 g/cm ³	294
Figura E.6 Solución obtenida para la Deconvolución de Euler.	295
Figura E.7 Pruebas para definir parámetros de la deconvolución de Euler (1)	296
Figura E.8 Pruebas para definir parámetros de la deconvolución de Euler (2).	297
Figura E.9 Pruebas para definir parámetros de la deconvolución de Euler (3).	298

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1.1 Coordenadas de los vértices de la zona de estudio general.	6
Tabla 2.1 Tabla estratigráfica de la zona de estudio. Elaboración propia.	20
Tabla 4.1 Características hidrogeológicas según el tipo de acuífero).....	43
Tabla 4.2 Valores interpretativos del factor de Forma.....	48
Tabla 4.3 Índice de compacidad.	49
Tabla 4.4 Cuantificación de la superficie por rangos de pendiente.	49
Tabla 4.5 Bandas del Sentinel-2.	63
Tabla 4.6 Especificaciones del satélite ALOS PALSAR.....	64
Tabla 4.7 Escala de preferencias según Saaty.....	67
Tabla 4.8 Índice de consistencia aleatoria (RI).....	69
Tabla 4.9 Resistividad en rocas y sedimentos.	72
Tabla 4.10 Tabla de resistividades en sedimentos y rocas comunes	72
Tabla 4.11 Resistividad del agua.	73
Tabla 4.12 Velocidad onda P en distintos materiales.	78
Tabla 5.1 Atributos de litología y permeabilidad).	97
Tabla 5.2 Clasificación de litologías de acuerdo a su permeabilidad.	98
Tabla 5.3 Clasificación de categorías según la densidad de lineamientos geológicos.	98
Tabla 5.4 Estaciones climatológicas usadas para generar mapa de precipitación. ...	104
Tabla 5.5 Matriz de comparaciones pareadas para el proceso de análisis jerárquico..	108
Tabla 5.6. Peso normalizado y ranking asignado para cada capa temática.	109
Tabla 5.7. Matriz de comparación pareada normalizada y pesos normalizados para cada capa temática.....	110
Tabla 5.8. Tabla clasificación potencial acuífero.	110
Tabla 5.9 Ubicación e identificación de los sondeos eléctricos verticales.	112
Tabla 5.10 Identificación, rumbo y coordenadas de los tendidos sísmicos.	114

	Página
Tabla 5.11. Parámetros para aplicar el filtro pasa banda	122
Tabla 5.12 Curvas de resistividad para cada SEV.	125
Tabla 5.13 Resistividades y profundidades óptimas.....	127
Tabla 5.14 Profundidad del nivel freático.....	129
Tabla 5.15 Densidades para los sedimentos predominantes en la zona de estudio ..	131
Tabla 5.16 Índices estructurales del campo gravimétrico y cuerpos geológicos	134
Tabla 5.17 Parámetros seleccionados para la aplicación de la deconvolución de Euler	134
Tabla 5.18 Parámetros utilizados para el modelado gravimétricos de los perfiles A-A' y B-B'	135
Tabla 6.1 Parámetros morfométricos de la subcuenca de Miranda.	138
Tabla 6.2 Datos para generar la curva hipsométrica.....	139
Tabla 6.3 Estadística descriptiva por capa para resistividades y espesores.	144
Tabla 6.4. Estadística descriptiva para valores de resistividad aparente general.....	145
Tabla 6.5 Estadística descriptiva para valores de resistividad verdadera general. ...	147
Tabla 6.6 Análisis estadístico de velocidades y espesor por capa.	156
Tabla 6.7 Velocidades y espesores de ondas P para las capas de todos los tendidos	162
Tabla 6.8 Tabla de resultados para el SEV/01 y R/01	169
Tabla 6.9 Tabla de resultados para el SEV-02 y R-03.....	171
Tabla 6.10 Tabla de resultados para el SEV-03 y R-04.....	173
Tabla 6.11 Tabla de resultados para el SEV-04 y R-05.....	175
Tabla 6.12 Tabla de resultados para el SEV-05 y R-06.....	177
Tabla 6.13 Tabla de resultados para el SEV-06 y R-07.....	179
Tabla 6.14 Tabla de resultados para el SEV-07 y R-08.....	181
Tabla 6.15 Tabla de resultados para el SEV-08 y R-09	183
Tabla 6.16 Tabla de resultados para el SEV-09 y R-10.....	185
Tabla 6.17 Tabla de resultados para el SEV-10 y R-11.....	187
Tabla 6.18 Tabla de resultados para el SEV-11 y R-12.....	189
Tabla 6.19 Tabla de resultados para el SEV-12 y R-13.....	192

	Página
Tabla 6.20 Tabla de resultados para el SEV-13 y R-14.....	193
Tabla 6.21 Tabla de resultados para el SEV-15 y R-16.....	194
Tabla 6.22 Tabla de resultados para el SEV-16 y R-17.....	195
Tabla 6.23 Tabla de resultados para el SEV-14 y R-15.....	197
Tabla 6.24 Resumen de la clasificación hidrogeológica propuesta por sondeo.....	200
Tabla 6.25 Estadística descriptiva de la anomalía de Bouguer.....	201
Tabla 6.26 Profundidades obtenidas para las fuentes anómalas	209
Tabla B.1 Información de pozos preexistentes en la zona de estudio.....	249
Tabla B.2 Instrumentos utilizados para la adquisición de eléctricos	251
Tabla B.3 Instrumentos utilizados para la adquisición de datos sísmicos	251
Tabla B.4 Instrumentos utilizados para la adquisición de datos a través de métodos gravimétricos.....	252
Tabla B.5 Distancias AB/2 según la progresión geométrica determinada.....	253
Tabla C.1 Resistividades aparentes de todos los sondeos eléctricos verticales originales	261
Tabla C.2 Resistividades y espesores de modelos de inversión.	267
Tabla C.3 Parámetros de conductancia longitudinal.....	269
Tabla E.1 Datos de identificación de las estaciones gravimétricas ordinarias y datos gravimétricos calculados para elaborar los mapas gravimétricos.....	281

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El agua es el recurso más importante para todo tipo de vida, por lo cual el ser humano se ha dedicado en las últimas décadas a su búsqueda a nivel mundial para mejorar la calidad de los habitantes y satisfacer la demanda debido a la escasez en las zonas con bajos recursos, aplicando distintos métodos y tecnologías para la exploración y explotación del mismo. Según Shiklomanov (1997), en los últimos años los recursos hídricos subterráneos han sido una buena alternativa para solventar las necesidades de abastecimiento de agua potable en varias partes del mundo.

Sin embargo, la región de Miranda ha venido presentando una disminución en el suministro de agua potable durante las últimas décadas. Esta región forma parte de un valle que se encuentra ubicado al noroeste del estado Carabobo, justo en el límite con el estado Yaracuy y cuya zona norte pertenece a la Zona Protectora de la Cuenca Alta del Río San Carlos (Decreto N° 2647, 1978). Un informe preliminar realizado por Osorio y Morales (2015), mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica (SIG), determinó que las líneas limítrofes planteadas no consideraban la morfología de la cuenca y sugirieron una revisión y modificación del citado decreto. Esta zona protectora, abarca parte de los municipios Bejuma, Juan José de Mora, Montalbán y Miranda, y se extiende hasta el municipio Falcón del estado Cojedes con una superficie de 2760 km² (Reyes, 2020).

La región abarcada por la subcuenca de Miranda se ha caracterizado por la realización de actividades agrícolas, en rubros tales como: árboles maderables, mangos, acacias, eucaliptos, rosa montaña, pomarrosa, maporas, apamates, cedro, guafas, gran variedad de matas ornamentales, cítricos en abundancia, y árboles frutales varios, así como otras actividades relacionadas al sector ganadero y avícola, muy necesarias para el desarrollo del país. Sin embargo, el desarrollo progresivo de estas actividades, así como el

crecimiento rural y urbano, la prolongación de los periodos de sequía, cambios climáticos, deforestación, excesiva explotación de acuíferos, entre otros factores, han sido las principales causas de los problemas ambientales de las cuencas hidrográficas del estado Carabobo (Reyes, 2020).

Debido a ello, la capacidad de los suelos se ha degradado, limitando la captación e infiltración del agua hasta las capas más permeables que se encuentran en el subsuelo a diferentes profundidades. Adicionalmente, aumenta la escasez de agua, la desertificación, la pérdida de suelo y los riesgos por deslaves en épocas de lluvia (Salas y Castillo, 2012). La acelerada disminución de los caudales de los ríos en los últimos treinta años ha evidenciado una crisis hídrica en la región de Carabobo, afectando principalmente a las poblaciones rurales y los pequeños agricultores, provocando un mayor nivel de inseguridad alimentaria (Olivares *et al.* 2017).

Debido al gran potencial en recursos hídricos, Venezuela constituye una región privilegiada. Sin embargo, ese potencial no se ve manifestado en la existencia de información organizada y de calidad, relacionada con el tema hidrológico (Martínez, 2011). Según Cañizales *et al.* (2006), no existe en el país una eficiente gestión de los recursos subterráneos, ni una base de datos nacional confiable, que proporcione el número real de pozos, tipo de uso, características del acuífero, volumen, calidad, zonas de descarga y recarga, profundidad ideal para su explotación, calidad con respecto al tiempo y la profundidad, así como otros factores que proporcionen un seguimiento verdadero de estos recursos. El potencial de las aguas subterráneas en Venezuela es poco conocido hasta la fecha, pero se estima que los acuíferos representan una superficie total aproximada de 829000 m², los cuales, a través de estudios preliminares se han estimado en 8×10⁹m³ por año (Martínez *op. cit.*).

Según Razandi *et al.* (2015), se define la “potencialidad de agua subterránea” como la posibilidad de existencia de aguas subterráneas en una zona de estudio. Generalmente, para determinar la potencialidad, se utilizan métodos tradicionales como son las perforaciones, las cuales son muy costosas, consumen tiempo y requieren de profesionales expertos (Jha *et al.*, 2010). Por otra parte, la mayoría de los estudios de

aguas subterráneas que se realizan en el país, se llevan a cabo mediante perforaciones exploratorias, casi sin contar con estudios geológicos o geofísicos que certifiquen la correcta ubicación y profundidad que deberían tener los pozos y así garantizar el mejor aprovechamiento de los sistemas acuíferos (Reyes, 2020).

Hoy en día, autores como: Madrucci *et al.* (2008), Jha *et al.* (2010), Razandi *et al.* (2015), Rahmati *et al.* (2015), Macas y López (2018), han aplicado métodos eficientes y económicos para estimar la ubicación de zonas con mayores potenciales acuíferos, gracias al fácil acceso de algunas imágenes satelitales mediante la Teledetección y el empleo de Sistemas de Información Geográficos (SIG).

El Análisis de Decisión Multi-Criterio (ADMC) constituye una herramienta efectiva para la gestión de recursos de aguas subterráneas (Jha *op. cit.* y Madrucci *op. cit.*). Las zonas con mayor potencial de aguas subterráneas pueden ser estimadas mediante un Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ), el cual es muy apropiado para ser aplicado en países en vías de desarrollo (Razandi *op. cit.*). Estos autores también sugieren que los mapas obtenidos mediante estas técnicas, se pueden utilizar como insumos para la gestión de aguas subterráneas. Por otra parte, Teeuw (1995) determinó las ventajas de usar imágenes satelitales y SIG en la prospección de aguas subterráneas de forma económica, mediante el estudio de la permeabilidad primaria de las rocas y la verificación de resultados con estudios geofísicos y perforaciones de pozos realizados en Ghana.

Los métodos geoelectrónicos y en especial los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) son uno de los estudios geofísicos más utilizados en prospección de aguas subterráneas, por ser de fácil aplicación, bajo costo y resolución aceptable en la mayoría de los casos. Mediante este método, es posible determinar las variaciones en profundidad de la resistividad eléctrica de las rocas que conforman el subsuelo, lo cual permite estimar si existen condiciones favorables para la acumulación de aguas subterráneas. Por otra parte, el método de refracción sísmica proporciona información acerca de los espesores de las capas más someras y velocidades de las ondas sísmicas a diferentes profundidades, lo cual permite determinar el grado de compactación de los suelos y

constituye una herramienta complementaria para la interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales, ya que a veces permite identificar la profundidad a la que se encuentra el nivel freático. La gravimetría, por el contrario, permite determinar la distribución de las rocas de diferentes densidades que se encuentran en el subsuelo mediante el estudio de las anomalías gravimétricas. Adicionalmente, mediante el modelado de anomalías gravimétricas en 2D y 3D, es posible estimar la geometría del basamento rocoso y la distribución en profundidad de las capas de diferentes densidades en el subsuelo, permitiendo así generar modelos que describan la geología estructural de una cuenca hidrográfica.

Con base en lo anteriormente expuesto, este estudio estuvo dirigido a determinar los principales rasgos hidrogeológicos superficiales de la subcuenca de Miranda, tales como: ríos y quebradas, así como también los rasgos hidrogeológicos subterráneos, tales como: la distribución, profundidad, extensión y ubicación de los posibles sistemas acuíferos que se encuentran en la zona, ofreciendo información importante para próximos planes de ahorro, gestión y correcta distribución de las aguas subterráneas de la población de Miranda.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Caracterizar los sistemas acuíferos de la subcuenca hidrográfica de Miranda, mediante el manejo de imágenes satelitales, sistema de información geográfica e integración de métodos geofísicos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Generar un mapa de zonas potenciales para la exploración de acuíferos mediante la aplicación de sistemas de información geográfica (SIG) y la evaluación multicriterio de imágenes satelitales.
- Identificar las zonas potenciales para la explotación de sistemas acuíferos mediante el análisis integrado de sondeos eléctricos verticales y refracciones sísmicas.

- Generar un modelo estructural del subsuelo mediante el análisis integrado de sondeos eléctricos, sísmica de refracción, anomalías de Bouguer y geología disponible.
- Crear una base de datos geoespacial que reúna la información adquirida en el estudio, mediante el empleo de un sistema de información geográfica.

1.3 Localización del área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la subcuenca de Miranda, localizada en el límite entre los estados Carabobo y Yaracuy, en el centro-norte de Venezuela, entre latitudes 10.046280° N y 10.232724° N y longitudes -68.306916° W y -68.469336° W (figura 1.1), cuya extensión cubre una superficie de 187.2 km^2 . La cobertura de la teledetección abarca toda la extensión de la subcuenca, mientras que la prospección geofísica se llevó a cabo hacia el centro, específicamente donde se concentra la zona aluvional de baja pendiente. Además, la ejecución de los estudios geofísicos estuvo restringida a aquellos lugares donde se obtuvo el permiso para realizar las mediciones, y que, además, cumplieren con los requisitos de adquisición (terreno con vegetación baja y con pocos desniveles, con una longitud mayor a 600 m).

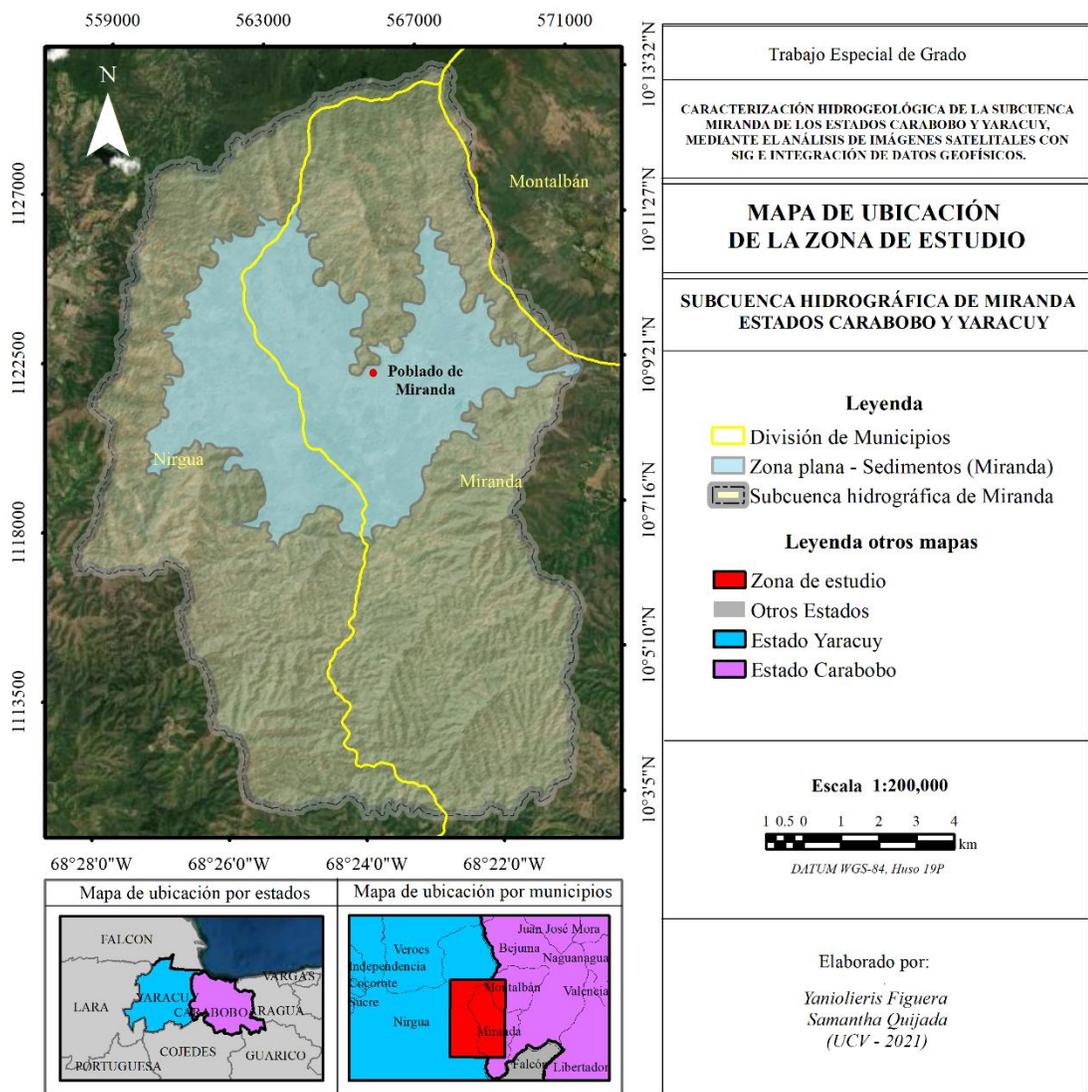


Figura 1.1 Mapa de localización del área de estudio (tomado y modificado de Google Earth, 2019).

Tabla 1.1 Coordenadas de los vértices de la zona de estudio general.

Coordenadas de la ventana de estudio				
Ubicación en el mapa	Geográficas		UTM (WGS84) – Huso 19P	
	Latitud (°)	Longitud (°)	Norte (m)	Este (m)
Noreste	10.23157	-68.47256	1131062.957	557763.838
Noroeste	10.23133	-68.34096	1131062.895	572177.589
Sureste	10.04618	-68.34133	1110590.743	572177.589
Suroeste	10.04641	-68.47286	1110509.743	557763.838

1.4 Justificación

En Latinoamérica la agricultura es el sector que más utiliza agua: más del 70 por ciento de su consumo, mientras que el suministro de hogares utiliza el 17 por ciento y la industria el 13 por ciento (ONU, 2018). Específicamente, en el ámbito de agricultura en Venezuela es donde existe mayor uso del vital líquido; según datos de la ONU para la Alimentación y la Agricultura (2015) la extracción hídrica total nacional para el 2008 alcanzó los 22.6 km³, destacando el sector agrícola con una extracción de 16.7 km³, equivalente al 74 por ciento del total de las extracciones. El país presenta un uso equilibrado de las dos grandes fuentes de agua para riego: 53.7 por ciento del área bajo riego se abastece de ríos, lagunas, sistemas de riego con embalses y 42.7 por ciento de diferentes formas de extracción de aguas subterráneas, tales como: pozos profundos privados, comunitarios o manantiales. Es evidente que, para el desarrollo normal de estas actividades y el consumo humano, el agua es un recurso indispensable. A falta de embalses, represas y lagos, los acuíferos son una alternativa para satisfacer en cierto grado la demanda de agua que se vive hoy en día.

La parte norte de Venezuela, donde se asienta el mayor porcentaje de la población y las principales actividades económicas, es la más escasa en recursos hídricos (FAO, 2015), por lo que la falta de agua es un problema persistente que se presencia en el país. Debido a que el estado Carabobo no es la excepción a este problema, siendo una zona altamente productora agrícola y agropecuaria con gran índice de población, es necesario encontrar una solución a la demanda de agua. La Cuenca Alta del Río San Carlos es una de las principales fuentes hidrográficas que tiene el estado, suministrando agua a través de las subcuencas de Bejuma, Montalbán y Miranda, las cuales se han visto afectadas por el mal suministro y distribución del servicio de agua potable.

Es por ello, que el presente Trabajo Especial de Grado (T.E.G) tiene la finalidad de determinar las características hidrogeológicas que presenta la subcuenca de Miranda mediante la aplicación combinada de métodos geofísicos y sistemas de información geográfica, así como la distribución y ubicación de los principales sistemas acuíferos que se encuentran en la zona, los cuales podrían ser aprovechados por sus habitantes

para satisfacer la demanda de agua potable y llevar a cabo con normalidad sus actividades agrícolas, industriales y de consumo en los hogares. Este trabajo permitirá aportar nueva información de carácter geofísico a la cuenca, plasmada en una base de datos geoespacial que describa las características hidrogeológicas de la subcuenca de Miranda.

Este Trabajo Especial de Grado forma parte de un proyecto conjunto entre el Instituto Venezolano-Alemán de Ciencias Ecológicas Aplicadas (IVACEA) y el Departamento de Geofísica de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Universidad Central de Venezuela, el cual tiene por finalidad la caracterización hidrográfica de los Valles Altos de Carabobo.

1.5 Antecedentes

1.5.1 Teledetección, SIG e hidrogeología

Castaño (2001) realizó un estudio con teledetección y SIG en España, para cuantificar las extracciones y consumo de agua subterránea. El estudio se basó en la obtención de una clasificación de cultivos mediante el análisis multitemporal de imágenes del sensor TM del satélite LANDSAT. Los datos se integraron en un sistema de información geográfica, uniendo datos de necesidades de riego por cultivo con el propósito de conocer la distribución espacial y temporal de los recursos hídricos para el consumo de las zonas agrícolas. Se calcularon las superficies regadas con aguas superficiales y los aportes de las mismas para así relacionarlas directamente con los volúmenes de aguas subterráneas que se extraen.

Jaiswal *et al.* (2003) investigó zonas de posible acumulación de agua subterránea. El estudio consistió en el análisis de imágenes satelitales usando SIG para obtener información de la litología presente, estructuras geológicas, formas del terreno, redes de drenajes, características del suelo y pendientes del terreno.

Macas y López (2018) en su artículo de investigación aplicaron técnicas de SIG y teledetección para cartografiar áreas potenciales para la exploración de aguas subterráneas en la Demarcación Hidrográfica Puyango Catamayo. La metodología que

aplicaron estuvo basada en el Análisis de Decisión Multicriterio (ADMC) mediante un Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ), que toma como capas temáticas de análisis: la permeabilidad de la roca, la precipitación de la lluvia, la densidad de drenajes, las pendientes del terreno y el índice de vegetación de diferencia normalizado. A partir de estos análisis se obtuvo el índice de potencial de aguas subterráneas, utilizado para la creación del mapa de potencial de aguas subterráneas. El mapa resultante fue comparado con los datos existentes en el inventario de puntos de agua, generado por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Ecuador.

Musa *et. al* (2009) integraron la teledetección y los SIG para elaborar un mapa de clasificación de las zonas con mayor potencial acuífero.

Olivar y Pedrique (2006) llevaron a cabo un estudio hidrogeológico llamado “Evaluación hidrogeológica del valle del río Tucutunemo, municipio Zamora, estado Aragua” para conocer las condiciones de acumulación de agua subterránea. El estudio se basó en la información obtenida y el inventario de pozos efectuado en la zona de estudio que permitieron la elaboración de perfiles estratigráficos para establecer las zonas con mejor condición acuífera. Esto les permitió concluir que los acuíferos de la zona se encuentran muy explotados, trayendo como consecuencia falta de agua por la ausencia de un plan de manejo adecuado de las aguas subterráneas y un excesivo bombeo de pozos de agua.

Ramalingam y Santhakumar (1999) hicieron una investigación con el fin de identificar las posibles zonas para la recarga artificial. Se elaboraron mapas e imágenes satelitales usando datos de teledetección y SIG. Los mapas realizados incluyen: geología, geomorfología, uso del suelo, pendientes y drenajes, los cuales se realizaron usando datos adquiridos en campo integrado con información obtenida del satélite IRSS.

Rao *et al.* (2000) realizó un mapa integrado para conocer los recursos del agua subterránea disponibles en el Distrito de Gurgaon India, haciendo uso de los sensores remotos y técnicas de SIG, indicando calidad, profundidad y perspectivas del agua subterránea.

Shahid *et al.* (2000) propusieron una integración de las herramientas de SIG para delimitar las zonas potenciales de acumulación de agua subterránea, generando los siguientes mapas satelitales: litología, geomorfología, densidad de drenajes, suelo, red de drenajes, pendientes y cuerpos de agua superficial.

Reyes (2020) realizó un estudio de caracterización de la subcuenca Montalbán, edo. Carabobo con la finalidad de determinar las zonas con mayor potencial de acumulación de aguas subterráneas, por medio de información geológica, prospección geoelectrica, imágenes satelitales y el empleo de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Aplicó el método de Análisis de Decisión Multi-Criterio (ADMC), basado en el Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ) y obtuvo un mapa de las zonas con mayor potencial acuífero, el cual correlacionó con la información geológica y de pozos disponibles, así como con datos geoelectricos previamente adquiridos.

1.5.2 Estudios geofísicos

Alvarado *et al.* (1982) realizaron una caracterización hidrogeológica de la región de Barlovento, donde determinaron las zonas con mayor posibilidad de acumulación de aguas subterráneas, así como la calidad de las mismas.

Julio, M. (1981) realizó un estudio geofísico de cuarenta SEV (sondeos eléctricos verticales) en la región de barlovento, efectuados a lo largo de cuatro perfiles geoelectricos con el fin de determinar de un modelo general las zonas con mejores perspectivas en las prospección y ubicación de acuíferos explotables.

Mederos (2009) hizo un estudio integrado geológico-geofísico en la región de Farriar-Morón en los estados Yaracuy y Carabobo, donde realizó e interpretó un modelo geológicoestructural, por medio de la recopilación de datos gravimétricos-magnéticos y geológicos de la zona. Este modelo contiene las condiciones geológico-tectónicas propias de la zona.

Calixto (2017) realizó un estudio geofísico, aplicando métodos eléctricos para la búsqueda de agua subterránea y el prediseño de un pozo para la empresa TránsAvela S. A, ubicada en Colombia. En el estudio aplicaron sondeos eléctricos verticales,

interpretando el parámetro de resistividad aparente en conjunto con la geología de la zona y dando así una viabilidad de ubicar un pozo profundo para la extracción de agua subterránea en dicho sector.

Reyes y Rodriguez (2013) realizaron un estudio mediante la aplicación de sondeos eléctricos verticales, imágenes eléctricas y resistivimetría con salinización, para buscar una fuente de abastecimiento de agua con la calidad y cantidad suficiente para el consumo en la zona turística de Trinidad, Cuba. La interpretación conjunta de estos métodos permitió estimar las características estructurales del acuífero, estableciendo relaciones entre los parámetros hidrogeológicos en concordancia con las propiedades geoeléctricas de la zona de estudio.

Nuñez y Pi (2021) llevaron a cabo un estudio de caracterización hidrogeológica en la subcuenca de Bejuma, ubicada en el estado Carabobo. Para ello, realizaron un mapa de potencial acuífero mediante el uso de ADMC combinado con PAJ para identificar las zonas con mayor potencial acuífero. Además, realizaron una adquisición geofísica aplicando métodos eléctricos, sísmicos y gravimétricos con el fin de correlacionar con los resultados satelitales y terrestres. En dicho estudio determinaron la correspondencia de las zonas potenciales con las zonas prospectivas determinadas por los sondeos eléctricos y refracciones sísmicas y de esta manera señalaron las zonas con las mejores condiciones para encontrar agua subterránea.

1.5.3 Estudios geológicos

Schubert (1980) caracteriza a la región de Yaracuy como una cuenca de tracción pullapart del Plio-Cuaternario, desarrollado entre las fallas dextrales activas de Boconó y Morón.

Omaña (2002) realizó un trabajo de integración en una amplia zona de los estados Carabobo y Aragua, determinando que la intensidad del metamorfismo es creciente a partir de los extremos norte y sureste convergentes hacia el centro de la zona comprendida entre Puerto Cabello-Valencia. Omaña sugiere que la unidad anfibolita

de Nirgua pudo ser afectada por una primera fase de metamorfismo en la facies de esquistos azules.

Nuñez (2015) describe la geología de las localidades de Tinaquillo, Cachinche y Chaparrote, estados Cojedes, Carabobo y Guárico. En general, el área consta de cinco fajas tectónicas, desde el Neoproterozoico hasta el Eoceno: Faja Caucagua-El Tinaco, Faja Loma de Hierro, Faja Villa de Cura, Faja Caracas y la Faja Piemontina, estas fajas están separadas entre sí por corrimientos, que abarcan una gran extensión con un rumbo noreste.

Ynfante (2017) en su trabajo especial de grado realiza un estudio geológico de un área de 3553,81 km² ubicada en el centro-occidente del país entre las poblaciones de Palmasola, Morón y Valencia, en los estados Yaracuy y Carabobo, respectivamente. El autor describe que la zona está conformada por una asociación de rocas metamórficas y sedimentarias de orígenes diversos, agrupadas de norte a sur en los terrenos geológicos El Guayabo, Tacagua, Carayaca, Ávila, Las Mercedes, Las Brisas, Nirgua y Cachinche, además, de los numerosos cuerpos de rocas ultramáficas (serpentinita) distribuidos en toda la zona de estudio, tales como las Napas de Lara, los depósitos cuaternarios y las unidades sedimentarias representadas por la Formación Maporita y la Formación Las Pailas.

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO

2.1 Sistema montañoso de la Cordillera de la Costa (CdIC)

El municipio Miranda se encuentra ubicado en el estado Carabobo, en la zona norcentral del país, la cual está caracterizada por una extensa cadena montañosa denominada Cordillera de la Costa (figura 2.1). La CdIC cuenta con 350 km de longitud y 80 km de ancho, pertenece al Sistema Montañoso del Caribe. Esta cadena está dividida geográficamente en la Serranía del Interior y en la Serranía Litoral, originadas a partir de las interacciones en las placas del Caribe y suramericana y separadas por el sistema de fallas de La Victoria (Urbani, 2012).

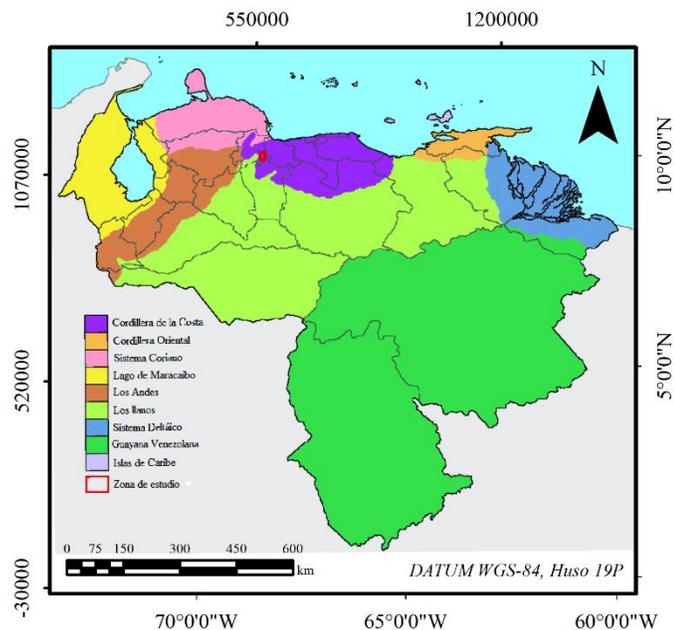


Figura 2.1 Ubicación regional de la Cordillera de la Costa (tomado y modificado de Fernández y Aranguren, 2016).

Menéndez (1965) segmentó en un principio la Cordillera de la Costa en cuatro cinturones tectónicos que presentan características estructurales similares: Cordillera de la Costa, Cauagua-El Tinaco, Paracotos y Villa de Cura; estas últimas cuatro fajas conforman la Serranía del Interior, mientras que la CdIC abarca la Serranía del Litoral.

Fallas regionales con una orientación aproximada de este-oeste separan estos cinturones (Ostos, 1985). Beck (1986), ayudó a describir el origen tectónico posterior a los autores mencionados anteriormente, quien introduce el término “napas” al estudiar la estructura de la Serranía del Interior y es quien define las napas de Cauagua-El Tinaco, Loma de Hierro y Villa de Cura. Urbani y Rodríguez (2004) subdividen la región en unidades descritas según diversas napas, las cuales se dividen en dos grandes bloques: las Napas de la Serranía del Litoral y las Napas de la Serranía del interior.

La Napa de la Serranía del Litoral, está conformada por la Napa Costera, Napa Ávila y Napa Caracas. La Napa Costera, compuesta por rocas de edad Jurásico-Cretácico, que consisten de gneises graníticos del Complejo de Sebastopol, el cual se interpretó como el antiguo basamento. Esta Napa limita al norte por el Mar Caribe y hacia el sur por la zona de fallas de La Victoria. Por encima se encuentran las rocas metasedimentarias de La Napa Caracas (Esquistos de Las Brisas, Mármol de Antímamo, Augengneis de Peña de Mora, Esquistos de Las Mercedes y Esquistos de Tacagua), donde se encuentran diversos cuerpos de rocas máficas y ultramáficas. (Ostos, *op. cit.*).

La Napa de la Serranía del Interior, se compone de las napas Cauagua-El Tinaco, Loma de Hierro y Villa de Cura. La Napa Cauagua-El Tinaco consiste de un basamento paleozoico de composición granítica, que infrayace a una secuencia volcánica sedimentaria. Este limita al sur con la falla normal de Santa Rosa. La parte superior del Grupo Caracas (Esquistos de Las Mercedes) está localmente corrida sobre este cinturón. Menéndez (1966) describe este cinturón como una asociación litológica formada por gneises horbléndicos y algunas rocas trodhjemíticas, las cuales son descritas como el basamento de este cinturón y son denominadas Complejo El Tinaco (Ostos, 1985). Las Napas de Loma de Hierro, se conforman por rocas máficas y ultramáficas en la Cordillera de la Costa. Bellizia y Rodríguez (1967) sugiere que las rocas máficas y ultramáficas de este sistema están en dos napas no bien definidas. La parte norte de este cinturón coincide con la napa costera. El cinturón sur, en el cual la

Peridotita de Tinaquillo está incluida, ocurre dentro de la Napa Cauagua-El Tinaco. Estos complejos ultramáficos ocurren como lentes concordantes con la estructura de la roca caja (roca que se aloja en el magma) (Ostos, *op. cit*).

Los trabajos de Urbani y Ostos (1989) permitieron terminar de dividir la Cordillera de la Costa como fajas Costera, Ávila y Caracas, las cuales fueron extendidas hasta Cabo Codera y el estado Yaracuy a partir del año 2000. Actualmente, las rocas que componen la CdIC se denominan “terrenos”.

La subcuenca de Miranda se encuentra ubicada en la Faja Ávila, perteneciendo al terreno Nirgua (P-J) y al terreno Ávila (PR-PZ) (figura 2.2). Urbani y Rodríguez (2004) indican que el terreno Ávila se divide en dos bloques: el bloque Oriental o Naiguatá, que abarca desde Tacagua hasta Cabo Codera, el cual ha sufrido una rápida exhumación desde el Plioceno; el bloque occidental, que se caracteriza por metasedimentarias con intrusiones granitoides y con menor grado de exhumación. Este terreno tiene su representación más extensa en la unidad llamada Complejo San Julián, que es una asociación de rocas metasedimentarias y metaígneas (de tonalíticas a graníticas) de origen continental. Estudios realizados sobre el protolito sedimentario del Complejo San Julián en la región de Caracas, sugieren que éste se depositó discordantemente sobre un basamento continental (el actual Augengneis de Peña de Mora).

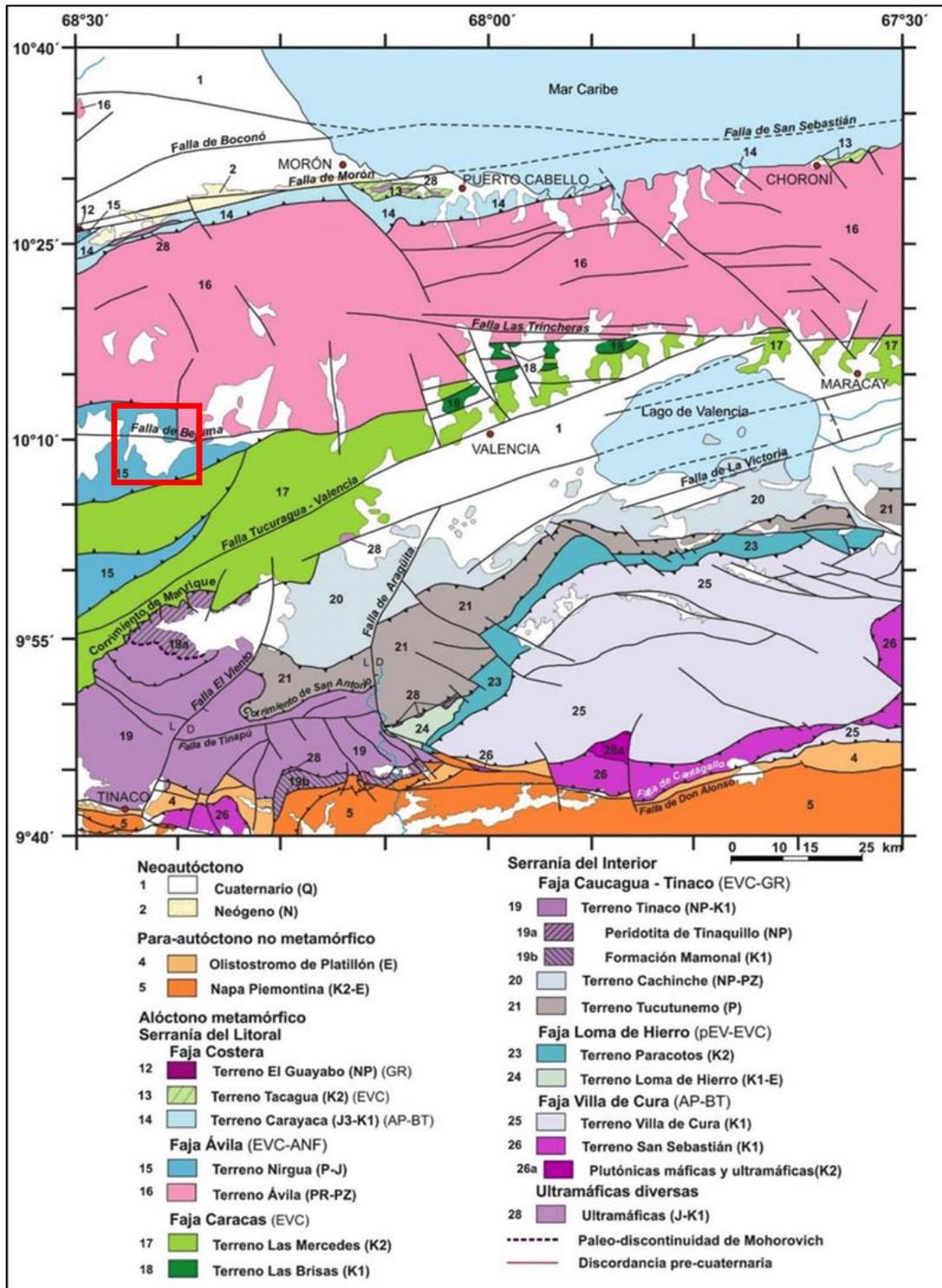


Figura 2.2 Mapa geológico simplificado de la zona central de la Cordillera de la Costa. El recuadro rojo representa el área de estudio (tomado y modificado de Urbani 2015).

Por otra parte, Urbani y Rodríguez (2004) mencionan que el terreno Nirgua representa al Complejo Nirgua, el cual se compone de al menos tres grupos de rocas: metasedimentarias, volcánicas minoritarias, y esquistos y mármol carbonáticos azul-grisáceos. Urbani (2015) establece que la presencia de yeso sugiere que los protolitos sedimentarios del complejo fueron depositados en el Pérmico, durante el cierre oceánico que originó a Pangea o en una cuenca rift Jurásica durante la formación de proto-Caribe.

Tomando una pequeña parte de la zona de estudio, se encuentra el terreno Las Mercedes con el Esquisto de Chuspita y el Esquisto de las Mercedes. El autor Urbani (2015) menciona que es de carácter cuarzo-muscovítico-carbonático y en algunos casos exclusivamente carbonático gradando a mármol masivo; además señalan que el protolito Las Mercedes se depositó en el océano proto-Caribe bajo condiciones anóxicas, en el margen pasivo del norte de la placa suramericana sin influencia de volcanismo y con posterior metamorfismo debido a la interacción de las placas Caribe y Suramericana.

2.1.1 División geográfica de la Cordillera de la Costa

La división geográfica de la CdIC es de acuerdo a sus características geológicas, siendo grandes unidades de naturaleza autóctona, para-autóctona y alóctona. Urbani (2015) indica que se divide de la siguiente forma:

- Hacia el oeste se ubican las montañas de Aroa y Bobare (2).
- En el norte se encuentran los pequeños cerros de Yumare (4).
- La parte más grande se divide en las serranías del Litoral (5) y del Interior (6).
- Hacia el oeste se tiene la parte de Caicagua (7) más allá del valle de San Felipe – Cabudare (controlado por la falla de Boconó). (figura 2.3).

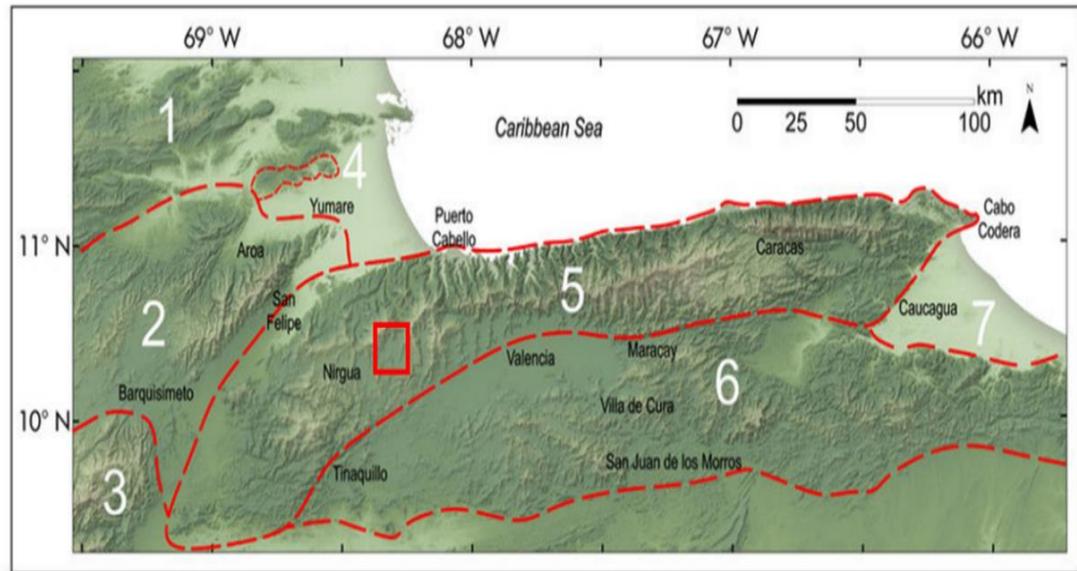


Figura 2.3 División geográfica de Venezuela norcentral con respecto a la Cordillera de la Costa. El recuadro rojo representa la zona de estudio. (Tomado y modificado de Urbani, 2015).

2.2 Estratigrafía

La zona de estudio está constituida principalmente por rocas metamórficas de edad Cretácico (figura 2.4), en algunos lugares dichas rocas se encuentran cubiertas por sedimentos aluviales de origen Cuaternario. Los principales acuíferos de la región de estudio están constituidos por sedimentos aluviales, la estratigrafía de las rocas metamórficas que afloran en la región es compleja (Gavotti, 1973). La subcuenca de Miranda está representada principalmente por un complejo integrado de formaciones montañosas, valles, depresiones y colinas, estando delimitada por montañas. En zonas de acumulación de sedimentos, la corteza superior se localiza a profundidades entre 11-15 km y profundidades de Moho de 27 a 35 km. En alrededores de la zona de estudio se tienen intrusiones de Peña de Mora en los Complejos Nirgua, San Julián y los Esquistos de Las Mercedes (Mederos, 2009).

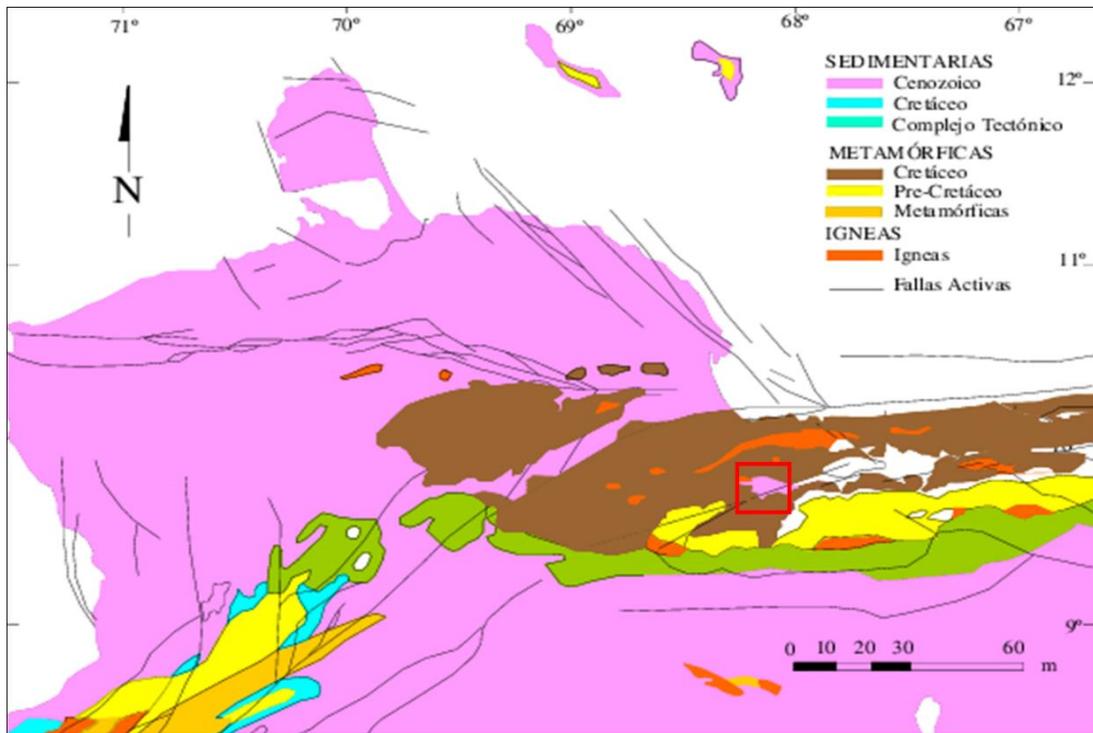


Figura 2.4 Mapa neotectónico geológico norcentral de Venezuela. El recuadro rojo representa el área de estudio (tomado y modificado de Omaña, 2002).

A continuación, en la tabla 2.1 se resumen las características más predominantes de la estratigrafía de la zona de estudio

Tabla 2.1 Tabla estratigráfica de la zona de estudio. Elaboración propia.

Era Geológica	Período	Formación	10 ⁶ año	Descripción litológica	Espesor (m)	Referencia
Cenozoico	Cuaternario	Aluviones	0.01-1.6	Sedimentos poco consolidados de arcillas, limos, arenas, gravas, conglomerados.	80-120	Datos de pozos de la zona.
Mesozoico	Cretácico	Esquisto Las Mercedes	74.5	Esquisto cuarzo - muscovítico - calcítico - grafitoso, mármol grafitoso, muscovita, plagioclasa, calcita	1800	Wehrmann (1972).
	Jurásico	Fase Nirgua Mesozoico sin diferenciación	208	Esquisto cuarzo - micáceo, micáceo - grafitoso, mármol masivo, anfibolita eclogítica, anfibolita epidótica y granatífera, cuarcita, esquisto y gneis cuarzo - micáceo - feldespático	1000	Bellizzia y Rodríguez (1967)
			225			
Triásico	245					
Paleozoico	Pérmico	San Julián (Puede abarcar hasta Precámbrico)	253	Esquisto y gneis cuarzo-plagioclásico-micáceo, mármol, cuarcita, anfibolita, gabro, diorita.	No definido	Urbani y Ostos (1989)
			258			
			290			
Precámbrico						

2.3 Geología estructural

La interacción entre la Placa del Caribe, que se desplaza al este con respecto a la Placa Sur Americana, la cual se mueve hacia el oeste, a una tasa estimada de 20 ± 2 mm/año, ha generado en el borde entre las Placas Caribe y Suramericana un conjunto de fallas a lo largo de las cuales se libera la mayor energía de deformación originando los movimientos sísmicos del área (Pérez *et. al*, 2001).

El marco estructural de la zona de estudio está asociado a la evolución tectónica del denominado Sistema Montañoso del Caribe, el cual es interpretado por Bellizzia (1972) como un orógeno tipo alpino, constituido por una amplia secuencia de rocas sedimentarias y volcánicas metamorfizadas del Mesozoico; metamorfismo zonado de

N-S en diversas facies; intrusiones ácidas, granitos y trondhjemitas; intrusiones básicas; complejos ultrabásicos de diferentes petrogénesis, todo esto acompañado de fallamiento normal longitudinal (hacia el norte), tectónica gravitacional al sur, corrimientos de estratificación en el centro-sur y fallamiento transversal en échelon característico. Al respecto, Avé-Lallemant y Sisson (1996) indican que el Sistema Montañoso del Caribe es un típico cinturón de estribaciones montañosas con una cuenca antepaís no metamorfizada en el sur y un transpaís de rocas ígneas y metamórficas en el norte, donde el cinturón antepaís fue formado durante el Terciario, mientras que la edad del metamorfismo es Mesozoica y con algunas rocas ígneas del Cretácico y del Paleozoico Inferior.

La Faja de la Cordillera de la Costa es un melange de subducción correlacionable con las asociaciones de rocas de la isla de Margarita y las penínsulas de Araya y Paria (Avé-Lallemant y Sisson, 1996); está limitada al norte por la zona de fallas del Caribe y al sur por la Falla de La Victoria, ambas son longitudinales y exhiben desplazamiento vertical mayores a 1 km en algunas regiones, mientras que el movimiento transcurrente dextral es mínimo. La Faja Caucagua - El Tinaco está limitada por la Falla de La Victoria al norte y por la falla de Santa Rosa al sur, también posee una estructura anticlinal de rumbo aproximado E-W, con fallas normales y corrimientos de estratificación.

Cercano a la zona de estudio se visualiza la falla de Boconó considerada una de las más importantes en el cuadro tectónico de Venezuela Occidental, la cual según expresa Bellizzia (1972) fue descrita por primera vez por Rod (1956) como transcurrente dextral (figura 2.5). En cuanto a la zona de fallas de La Victoria, Morgan (1967, 1969) sugiere desplazamientos verticales de más de 1000 metros en la región de Valencia. Por su parte, Audemard, *et al.* (2000) reconocen a la falla de Guacamaya dentro del sistema de fallas de La Victoria e indica que se extiende desde Gamelotal hasta el noroeste del Lago de Valencia, con movimiento transcurrente dextral y una componente subvertical. Todas estas fallas antes mencionadas, surgieron en el Cuaternario, aproximadamente más de 1,600,000 años atrás.

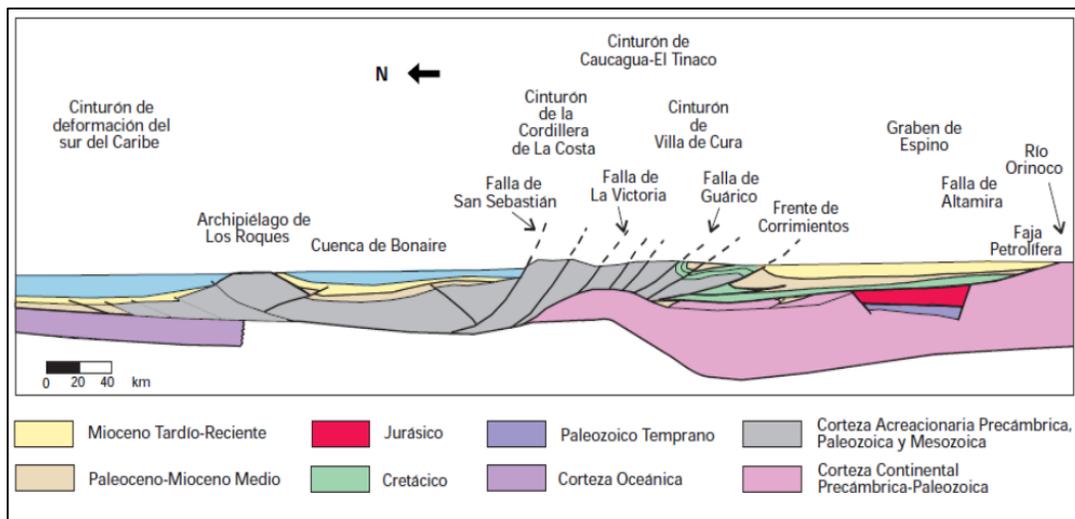


Figura 2.5 Corte geológico de norte-sur, que muestra las principales estructuras y sistemas de fallas predominantes en el ramal interior de La Cordillera de la Costa (Tomado y modificado de Yoris y Ostos, 1997).

2.3.1 Geología estructural de la subcuenca de Miranda

Ynfante (2017) indica que la zona de estudio se encuentra estructurada por fallas de alto ángulo cubiertas por sedimentos cuaternarios. Estas fallas tienen tres orientaciones preferenciales: las fallas de alto ángulo con orientación SW-NE, las de orientación SE-NW y las que se disponen casi de EW (figura 2.6).

El grupo de fallas de tendencia aproximada SW-NE, se ubican dentro de la zona aluvional desde el suroeste hacia el noreste. Además, también se puede observar la falla de alto ángulo que define el contacto entre los Esquistos Las Mercedes y el Complejo Nirgua. Las mismas presentan sectores cubiertos por sedimentos recientes (Baquero, 2015).

En cuanto a las fallas de alto ángulo con tendencia SE-NW, en la zona de estudio se observan dos. Una está ubicada hacia la zona más norte de la subcuenca, observándose solo una pequeña parte, la otra se observa en el noreste de la zona aluvional.

Por último, las fallas de alto ángulo con orientación aproximadamente E-W se identifican al noreste de la zona de estudio, cercanas a la población de Salom donde delimitan el contacto entre el Complejo Nirgua y Complejo San Julián.

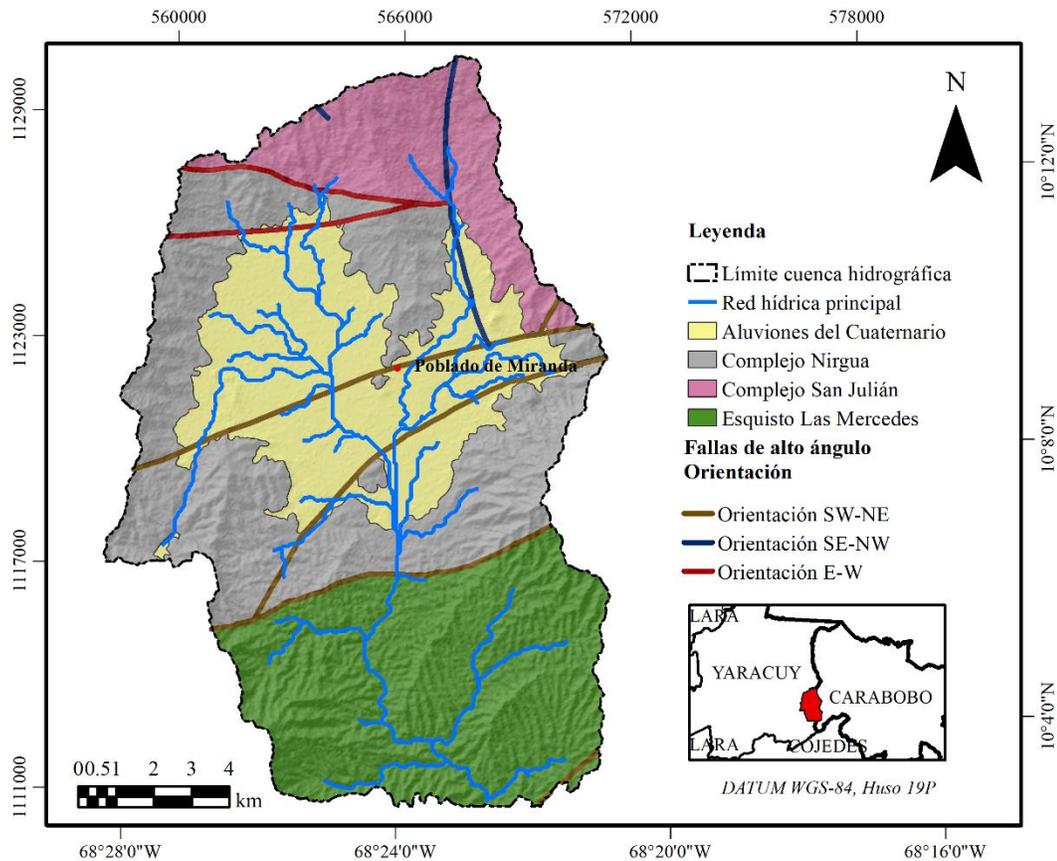


Figura 2.6 Mapa geológico y estructural de la subcuenca hidrográfica de Miranda, Edo. Carabobo y Yaracuy. Coordenadas UTM WGS 1984 (tomado y modificado de Ynfante, 2017).

2.4 Litología

La litología de la zona de estudio está conformada por el Complejo San Julián, la Fase Nirgua y los Esquistos Las Mercedes (figura 2.6).

2.4.1 Aluviones

La zona occidental de la Cordillera de la Costa presenta valles cuyo origen es de carácter tectónico, donde su contenido litológico principal es de sedimentos aluviales con espesores variables de hasta 400 metros (Tahal, 1970). Sin embargo, la información suministrada de los pozos productores de agua en la zona de estudio (tabla 5.1A), señala que existe un espesor máximo de 120 m.

El autor Gavotti (1973) señala que la litología de estos aluviones está conformada principalmente en cantos, guijarros, arenas, limos y arcillas. Además, Tahal (1970)

menciona que hacia los extremos de los valles estos sedimentos tienen una textura más gruesa mientras que en el centro de los valles se evidencia mayormente granos finos. Los procesos de transporte y sedimentación son de tipo aluvial fluvial originando conos de deyección, depósitos piedemonte y sedimentos de llanuras de inundación.

2.4.2 Complejo San Julián

El Complejo San Julián abarca desde la localidad del noroeste de Caracas, hacia el oeste hasta la zona de El Cambur en el estado Carabobo, y hacia el este hasta Cabo Codera en el estado Miranda. Según Urbani y Ostos (1989) las rocas preponderantes son el esquisto y gneis cuarzo-plagioclásico-micáceo, frecuentemente se nota una rápida gradación desde una textura esquistosa haciéndose la granulometría más gruesa hasta que pasa a rocas de carácter gnéisico. Las litologías minoritarias (menos del 5%) son mármol, cuarcita y diversos tipos de rocas metaígneas mayoritariamente máficas (como anfibolita, gabro, diorita, tonalita y granodiorita. Existe una amplia gama de litologías, aquellas más ricas en feldespatos corresponden a rocas metaígneas félsicas, mientras que aquellas esquistosas ricas en micas son producto de un protolito sedimentario y aquellos esquistos ricos en epidoto, actinolita \pm clorita son interpretados como producto del metamorfismo de horizontes volcánicos, probablemente tobas. El espesor no ha sido medido ni estimado.

2.4.3 Fase Nirgua (Complejo la Costa)

Aflora como una extensa franja desde la zona de Chivacoa en el estado Yaracuy, continuando hacia la zona de Morón - Puerto Cabello, estado Carabobo, prolongándose hasta estado Aragua y culminando cerca del poblado de La Sabana en el Distrito Federal. Bellizzia y Rodríguez (1967), incluyen en esta unidad a variados tipos litológicos como: esquisto cuarzo - micáceo, micáceo - grafitoso, mármol masivo, anfibolita eclogítica, anfibolita epidótica y granatífera, cuarcita, esquisto y gneis cuarzo - micáceo - feldespático. Las rocas carbonáticas se presentan en forma de lentes o capas continuas, bien expuestas en la carretera Nirgua - Chivacoa, estado Yaracuy. El mármol masivo contiene calcita (85%), muscovita (4%), grafito (3%) y cantidades menores de clinozoisita, zoisita, albita, pirita, prehnita, clorita y cuarzo. Algunos pequeños cuerpos

de mármol dolomítico se presentan asociados a bandas de esquisto cuarzo -tremolítico, cuarzo - muscovítico - clorítico - granatífero y anfibolita. El espesor no se ha determinado.

2.4.4 Esquistos Las Mercedes

El Esquisto las Mercedes va en toda la extensión y en los flancos del macizo central de la Cordillera de la Costa, entre Carenero, estado Miranda, hasta el estado Cojedes. Según Wehrmann (1972) la litología predominante consiste en esquisto cuarzo - muscovítico - calcítico - grafitoso con intercalaciones de mármol grafitoso en forma de lentes, que cuando alcanza gruesos espesores se ha denominado "Caliza de Los Colorados". La mineralogía promedio consiste en cristales de cuarzo (40%) dispuestos en bandas con la mica, muscovita (20%) en bandas lepidoblásticas a veces con clivaje crenulado, calcita (23%) en cristales con maclas polisintéticas, grafito (5%), y cantidades menores de clorita, óxidos de hierro, epidoto y ocasionalmente plagioclasa sódica. El mármol tiene una mineralogía casi en su totalidad calcita, escasa dolomita y cantidades accesorias de cuarzo, muscovita, grafito, pirita y óxidos de hierro. Seiders (1965), menciona, además, meta-areniscas puras, feldespáticas y cuarzosas, de estratificación de grano variable, a veces gradada.

CAPÍTULO III

ASPECTOS CLIMÁTICOS Y AMBIENTALES

3.1 Aspectos climáticos de Venezuela

3.1.1 Clima

Venezuela presenta un clima tropical sin época de frío acentuado o extremo y con pocas variaciones de temperaturas extremas. Las zonas de alta montaña, son las que tienen un clima más frío, por ejemplo, aquellas que se encuentran en los páramos andinos, la Cordillera Central y la Cordillera Oriental. Las zonas más calurosas del país se ubican a pocos metros sobre el nivel del mar o aún por debajo de ese nivel, por ejemplo, Maracaibo y Cabimas, Punto Fijo y Puerto Cabello. El clima de Venezuela puede ser clasificado por su índice hídrico (figura 3.1). Es importante destacar que la variabilidad interanual climática de la zona norte de Venezuela está controlada principalmente por El Niño Oscilación del Sur (ENSO) y en menor grado por la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y la Onda Tropical. (Martelo, 2003).

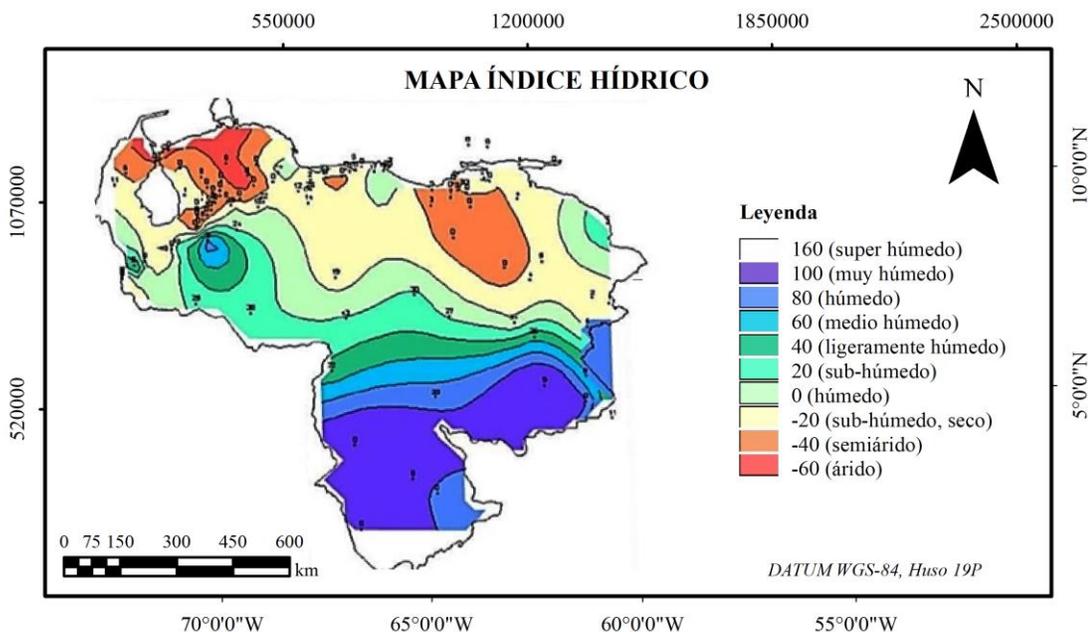


Figura 3.1 Distribución (1961-1990) de los tipos climáticos según Thornthwaite (tomado y modificado de Martelo, 2004).

Con respecto al régimen de precipitaciones en el país, se encuentran 4 estaciones diferenciadas: seco, transición seco-lluvioso, lluvioso y transición lluvioso seco (Durán y Bravo de Guenni, 2010). Sin embargo, en aplicaciones donde no es preciso la rigurosa diferenciación, las épocas de precipitación se clasifican en dos: seco y lluvioso (Martelo, 2003). Guenni *et al.* (2008) precisa que si las tasas de disminución de la precipitación (pendientes negativas) observadas en años recientes se mantienen en el futuro, en unos 50 años se proyecta una reducción de 50 a 100 mm de precipitación anual promedio en la zona norte costera y en gran parte de la región andina. En la figura 3.2 se observa como es la distribución de la precipitación a lo largo del territorio venezolano.

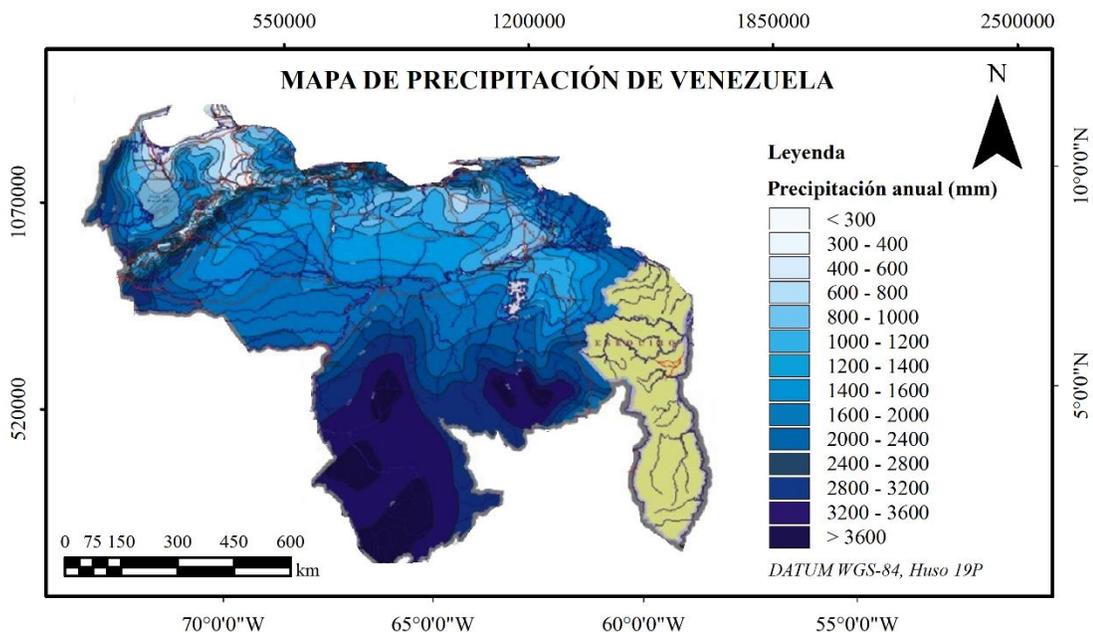


Figura 3.2 Mapa de precipitación media anual de Venezuela. Coordenadas UTM WGS 1984 (tomado y modificado de Venemia, 2020).

3.1.2 Relieve

El relieve de Venezuela se divide en tres grandes unidades: la región costero-montañosa, los Llanos y la Guayana.

La región costero-montañosa abarca toda la costa, al norte, y el enlace con los Andes por el oeste, a través de las sierras de Mérida y Perijá, que enlazan con la cordillera Oriental colombiana. Su pico más alto es el Bolívar, de 4978 metros.

Los Llanos se encuentran en el centro del país, entre las región costero-montañosa, al norte y el macizo de la Guayana al sur, con el río Orinoco como límite sur. Ocupa una tercera parte de la superficie del país. Es una región llana y pantanosa de muy difícil habitabilidad, por lo que permanece en condiciones naturales muy notables.

La Guayana es el macizo que se encuentra al sur y sudeste, ocupa casi la mitad del territorio. Es un basamento que ha sido erosionado hasta quedar convertido en una penillanura. Se extiende hacia el norte y hacia el suroeste (penillanura del Casiquiare). No obstante, gran parte de él se encuentra recubierto por la cobertera sedimentaria. Parte de esta cobertera se corresponde con los Llanos, pero otra está formada por areniscas, que han sido intensamente erosionadas, dejando en resalte amplias mesetas, como la de Roraima (pico Roraima 2810 m), Parima, Pacaraima y Auyantepuy que se eleva hasta los 2500 metros (figura 3.3).

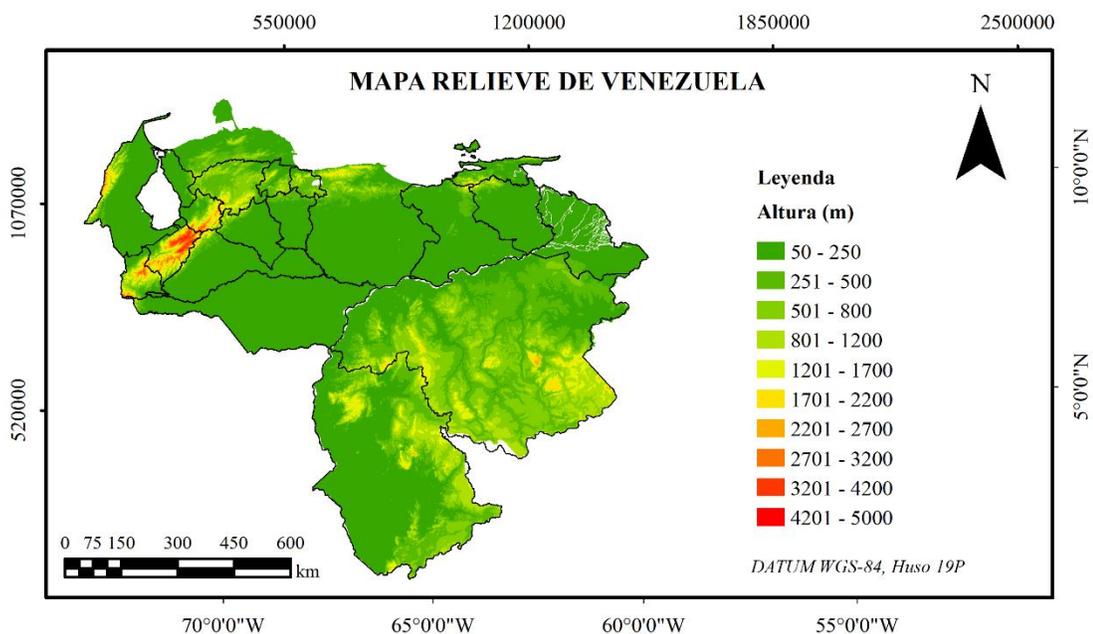


Figura 3.3 Mapa topográfico de Venezuela (tomado y modificado de Tapiquen, 2020).

3.1.3 Hidrografía

Venezuela es drenada por más de 124 ríos importantes, los cuales poseen cuencas mayores de 1000 km. El Orinoco es más grande de todos los ríos de venezolanos. Su curso es de 2200 km, a lo largo del cual drena una cuenca de 6300000 km², representando casi el 70% del territorio nacional. Pero hay otros grandes ríos en Venezuela, como el Apure, que se integra como tributario al Orinoco y cuyo curso, unido al del Arauca, suma 1750 km mientras drenan ambos una cuenca de 125000 km² (figura 3.4) (Hidrografía Nurr, 2014).

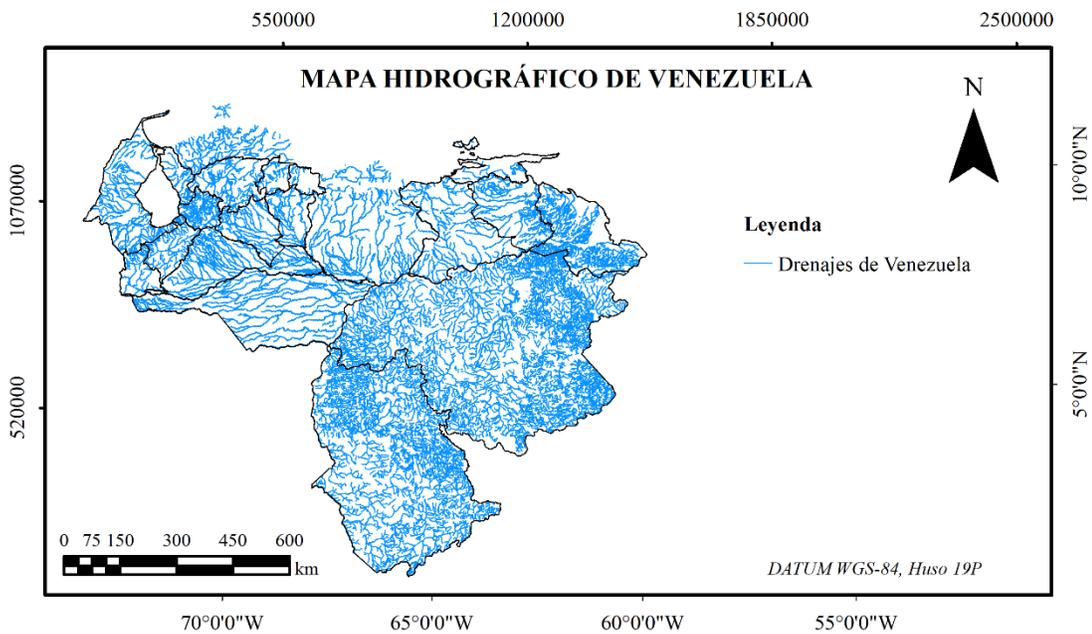


Figura 3.4 Mapa Hidrográfico de Venezuela. (tomado y modificado de Tapiquen, 2020).

3.1.4 Vegetación

La vinculación entre clima y vegetación se manifiesta en Venezuela de forma evidente. El país está considerado en la región de América Latina y el Caribe (LAC) como país megadiverso, y entre los 17 países del mundo que poseen tal diversidad biológica. En líneas generales se puede decir que, en Venezuela las formaciones vegetales dominantes son los bosques y las sabanas, mientras que la región costera está dominada por manglares y vegetación típica de climas secos o desérticos (ACFIMAN-SACC, 2018) (figura 3.5).

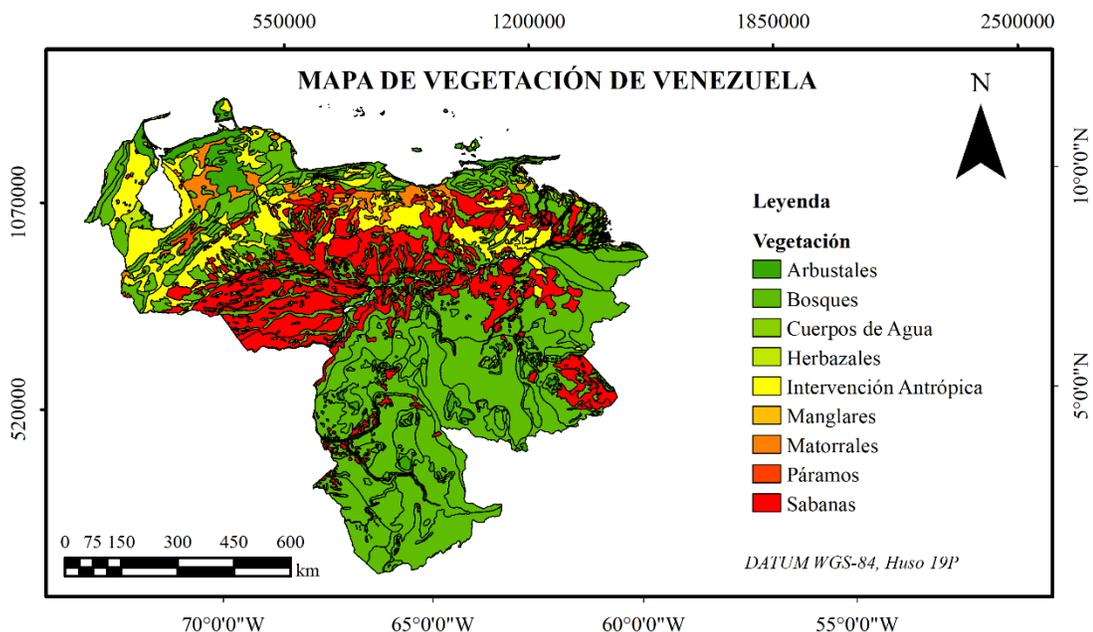


Figura 3.5 Mapa de vegetación de Venezuela. Coordenadas UTM WGS 1984 (tomado y modificado de Tapiquen, 2020).

3.2 Aspectos climáticos de la subcuenca de Miranda

3.2.1 Clima

Generalmente el clima de Miranda es el tropical, excepto las zonas más altas, que superan los 800 m, donde la temperatura es un poco más baja, alcanzando un clima subtropical. La temperatura promedio es de 26.6 °C, sólo aumenta unos pocos grados en épocas de sequía, mientras que las temperaturas bajas extremas, oscilan entre los 11°C y 12 °C. Las temperaturas medias más altas se dan en los meses de marzo 27.6 °C y abril 28.1 °C, que es cuando la zona alcanza un gran nivel de sequía (Vila, 1965).

El clima húmedo es el que predomina en la zona, los valores de pluviosidad oscilan entre los 1000 y 1400 mm anuales donde las lluvias comienzan generalmente en el mes de marzo y finalizan en noviembre, con un promedio mensual comprendido entre los 100 y 150 mm. Esto es uno de los factores principales para que la actividad agrícola sea muy común en la zona. Los vientos alisios predominan en el área, los cuales entran desde el noreste con una velocidad media anual de 2.3 m/s (Vila, *op. cit.*).

En la subcuenca de Miranda, se tienen valores de precipitación anual entre 725 mm a 1275 mm, presentando los valores más alto hacia el sureste de la zona de estudio (figura 3.6 Mapa de precipitación).

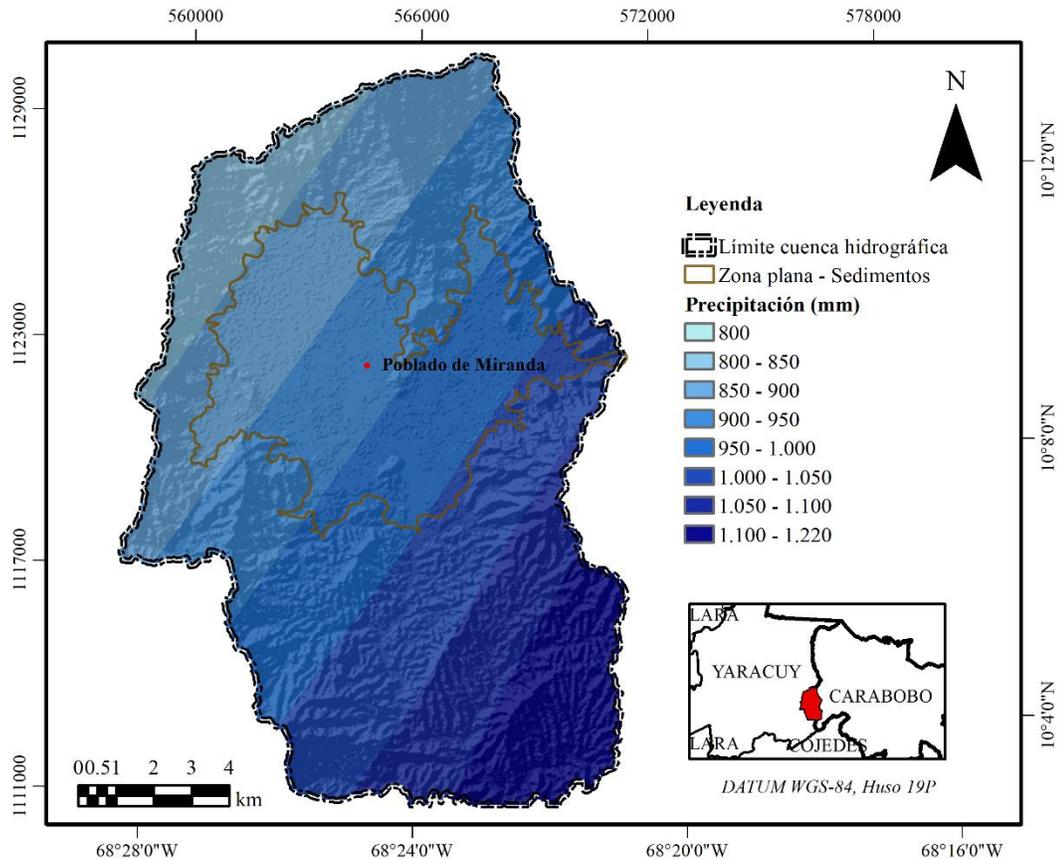


Figura 3.6 Mapa de precipitación de la subcuenca hidrográfica de Miranda. Edo. Carabobo y Yaracuy. Coordenadas UTM WGS 1984 (elaboración propia, datos recopilados del INAMEH, sf).

3.2.2 Relieve

La topografía se presenta en su mayor proporción ondulada, con pendiente dominante entre 20 y 25%. El paisaje predominante es de montañas, valles y colinas (con altitud máxima de 1540 m.s.n.m. en el topo El Cerro, y promedio 800 m.s.n.m.). El valle de Miranda representa un medio depositacional en forma de complejo coluvio-aluvial, poco propenso a inundaciones por lluvias moderadas, con un paisaje suavemente inclinado donde predominan pendientes promedio de 5%, en donde se asienta la localidad capital Miranda (Instituto Nacional de estadística, 2011) (figura 3.7).

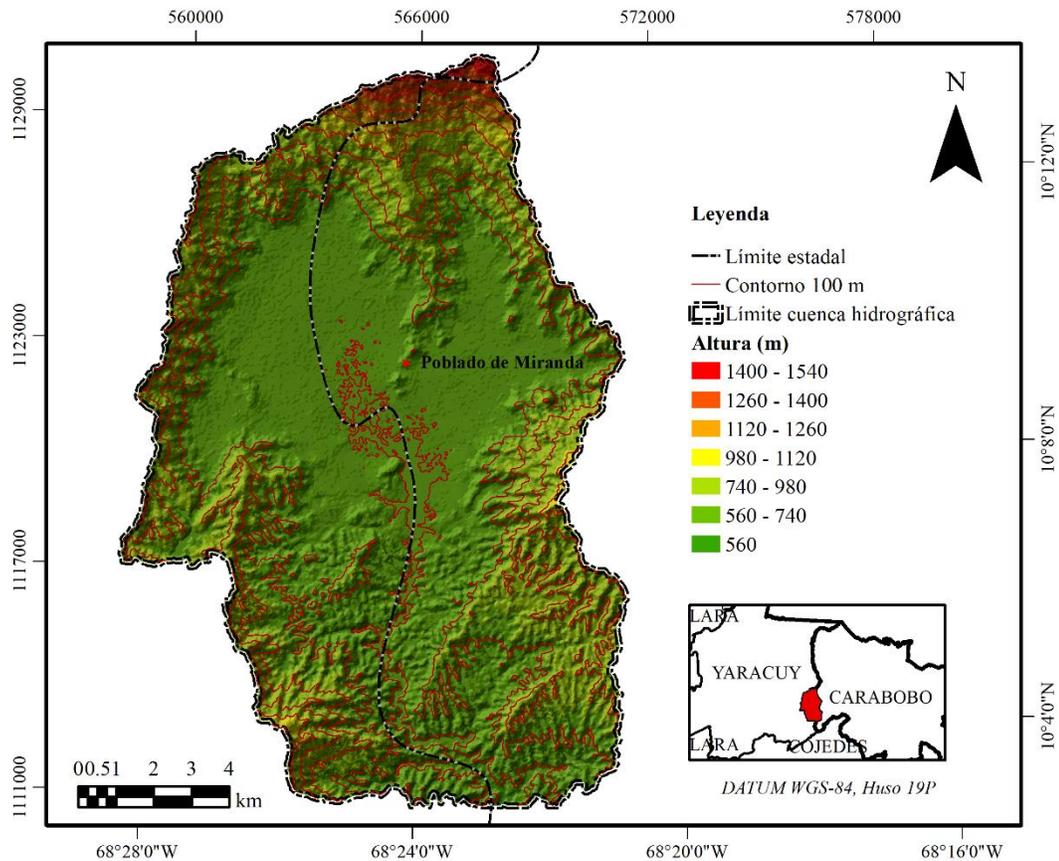


Figura 3.7 Mapa topográfico de la subcuenca hidrográfica de Miranda. Edo. Carabobo y Yaracuy. Coordenadas UTM WGS 1984 (elaboración propia).

3.2.3 Hidrografía

Los ríos principales en Miranda son el Onoto y el Tirgua los cuales tienen un régimen de caudal permanente (Instituto Nacional de estadística, 2011). La mayoría del aporte hídrico en esta subcuenca proviene de la Cuenca Alta del río San Carlos, ubicada en el extremo occidental del estado Carabobo, la cual abarca los municipios Bejuma, Juan José de Mora, Montalbán y Miranda, y se extiende hasta el estado Cojedes (municipio Falcón) con una superficie de 276000 hectáreas (Instituto Nacional de estadística, 2011) (figura 3.8). En la figura 3.9 se puede observar la distribución de los drenajes en la zona de estudio.

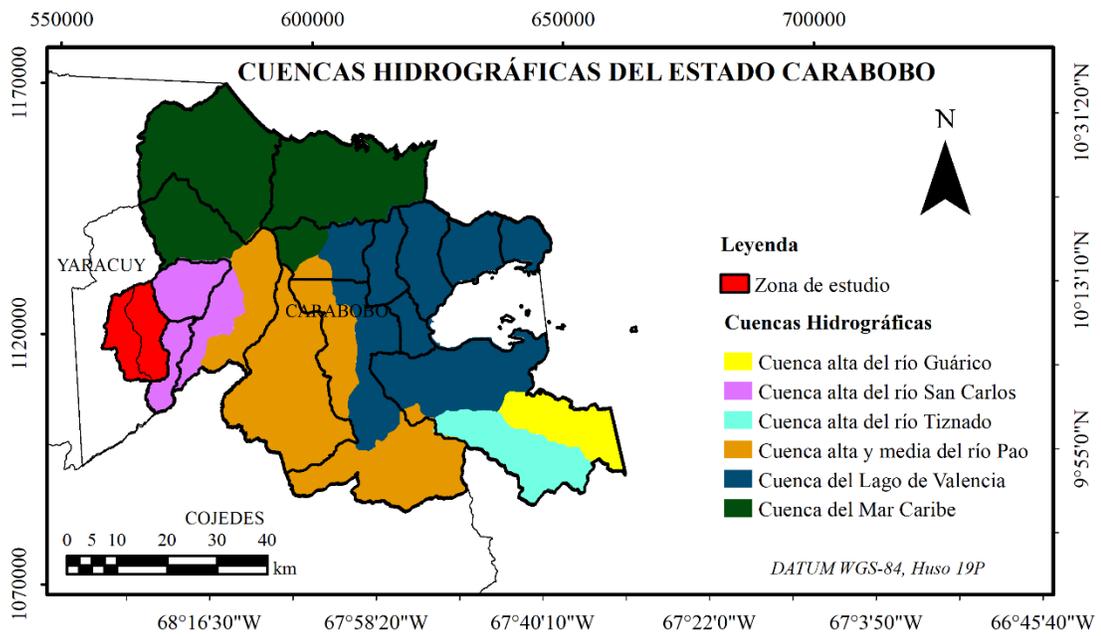


Figura 3.8 Zona que abarca la cuenca alta del río San Carlos. Coordenadas UTM WGS 1984 (tomado y modificado del Instituto Nacional de estadística, 2011).

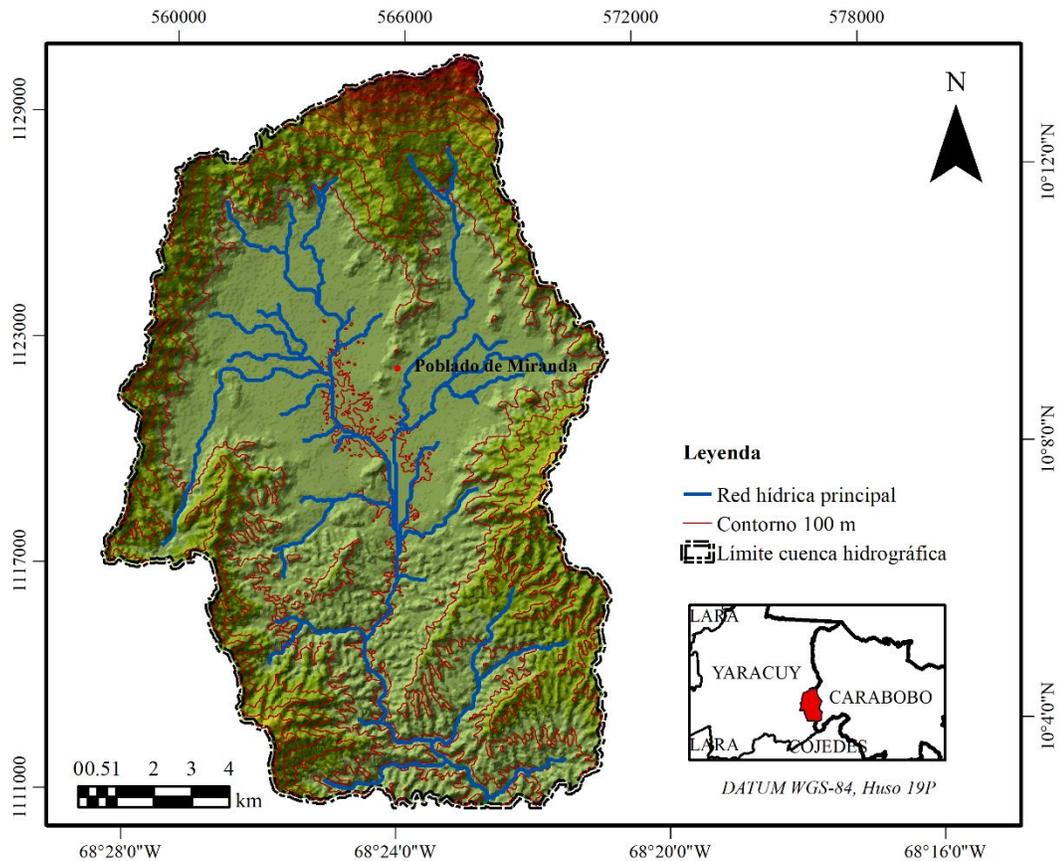


Figura 3.9 Mapa de drenajes de la subcuenca hidrográfica de Miranda. Edo. Carabobo y Yaracuy. Coordenadas UTM WGS 1984 (elaboración propia).

3.2.4 Vegetación

En la parte norte de la cordillera Central, a partir de los 400 a los 1500 m los bosques son más húmedos y su vegetación es más frondosa. Tanto en las montañas de Nirgua, como en las del sur del lago de Valencia hay bosques poblados con grandes árboles. De acuerdo al Instituto Nacional de Estadística (2011) la zona de vida corresponde a Bosque seco Pre montano. En la depresión central hay tierra de cultivo y sabanas para el pastoreo. En la costa, hay manglares y vegetación xerófila. Al noroeste, abundan grandes extensiones con cocoteros, desde Palma Sola, hasta el límite con Yaracuy La cobertura vegetal en la subcuenca de Miranda es baja (herbácea) con matorrales tropófilos deciduos y semi deciduos, encontrándose también comunidades leñosas densas entre 5 y 8 metros de alto. El uso agrícola es intenso, especialmente frutícola

hacia el valle principal. En general, en la subcuenca de Miranda predominan los matorrales, bosques y arbustales (figura 3.10).

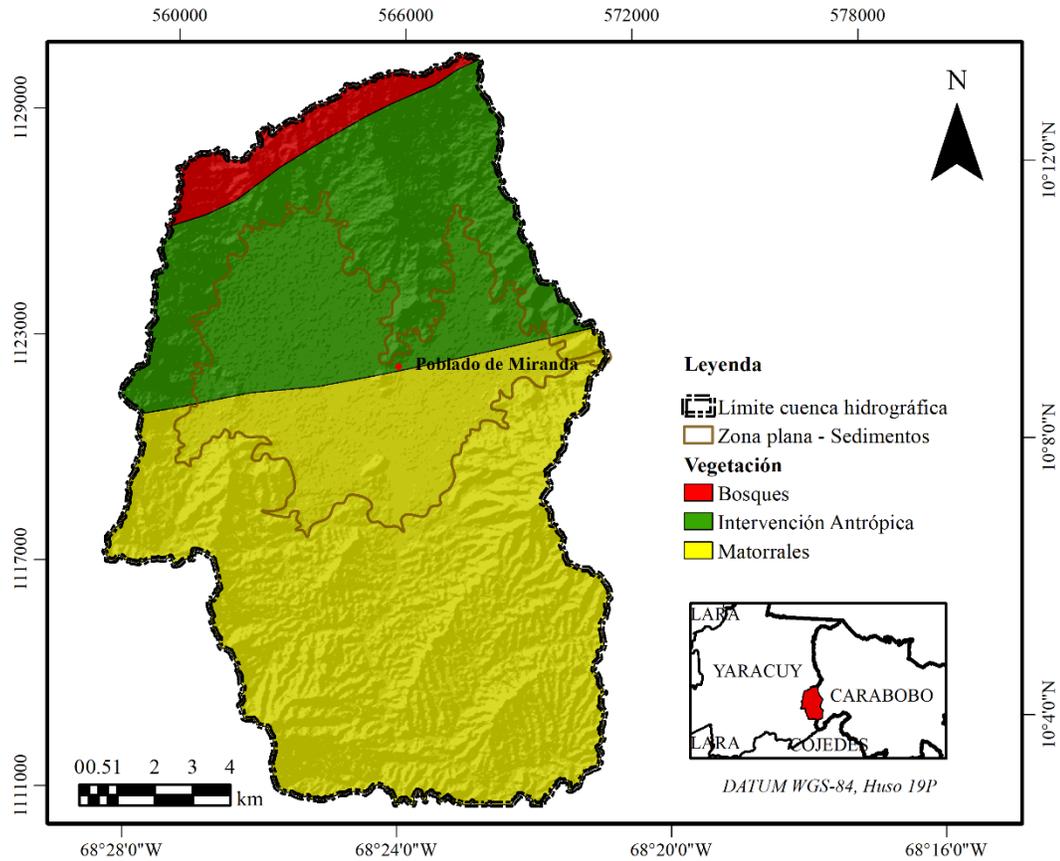


Figura 3.10 Mapa de vegetación de la subcuenca hidrográfica de Miranda, edo. Carabobo y Yaracuy. Coordenadas UTM WGS 1984 (tomado y modificado de Tapiquen, 2020).

CAPÍTULO IV

MARCO TEÓRICO

4.1 Aguas subterráneas

Se define como agua subterránea a aquellas que se acumulan como resultados de la infiltración del agua, generalmente meteórica, a través de una formación geológica con características físicas favorables, tales como: porosidad, permeabilidad y transmisividad, lo que permite su transporte, almacenamiento y extracción (Stanley, 1971).

4.2 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico se basa en definir el permanente movimiento o transferencia de las masas de agua, ya sea desde de un punto del planeta a otro, como hacia sus distintos estados (líquido, gaseoso y sólido). Está definido por dos causas principales: la energía solar y la gravedad (figura 4.1) (Ordoñez, 2011). El ciclo hidrológico se puede considerar como un sistema, cuyos componentes son: precipitación, evaporación, escorrentía, y las otras fases del ciclo (Guevara y Cartaya, 1991).

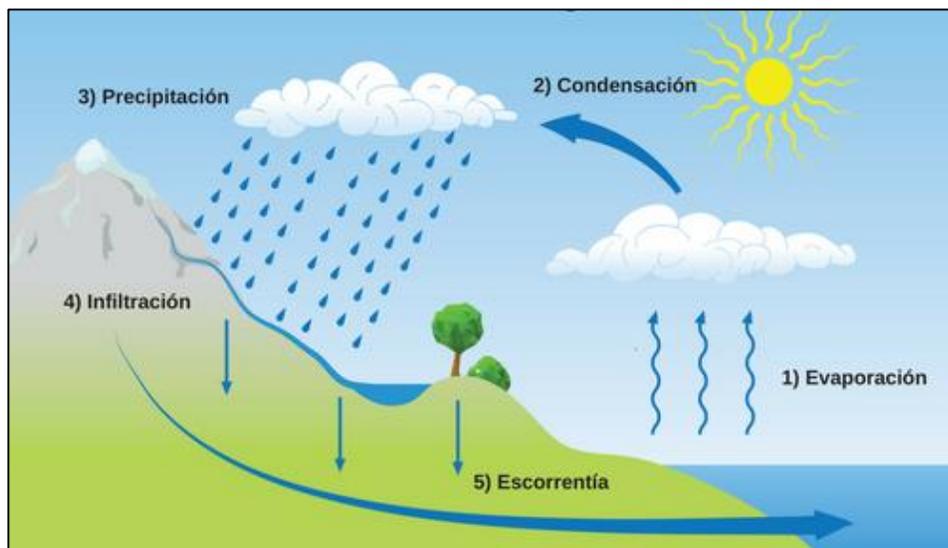


Figura 4.1 Representación del ciclo hidrológico (Significados, 2020).

4.2.1 Precipitación, evaporación, escurrimiento superficial y subterráneo

El agua de precipitación que alcanza la superficie terrestre escurre parcialmente como agua superficial (escurrimiento superficial), también una parte se infiltra en el subsuelo y escurre como agua subterránea (escurrimiento subterráneo). Las cantidades de escurrimiento dependen en alto grado de la precipitación: sin embargo, una gran parte de ella se pierde por la evaporación, la cual depende de la temperatura del lugar. El interflujo es la parte del escurrimiento superficial que se retarda por una vegetación densa y por su curso sobre los horizontes superficiales del suelo. El agua escurriendo en la superficie alcanza los cauces de arroyos y ríos. El agua subterránea en su mayor parte sale en manantiales y sigue escurriendo en los ríos como agua superficial (Werner, 1996).

4.3 Acuífero

Son el reservorio del cual se pueden extraer cantidades significativas de agua. Es aquel estrato o formación geológica que permite la circulación del agua por sus poros y/o grietas. Estas formaciones pueden estar conformadas por materiales geológicos muy variados como gravas de río, calizas muy agrietadas, areniscas porosas poco cementadas, arenas de playa (Fortunecity, 2010). En la figura 4.2 se observa un el ejemplo de un acuífero.

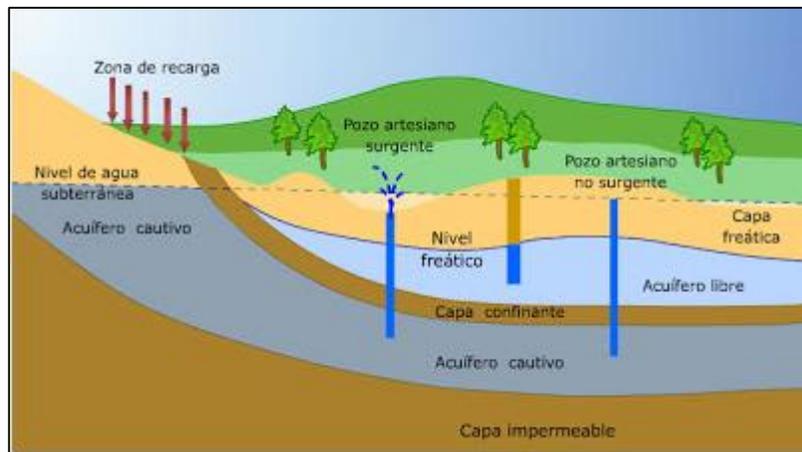


Figura 4.2 Acuífero (tomado de Apus de Agua, 2014).

El agua subterránea se acumula en acuíferos. Estos tienen características particulares que permiten el movimiento del agua a través de ellos bajo ciertas condiciones especiales. Las formaciones de agua (en forma de capas, estratos o depósitos) son capaces de almacenar grandes cantidades de agua; un ejemplo son las arcillas, que pueden contener agua, pero no la pueden transmitir.

Cuando una roca o suelo tiene espacios libres que no están ocupados por minerales sólidos, estos espacios son ocupados por el agua subterránea y reciben el nombre de espacios vacíos, intersticios o poros. Estos poros pueden actuar como conductores del agua y están caracterizados por su tamaño, forma, irregularidad y distribución. Existen dos tipos de poros: los poros primarios que se crean en los procesos geológicos que rigen el origen de la formación geológica, se pueden encontrar en las rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas. Por otra parte, se encuentran los poros secundarios, que se desarrollan una vez que la roca ha sido formada, a partir de fracturas, soluciones originadas por disolución, así como las formadas por los animales y las plantas (Custodio y Llamas, 1983).

4.4 Tipos de acuífero

Los acuíferos pueden ser clasificados a partir de distintos criterios: según las características litológicas pueden ser detríticos o carbonatados; según el tipo de huecos se encuentran los porosos, kársticos, fisurados y según la presión hidrostática: libres, confinados, semiconfinados, emperchados y semilibres.

4.4.1 Según las características litológicas o tipo de porosidad

Una de las formas de clasificar los acuíferos es según su contenido litológico y el tipo de porosidad que presenta en la cual se almacena el agua subterránea (figura 4.3).

- Acuíferos detríticos

Son acuíferos de rocas o sedimentos detríticos. Su permeabilidad se debe a la porosidad intergranular (de tipo primario). Si las rocas están parcialmente consolidadas o cementadas, la porosidad puede ser además de tipo secundario,

por fisuración, disolución. Son todos los materiales con tamaño de grano de arena: arenas, arcosas, areniscas, gravas, conglomerados, etc. (Hispagua, 2020).

- Acuíferos fisurados y/o kársticos

Se corresponde con acuíferos en rocas carbonatadas (calizas/dolomías) o bien otro tipo de rocas que presenten diaclasado, fracturación y/o disolución (rocas ígneas, metamórficas, detríticas bien consolidada). Poseen permeabilidad debida a grietas y fisuras, tanto de origen mecánico como de disolución. Se encuentran entre las calizas, dolomías, yesos, granitos, basaltos, siendo los dos primeros los tipos más importantes (Hispagua, 2020).

- Acuíferos mixtos

Su porosidad se debe a un conjunto de todas las anteriores causas. Un ejemplo pueden ser las arenas calcáreas o calcarenitas (Hispagua, 2020).

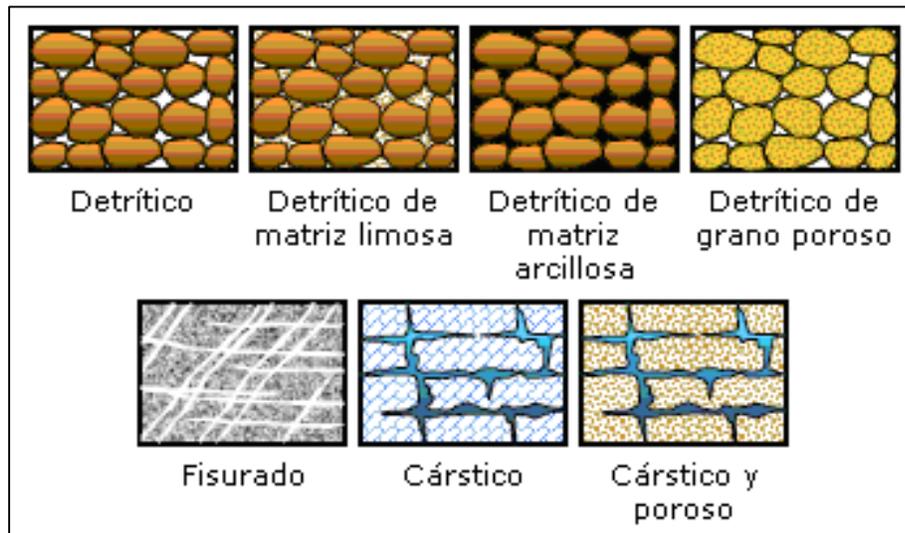


Figura 4.3 Tipos de acuíferos según las características litológicas. Sistema Integrado de Información del Agua (Hispagua, 2020).

4.4.2 Según la presión hidrostática

Según el autor Stanley (1971) los acuíferos a parte de sus implicaciones litológicas, pueden ser catalogados de acuerdo a la presión hidrostática del agua encerrada en los mismos. En este sentido los acuíferos pueden definirse como:

acuíferos libres, acuíferos freáticos o no confinados, acuíferos confinados o artesianos, acuíferos semiconfinados, acuíferos emperchados y semilibres, los cuales son descritos con mayor detalle a continuación (figura 4.4):

- Acuíferos libres, freáticos o no confinados

Son aquellos en donde existe una superficie libre del agua encerrada en ellos, que está en contacto directo con el aire y, por lo tanto, a la presión atmosférica. Esa superficie tiene una profundidad que puede oscilar libremente de acuerdo al ciclo climático; es decir, de acuerdo a las lluvias y a la recarga asociada a estas (Stanley, 1971).

- Acuíferos confinados o artesianos

En el acuífero confinado el agua está sometida a una cierta presión, superior a la atmosférica y ocupa totalmente los poros de la formación. Por ello, durante la perforación de los pozos en acuíferos de este tipo, al atravesar el techo del mismo se observa un ascenso rápido del nivel del agua, hasta estabilizarse a una altura determinada (figura 4.5) (Stanley, 1971).

- Acuíferos semiconfinados

Los acuíferos semiconfinados o semicautivos, se tienen cuando una de las barreras, el techo o el piso, que encierra al acuífero no es totalmente impermeable, sino un acuitardo; es decir, un material que permite la filtración vertical del agua, de manera muy lenta, de tal forma que alimente a otro acuífero principal (Stanley, 1971).

- Acuíferos emperchados

Por su parte, los acuíferos emperchados son definidos por Stanley (1971), como aquellos característicos de formaciones compuestas por intercalaciones de materiales de grano fino, dentro de una secuencia constituida predominantemente por materiales granulares gruesos. En estos casos los lentes

finos actúan como “un paraguas” generando una zona “saturada” por encima del lente impermeable que define el nivel freático emperchado o colgado.

- Acuíferos semilibres

Según Stanley (1971) los acuíferos semilibres representan una situación intermedia entre un acuífero libre y uno semiconfinado. En este caso, la capa confinante superior es un estrato semipermeable o acuitardo, de características tales que la componente horizontal del flujo no puede ignorarse.



Figura 4.4 Tipos de acuíferos según las presiones hidrostáticas. (Hispaqua, 2020).

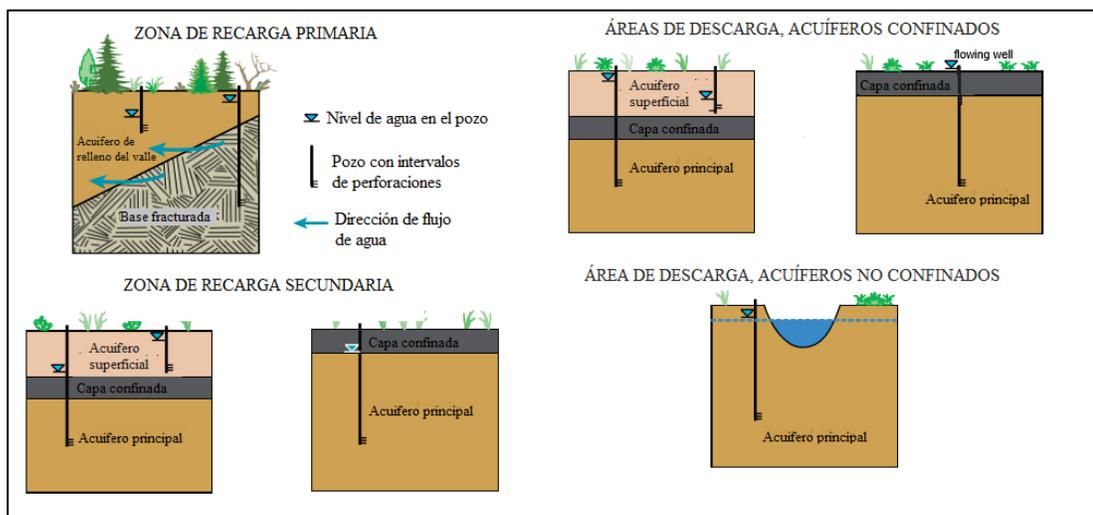


Figura 4.5 Esquema de acuíferos confinados y no confinados (tomado y modificado de Sanders L., 1998).

4.5 Formaciones geológicas según su hidrogeología

A diferencia de las estratigráficas, en hidrogeología se definen de acuerdo con la capacidad de almacenamiento y transmisión de aguas subterránea, las cuales se describen a continuación:

4.5.1 Acuífero

Castany (1972) lo define como un estrato o formación geológica con suficiente porosidad y permeabilidad para permitir la acumulación y circulación del agua.

4.5.2 Acuicludo

Formación porosa e impermeable, que contiene agua, incluso hasta la saturación, pero no la transmite y, por tanto, no es posible su explotación. Pueden constituir los límites de los acuíferos (Hispagua, 2020).

4.5.3 Acuitardo

Formación geológica semipermeable que, conteniendo agua, la transmite muy lentamente, por lo que no son aptas para el emplazamiento de captaciones de agua; sin embargo, bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de acuíferos que puede llegar a ser importante (Hispagua, 2020).

4.5.4 Acuífugo

Formación geológica con porosidad nula y por lo tanto sin capacidad para almacenar agua ni transmitirla. Pueden constituir los límites de los acuíferos (Hispagua, 2020).

En la tabla 4.1 se describen las características más generales según el tipo de acuífero

Tabla 4.1 Características hidrogeológicas según el tipo de acuífero (Tomado y modificado de Rebollo, 2015).

Clasificación geológica	Gravas limpias	Gravas y arenas, arenas gruesas	Arenas finas o con mezcla de limos	Limo, limo arenoso, arenas arcillosas, gravas arcillosas o limosas	Material poco poroso y/o saturado	Arcilla, limos, arcilla arenosa, arcilla gravosa	Granitos, esquistos o arcilla compacta
Clasificación hidrogeológica	Buen acuífero		Acuífero pobre	Acuitardos		Acuicludo	Acuífugo
Resistividad	50-500 Ω .m			50-20 Ω .m	500-5000 Ω .m	20-0 Ω .m	> 5000 Ω .m
Permeabilidad	Muy permeable	Algo permeable	Poco permeable		Muy poco permeable	Impermeable	
Porosidad	Alta o moderada			Alta o moderada		Alta	Nula o muy baja

4.6 Características hidrogeológicas de un acuífero

De acuerdo a los autores Mosquera y Parravano (2005), la productividad de un acuífero depende de sus características geológicas, hidrogeológicas y de los factores de flujo de las aguas subterráneas. Las características hidrogeológicas de un acuífero están ligadas esencialmente a las propiedades físicas de la roca-almacén, las cuales principalmente son la porosidad, permeabilidad y transmisividad.

Según Stanley (1971) la porosidad es una de las propiedades fundamentales de los acuíferos, tratándose de la particularidad que tienen las rocas y los suelos de contener espacios vacíos. Las rocas no son completamente sólidas, ya que éstas poseen grietas o espacios intergranulares y el conjunto de estas aberturas o intersticios se le llama porosidad; sin embargo, esto no define la existencia de un acuífero, ya que estos poros deben estar interconectados para poder permitir la acumulación y extracción del agua; característica que se ve afectada por los factores siguientes: grado de compactación del material, forma y arreglo de las partículas y su gradación, las cuales son independientes del tamaño de las mismas. Un ejemplo sencillo es la arcilla, tiene una porosidad alta, sin embargo, no permite la extracción de agua debido a que es poco permeable y sus poros no se encuentran interconectados (Arocha, 1980).

González de Vallejo (2002), define la permeabilidad como la propiedad que permite evaluar la capacidad de transmitir agua de una formación en función de la textura de la misma, sin relacionarla con su estructura o forma geométrica. Entonces, la permeabilidad vendría siendo el volumen de fluidos que en un tiempo dado puede atravesar un área o sección determinada de roca o suelo, bajo una presión dada.

La permeabilidad por sí sola no es indicativa de una buena transmisividad del agua en una formación, ya que un acuífero muy permeable, pero de poco espesor, no será capaz de generar suficiente caudal para que sea eficientemente aprovechable.

4.7 Depósitos aluviales

El autor Astier (1975), en su estudio menciona que las formaciones acuíferas más explotadas en el mundo son los depósitos aluviales formados por arenas, gravas y guijarros. La edad de estos depósitos varía del cuaternario reciente al Plio-Mioceno; pueden ser de origen fluvial, glacial o marino.

Para conocer las características de un acuífero por medio de la prospección eléctrica y sísmica es necesario considerar los siguientes aspectos:

4.7.1 Espesor de los limos arcillosos superficiales

Determinar el espesor de los limos arcillosos superficiales por medio de sondeos eléctricos es poco complicado, dado que su resistividad casi siempre es cuatro veces menor que la de los aluviones acuíferos. En ocasiones se produce un aumento progresivo del contenido de arena de los limos con la profundidad, lo que puede provocar un error por defecto en el espesor. La sísmica de refracción no proporciona ninguna información acerca del espesor de los limos, ya que la velocidad de éstos es similar, o mayor que la de los aluviones de grano más grueso, según que sean acuíferos o no.

4.7.2 Profundidad de la capa acuífera

La determinación de la profundidad de la capa acuífera por sondeos eléctricos se puede realizar en los dos casos siguientes:

- La capa está saturada bajo los limos arcillosos superficiales, entonces la profundidad del agua es igual al espesor de los limos.
- El acuífero es libre y el espesor de los aluviones acuíferos es grande con relación al de los aluviones secos. En el caso de la capa libre, la presencia de lentejones arcillosos en el seno de los aluviones de grano grueso pueda ser causa de errores, ya que puede confundirse aluviones secos-arcilla-aluviones secos con un aluvión seco-aluviones acuíferos, induciendo a creer equivocadamente la existencia de agua a poca profundidad.

Por sísmica de refracción se puede determinar la profundidad de la capa acuífera si no existen limos superficiales y si el espesor de los aluviones acuíferos es suficiente. La presencia de intercalaciones arcillosas puede ser causa de error ya que el contacto sísmico puede corresponder en algunos puntos a la superficie del acuífero y en otros a la interfaz aluviones secos-arcillas ya que la velocidad en los lentejones arcillosos es siempre muy similar a la de los aluviones acuíferos.

4.7.3 Calidad de los aluviones

La calidad de los aluviones se estudia principalmente por prospección eléctrica. Los sondeos eléctricos permiten no sólo la localización de los lentejones arcillosos gruesos en el seno de los aluviones, sino que, además, proporcionan información sobre las características de los aluviones permeables. Si la permeabilidad de los aluviones depende fundamentalmente de su contenido en arcillas, aquella será tanto mayor cuanto más elevada sea la resistividad de los aluviones. Si los aluviones no son arcillosos y si la resistividad del agua permanece constante, su porosidad es tanto mayor cuanto menor sea su resistividad.

4.8 Recarga natural

Es el volumen de agua que entra en un acuífero durante un período de tiempo, debido a la infiltración de las precipitaciones o de un curso de agua. Mientras más profundos

sean los pozos que se encuentren en áreas de recarga, a mayor profundidad se encontrará su nivel del agua (Castany, 1972).

4.9 Descarga natural

Es el volumen de agua que sale de un embalse subterráneo, en un período de tiempo determinado. Este puede salir a través de manantiales terrestres, ya sean subfluviales o submarinos, así como también por evapotranspiración si la zona saturada se encuentra muy cerca de la superficie (Castany, 1972).

4.10 Nivel freático y nivel piezométrico

Según el autor Stanley (1971) el nivel freático corresponde a la profundidad a la que se encuentra el agua subterránea en un acuífero libre. En éste nivel la presión de agua del acuífero es igual a la presión atmosférica. En cambio, el nivel piezométrico es el lugar geométrico donde se encuentran los puntos que indican la carga hidráulica en un acuífero, referida a un mismo plano de referencia, para ello, se toma como nivel de referencia el mar (figura 4.6).



Figura 4.6 Diferencia entre nivel piezométrico y nivel freático. Tomado y modificado de (Angelone, 2006).

4.11 Morfometría e hipsometría

Según los autores Gaspari *et. al.* (2012) las propiedades morfométricas de una cuenca hidrográfica suministran una descripción física con la cual se pueden realizar comparaciones entre distintas cuencas hidrográficas. La morfometría de cada cuenca hidrográfica, ante eventos climáticos, está relacionada con la posibilidad de

aprovechamiento de recursos hídricos y con la generación de una respuesta a los mismos, como la escorrentía superficial expresada en términos de caudales, la incidencia en el transporte de sedimentos y nutrientes a lo largo de los ecosistemas que la integran. Para realizar un análisis morfológico se deben tomar en cuenta los siguientes parámetros descritos por Gaspari (op.cit) y Reyes (2020):

- Perímetro (P)
Se refiere geoméricamente a la longitud en kilómetros de la línea que limita la cuenca hidrográfica, a lo largo de la divisoria de aguas topográficas.
- Área (A)
Se considera el área de una cuenca hidrográfica como la superficie en km² encerrada por la divisoria de aguas.
- Longitud máxima (Lmax)
Distancia que hay entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca.
- Longitud del cauce principal (Lcp)
Longitud total del río principal, desde su punto más lejano de la cuenca hasta la desembocadura del mismo.
- Ancho de la cuenca (Ac)
Se refiere a la relación entre el área de la cuenca hidrográfica y su longitud transversal (longitud máxima).
- Altura máxima (Hmax)
Cota más alta en metros registrada dentro del perímetro de la cuenca.
- Altura mínima (Hmin)
Cota más baja en metros registrada dentro del perímetro de la cuenca.
- Desnivel altitudinal (DA)
Es el valor que surge de la diferencia de altura entre la cota más alta y más baja registrada dentro del perímetro de la cuenca.
- Factor de forma (IF)
Es un factor adimensional que indica cómo se regula la concentración del escurrimiento superficial en la cuenca hidrográfica. Se expresa como la relación

entre el ancho promedio de la cuenca y su longitud máxima (Jardí, 1985; Henaos, 1988). Una cuenca de forma redondeada posee un valor de IF cercano a 1, mientras que una cuenca con un IF bajo, se caracteriza por ser una cuenca alargada y es menos propensa a la precipitación intensa, estando sujeta a crecientes de menor magnitud, que un área de igual tamaño con un factor de forma mayor (Henaos, *op. cit.*). En la tabla 4.2 se puede observar los valores establecidos por el autor Horton (1932) para el factor de forma.

Tabla 4.2 Valores interpretativos del factor de Forma (Horton, 1932)

Rango de valores	Forma de la cuenca
<0.22	Muy alargada
0.22-0.3	Alargada
0.3-0.37	Ligeramente alargada
0.37-0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45-0.60	ligeramente ensanchada
0.60-0.80	Ensanchada
0.80-1.20	Muy ensanchada
>1.20	Rodeando el desague

- Coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc)

Es una cantidad adimensional que relaciona al perímetro de una cuenca con el perímetro de un círculo teórico, cuya área es equivalente al de la cuenca (Gaspari *et al.*, 2012). Se expresa como una relación entre el perímetro (P) y el área (A) de la cuenca, por medio de la siguiente ecuación:

$$k_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (4.1)$$

En donde P es el perímetro y A es el área de la cuenca. En la tabla 4.3 se observa el rango establecido por el autor Campos (1992) para el índice de compacidad de una cuenca. Si su valor se acerca más a 1 indica que la cuenca tiene una forma parecida a la de un círculo teórico; por el contrario, si su valor es mayor a 1, tenderá a ser más rectangular.

Tabla 4.3 Índice de compacidad (Campos, 1992).

Índice de Compacidad	Forma de la cuenca
1.0-1.25	Casi redonda a oval-redonda
1.26-1.50	Oval-redonda a oval-oblonga
>1.51	Oval-oblonga a rectangular-oblonga

- Coeficiente de circularidad (Cc)

Indica el grado de redondez o alargamiento de la cuenca. Es una cantidad adimensional, por lo cual varía entre 0 y 1. Los valores de Cc cercanos a 1 indican la presencia de cuencas con geometría ensanchada, mientras que valores cercanos a 0, indican cuencas con geometría alargada. Este coeficiente se puede estimar mediante la ecuación:

$$C_c = 4\pi \frac{A}{p^2} \quad (4.2)$$

- Pendiente media de la cuenca (Pm)

Se obtiene al dividir el desnivel altitudinal entre la longitud máxima de la cuenca. El proceso de degradación a que se ve sometida una cuenca hidrográfica, al igual que el caudal máximo, están muy influenciados por la configuración topográfica, debido a que el poder erosivo se manifiesta en mayor o menor grado de acuerdo con los distintos grados de pendiente (Henaos, 1988). Según el autor Heras (1972), la pendiente media se puede clasificar según la tabla 4.4

Tabla 4.4 Cuantificación de la superficie por rangos de pendiente (Heras, 1972).

Rango de pendiente (%)	Tipo de Terreno
0-2	Llano
2-5	Suave
5-10	Accidentado medio
10-15	Accidentado
15-25	Fuertemente accidentado
25-50	Escarpado
>50	Muy escarpado

- Longitud total del drenaje (Ln)
Longitud en kilómetros definida con la sumatoria de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca.
- Densidad de drenaje (Dd)
Está definida para cada cuenca como la relación entre la suma de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca con respecto al área de la misma. Mientras mayor sea la densidad del drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta.
- Número de cauces de orden 1 (Nc)
Es el número total de cauces principales que se conforman en las cabeceras de la cuenca.
- Coeficiente de torrencialidad (Ct)
Índice que mide el grado de torrencialidad de una cuenca, por medio de la relación entre el número de cauces de orden 1 (Nc) y el área total de la cuenca. Mientras mayor sea el valor de Ct, habrá mayor grado de torrencialidad.
- Pendiente del cauce (Sc)
Relación entre el desnivel altitudinal del cauce y la longitud total del drenaje principal (Ln).
- Relación de elongación
se define como la relación entre el diámetro de un círculo que posea la misma área de la cuenca y cuyo diámetro sea igual la longitud de la cuenca y su formulación matemática es la siguiente:

$$Re = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{L} \quad (4.3)$$

El valor de la relación de elongación se acerca a la unidad cuando la cuenca es muy plana y circular, cuando la cuenca es plana con porciones accidentales, la relación de elongación está entre 0.5 y 0.8.

4.11.1 Curva hipsométrica

Es una curva que describe el estado de evolución de una cuenca hidrográfica mediante un gráfico de dos ejes, donde la ordenada representa las alturas relativas y la abscisa corresponde al área relativa de la cuenca. Esta curva tiene forma sigmoideal: es cóncava hacia arriba en la parte superior y convexa en la parte inferior. El grado de sinuosidad es muy variable, igual que la pendiente en el punto de inflexión. Cuando las curvas hipsométricas presentan variaciones, ya sea por apartarse de las teóricas o por presentar más de un punto de inflexión, pueden relacionarse con controles tectónicos o litológicos particulares (Racca, 2007).

4.12 Sistema de Información Geográfica (SIG)

ESRI (2020), define el SIG como un sistema empleado para describir y categorizar la Tierra y otras geografías con el objetivo de mostrar y analizar la información a la que se hace referencia espacialmente. Este trabajo se realiza fundamentalmente con los mapas. El objetivo de SIG consiste en crear, compartir y aplicar útiles productos de información basada en mapas que respaldan el trabajo de las organizaciones, así como crear y administrar la información geográfica pertinente. Los mapas representan colecciones lógicas de información geográfica como capas de mapa. Constituyen una metáfora eficaz para modelar y organizar la información geográfica en forma de capas temáticas. Asimismo, los mapas SIG interactivos ofrecen la interfaz de usuario principal con la que se utiliza la información geográfica.

El autor Guartatanga (2013) señala que dentro de los Sistemas de Información Geográfica podemos encontrar dos tipos de archivos cartográficos, los vectoriales y los ráster.

En el modelo vector, la información se representa sobre puntos, líneas y polígonos y se almacena como una colección de coordenadas (x, y). La ubicación de una característica puntual puede describirse con un solo punto, las características lineales se almacenan como un conjunto de puntos y finalmente las características poligonales, pueden guardarse como un circuito cerrado de coordenadas.

En cambio, en el modelo raster, el mapa se representa a base de celdas o píxeles de formas rectangulares. A cada una estas celdas se le asignan un valor, sin considerar explícitamente los objetos geográficos, sino que éstos surgen de la ordenación espacial de los valores de los píxeles. Un elemento importante a tomar en cuenta es el tamaño del píxel ya que tiene asociado el número total de filas y columnas de toda la cuadrícula, que a su vez se relaciona directamente con la escala y resolución espacial del mapa.

4.12.1 Base de datos geoespacial

Las bases de datos son imprescindibles en trabajos de SIG profesional. Una base de datos geoespacial hace posible que la información geográfica se almacene en un formato estructurado que simplifica la administración, la actualización, la reutilización y el uso compartido de los datos. El Software ArcGIS permite diseñar, crear, mantener y utilizar las bases de datos geoespaciales, tanto si se es un usuario individual como si se trabaja en una gran empresa, estas son las más expansivas y el componente de más larga vida de un Sistema de Información Geográfica (SIG) y uno de los más importantes (Hernández, 2015).

4.12.2 Sistema de información geográfica para búsqueda de aguas

Hay una serie de fortalezas que las tecnologías SIG aportan a la investigación de los recursos hídricos. Los objetivos de muchos estudios de cuencas hidrográficas incluyen la segmentación de cuencas hidrográficas, la identificación de divisiones de drenaje y la red de canales, la caracterización de la pendiente y el aspecto del terreno, la configuración de la cuenca y el enrutamiento del flujo de agua. Los SIG han sido una alternativa sencilla para producir estos datos, hacer mapas y proporcionar visualizaciones simples o complejas de los resultados del modelo (Lyon, 2003).

Razandi *et al.* (2015) y Jha *et al.* (2010) indican que en muchos países la determinación del potencial acuífero realiza por métodos tradicionales mediante perforaciones que son demasiado costosas, consumen tiempo y requieren profesionales expertos. En cambio, el uso del Análisis de Decisión Multi-Criterio (ADMC) por medio del uso de un SIG, representa una

herramienta efectiva para la gestión de recursos de agua subterránea (Jha *et al.*, 2010). De acuerdo a Razandi *et al.* (2015) las zonas potenciales para la explotación de aguas subterráneas pueden ser determinadas utilizando un SIG, el cual es ampliamente aplicado, especialmente en países en desarrollo y de bajos ingresos económicos. De acuerdo a estos autores, los mapas de zonas potenciales para la exploración de aguas subterráneas pueden ser empleados como recursos útiles para la planificación del manejo de las aguas subterráneas, como parte de la gestión integral de los recursos hídricos. Así también Teeuw (1995) evaluó la ventaja económica de usar imágenes satelitales y SIG para obtener áreas de prospección de aguas subterráneas, usando las propiedades de permeabilidad primaria de las rocas, verificando sus datos con sondeos geofísicos y perforaciones en Ghana.

4.13 Percepción remota o teledetección espacial (TE)

La teledetección es una técnica que permite la adquisición de datos de la superficie terrestre a partir de sensores localizados en plataformas aéreas o espaciales. Un ejemplo de esto son las fotografías aéreas, imágenes de radar y de satélite (Lombardo y Rojas 2000). También, el término “Percepción remota” comprende un conjunto de técnicas que utilizan la información acerca de las propiedades de la superficie y los objetos a distancia (Bhattarai, 1983). Estas técnicas involucran la obtención de información a partir de la medición de la energía electromagnética que proviene de los objetos distantes de diversos materiales y de esta forma se pueden identificar y clasificar los objetos por clase o tipo, materiales que los componen y su distribución espacial. Esto se realiza analizando la radiación electromagnética en una o más regiones del espectro electromagnético, ya sea ésta reflejada, dispersada o emitida desde la superficie de la Tierra (Campbell y Wynne, 2011).

4.14 Los sistemas de percepción remota o teledetección

4.14.1 Satélites artificiales

Los satélites artificiales son artefactos contruidos por el hombre que orbitan alrededor de la Tierra y tienen como función la de servir como plataformas para

transportar instrumentos o sensores capaces de observar y medir diferentes propiedades físicas de la atmósfera y de la superficie terrestre. Existen varios tipos de sensores, clasificados de acuerdo con la fuente de radiación electromagnética que usan y con el sistema que emplean para la recolección de datos.

4.14.2 Resoluciones en percepción remota

Las características fundamentales de los datos adquiridos en un sistema de este tipo, se pueden definir por parámetros como (Alzate, 2001):

- Resolución espectral

Se refiere al número, espaciamiento y ancho de las bandas de longitud de onda a lo largo del espectro electromagnético. Entre más alta sea la resolución espectral más completa y precisa será muestreada la firma espectral y más fácilmente, podrán ser clasificados y discriminados diferentes elementos de la escena, basados en sus firmas.

- Resolución espacial

Es una medida del objeto más pequeño que puede ser resuelto por el sensor, o el área en la superficie que recoge cada píxel. Entre más alta sea la resolución espacial (más fina) más completa y precisa es muestreada la forma de los objetos y más nítidamente pueden ser identificados, igualmente con más precisión será determinada su localización, extensión y área.

- Resolución temporal

Se refiere a cada cuánto tiempo recoge el sensor una imagen de un área particular. Muchos objetos de la tierra tienen firmas temporales características. Esta se refiere a como la reflectancia cambia a través del tiempo para un objeto dado, en una longitud, o combinación de bandas. Entre más alta sea la resolución temporal más completas y precisas son muestreadas las firmas

temporales de los objetos y más nítidamente podrán ser discriminados los elementos, basado en su comportamiento temporal.

- Resolución radiométrica

Se refiere al rango dinámico, o número de posibles valores que puede tomar cada dato. Entre mayor sea la resolución radiométrica, más preciso pueden presentarse los datos de las variaciones en la radiación que proviene de la superficie.

4.15 Proceso de percepción remota

El sistema de percepción remota consta de componentes que se interrelacionan, como se observa en la figura 4.7, los cuales son definidos a continuación:

- Fuente de energía (A)

Es la que da origen al flujo energético que es detectado por el sensor (Alzate, 2001).

- Radiación y la atmósfera (B)

Para que la energía vaya de la fuente hacia el objeto, necesita atravesar e interactuar con la atmósfera. Esta interacción también sucederá cuando la energía retorne de vuelta desde el objeto al sensor (Alzate, *op. cit.*).

- Interacción con el objeto (C)

Cuando la energía llega a la tierra interactúa con el objeto de interés, conformado por las diferentes coberturas de la tierra (superficie terrestre, atmósfera, océano), esta interacción se da en forma de algún fenómeno (reflexión, emisión, absorción) (Alzate, 2001).

- Sistema del sensor (D)

Es el que capta, codifica y graba la radiación que devuelve el objeto en tierra, sin estar en contacto con él. Después envía al sistema de recepción en tierra, la energía grabada (Alzate, *op. cit.*).

- Transmisión, recepción y procesamiento (E)

Los datos recibidos en forma digital, son preprocesados para obtener una imagen, bien sea en papel o en medio digital. Luego de este paso la imagen es interpretada, de forma visual o procesándola adicionalmente a través de técnicas digitales, para llegar al elemento final del proceso, el cual consiste en realizar aplicaciones con la información temática que se extrae de la imagen, entendiendo el comportamiento de los objetos que fueron censados allí, para la solución de algún problema en particular (Alzate, *op. cit.*).

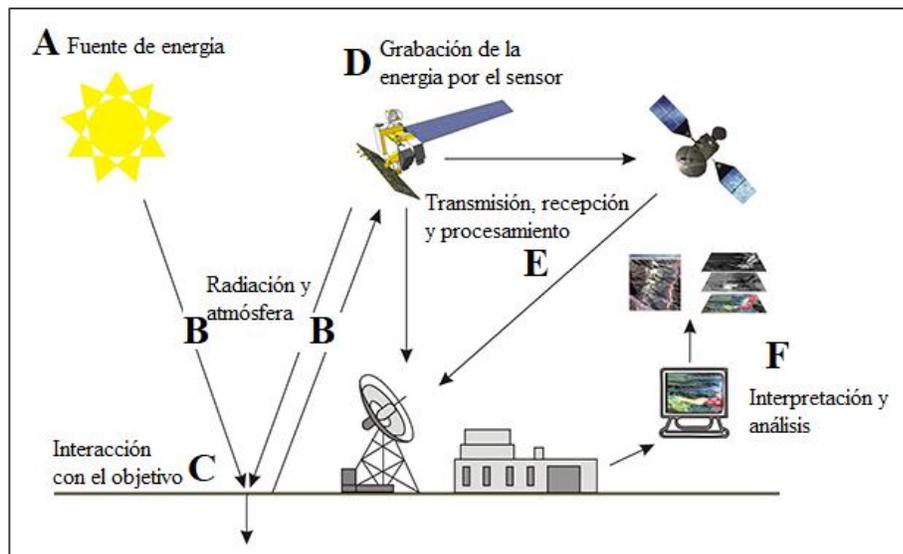


Figura 4.7 Proceso de la percepción remota (tomado y modificado de La Rosa, 2014).

4.16 Principios básicos de la percepción remota

Existen dos componentes básicos en el sistema de los sensores remotos: fuente de energía y ruta de transmisión objetivo y sensor. Ellos trabajan juntos para medir y registrar la información acerca del objetivo sin entrar en contacto físico con él. Para

que esto suceda algo debe actuar como medio para transmitir la información desde el objetivo hasta el sensor. Para la teledetección terrestre, en la mayoría de los casos, ese algo es la energía electromagnética. Esta se propaga a la velocidad de la luz y tiene como parámetros característicos la frecuencia de oscilación y la longitud de onda. Existen muchas formas de energía electromagnética, como lo son: ondas de radio, microondas, calor, rayos ultravioletas, rayos x, rayos gamma, luz visible (Alzate, 2001).

Cada una de estas formas describe la energía en una región específica del espectro electromagnético, las cuales son definidas por Alzate (2001) como una representación organizada de la energía electromagnética, partiendo de longitudes de onda corta, algunos μm , hasta valores altos (km) (figura 4.8). Esta representa la continuidad de la energía electromagnética desde longitudes de onda extremadamente corta (rayos cósmicos y rayos gamma) a longitudes de onda extremadamente largas (radio y televisión). Los nombres en el espectro electromagnético han sido asignados a regiones en las cuales las longitudes de onda adyacentes se comportan en forma similar, o son generadas por mecanismos similares. Sin embargo, la división entre estas regiones no es definida exactamente, ya que una región se puede superponer con otra.

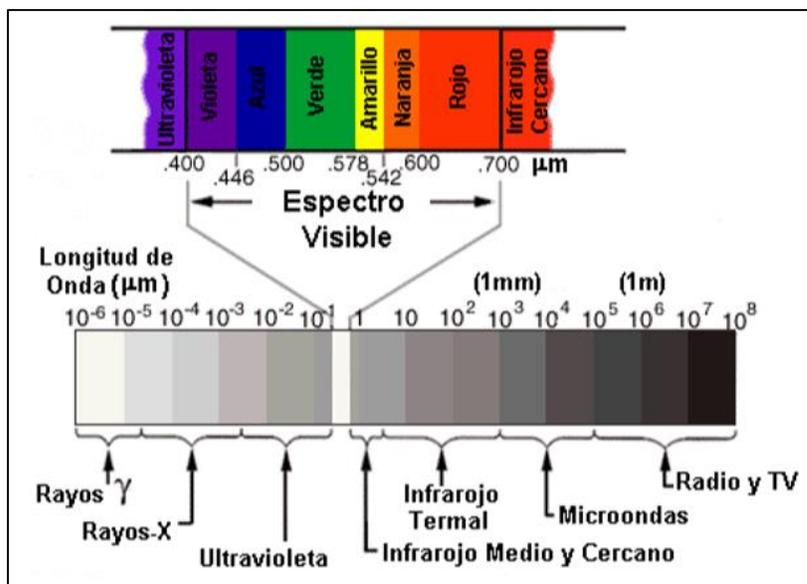


Figura 4.8 Rangos del espectro electromagnético (Álvarez y Gutierrez, 2008).

Para conocer mejor como se transmite la energía electromagnética, es necesario conocer las características principales de una onda (figura 4.9), la cual es descrita por Campbell y Wynne (2011) como:

- Longitud de onda (λ)

Es la distancia entre dos puntos en la misma fase de la onda, puede ser medida en cualquier unidad de longitud.

- Frecuencia (ν)

Es medida como el número de crestas que pasan por un punto fijo en un periodo de tiempo definido. Las unidades de medición son Hertz, el cual equivale a un ciclo por segundo.

- Amplitud

Es el equivalente a la intensidad de cada pico, generalmente es medida como niveles de energía, expresada como Watts por metro cuadrado por micrómetro.

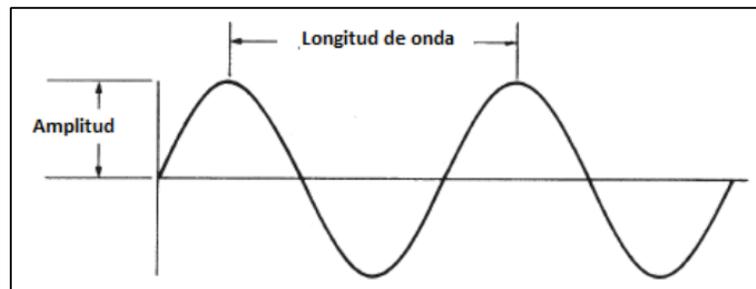


Figura 4.9 Partes de una onda (Campbell y Wynne, 2011).

4.17 Fuentes de energía en percepción remota

La fuente de energía usada más a menudo para iluminar los objetivos naturales es la radiación solar. A pesar de que el sol es la fuente de energía electromagnética más común, que se mide en teledetección terrestre, no es la única fuente de energía que se puede encontrar. Generalmente, entre más caliente sea un objeto, más irradia energía. La teledetección usa energía electromagnética de fuentes naturales y hechas por el hombre. Las fuentes de energía naturales son denominadas fuentes de energía pasivas.

Las fuentes de energía artificiales, son denominadas fuentes de energía activa (Alzate, 2001).

4.18 Energía incidente y atmósfera de la Tierra

La modificación atmosférica de la radiación electromagnética entrante y saliente incluye tres procesos (figura 4.10), los cuales modifican físicamente la dirección y penetración de la radiación electromagnética, en el momento en que pasa a través de la atmósfera (Alzate, *op. cit.*). Estos procesos son:

- Dispersión electromagnética

Es el redireccionamiento de la energía electromagnética por partículas suspendidas en la atmósfera (contaminación, polvo) o por moléculas grandes de gases atmosféricos (dióxido de carbono, ozono, gas nitrógeno). Este redireccionamiento de la luz puede ser en cualquier dirección.

- Refracción electromagnética

Es la desviación de la luz que se produce cuando pasa a través de dos medios con diferente densidad (capas atmosféricas). Produce el aminoramiento de las firmas espectrales en días húmedos y calientes, debido a que esta densidad se altera en las capas atmosféricas.

- Absorción electromagnética

Las moléculas de aire absorben la luz y provocan atenuación sobre el haz luminoso, por tanto, esto hace que no llegue toda la luz al receptor. La absorción depende de la longitud de onda, es causada principalmente por tres gases atmosféricos: ozono, que absorbe los rayos ultravioletas, dióxido de carbono y el óxido nitroso.

- Ventanas atmosféricas

Son porciones del espectro electromagnético que pueden pasar a través de la atmósfera con poca o ninguna atenuación. La mayoría de los sensores remotos

fueron seleccionados para operar en una o más de esas ventanas, y hacen sus mediciones usando detectores calibrados para ciertas longitudes de onda específicas, que pasan a través de la atmósfera.

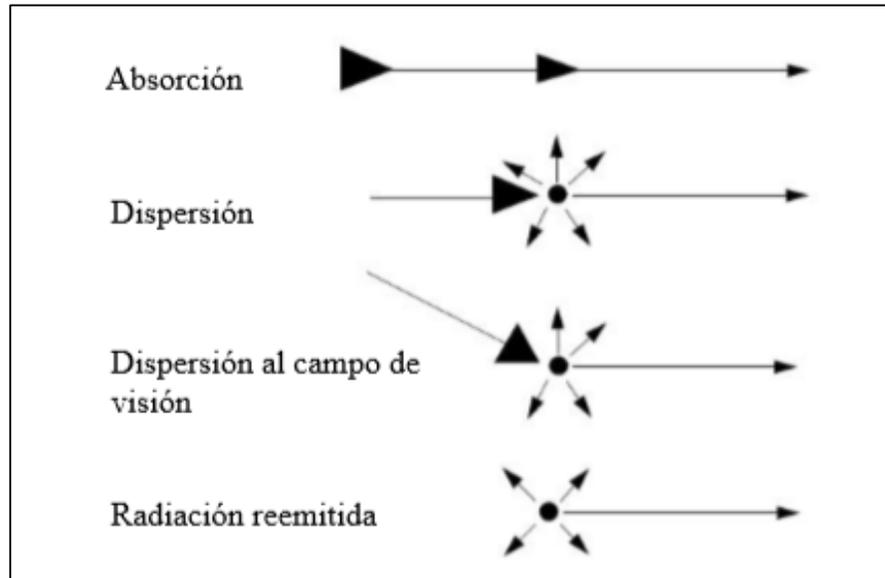


Figura 4.10 Factores que afectan la radiación. (Tomado y modificado de Erdas 2002).

4.19 Reflectancia espectral (firmas espectrales)

Todos los elementos y materiales de la naturaleza tienen una firma espectral que lo caracteriza, la cual representa la forma como absorben o reflejan las ondas electromagnéticas de diferentes longitudes (visibles o no visibles) que inciden sobre éstos. Si se detecta esa firma espectral, se pueden separar los objetos y obtener una visión del tamaño general y forma de ellos. Estas firmas espectrales cambian en el tiempo y el espacio. En la percepción remota es necesario caracterizar los objetivos de la superficie terrestre, basados en perfiles espectrales que disminuyen el error en la identificación. Cualquier material, dado la cantidad de radiación que es reflejada (absorbida o transmitida) variará su firma espectral con la longitud de onda. Esta importante propiedad de la materia permite que diferentes sustancias puedan ser identificadas y separadas por su firma espectral. Debido a esto, en algunas longitudes de onda las areniscas pueden reflejar más luz que la vegetación verde, pero en otras absorbe más luz que la vegetación (figura 4.11) (Alzate, 2001).

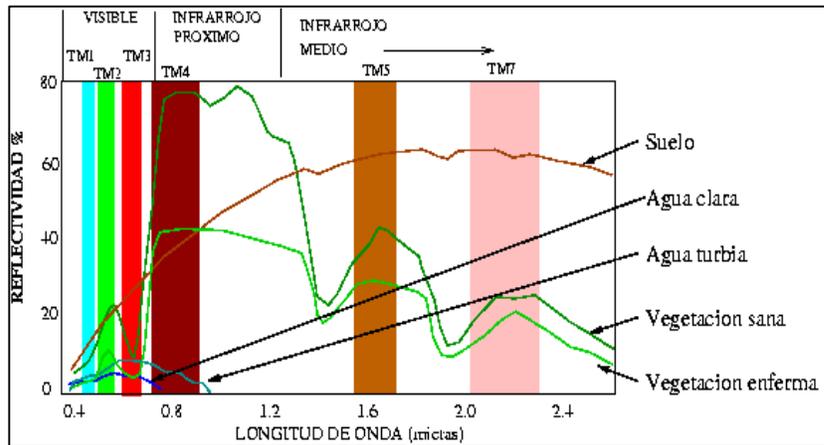


Figura 4.11 Firma espectral (Alonso, 2006).

4.20 Sensores remotos

Son los dispositivos que permiten referenciar a distancia la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie de la tierra. Estos son de diferentes tipos, de acuerdo con los principios básicos de diseño, su forma de registrar los datos y fuente de energía que emplean. Pueden ser cámaras, radares, barredores ópticos, óptico-mecánicos, eléctricos, etc. (Alzate, *op. cit.*)

4.21 Tipos de sensores (fuentes de energía)

4.21.1 Sensores pasivos (ópticos)

Son aquellos que reciben la energía reflejada o emitida por la Tierra cuando es iluminada por el Sol (figura 4.12) (Alzate, 2001). Algunos de estos sensores pasivos son: Landsat, Spot, Terra.



Figura 4.12 Sensor pasivo, de acuerdo al origen de la fuente de radiación (Pérez, 2007).

4.21.2 Sensores activos (radar)

Son aquellos que producen su propia energía para “iluminar” el objeto, la mayor ventaja de estos sensores es la capacidad de proveer de información geológica directa de estructuras y litologías mediante la radiografía (figura 4.13) (Alzate, 2001). Algunos sensores remotos son: RADARSAT, JERS-1, ALOS PALSAR Y Sentinel-2.

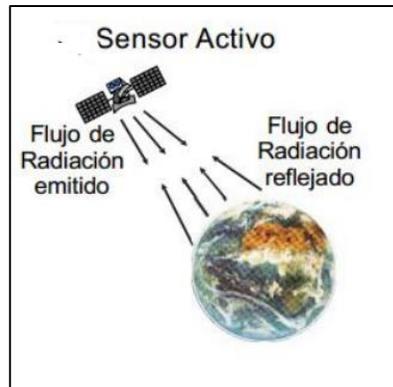


Figura 4.13 Sensor activo, de acuerdo al origen de la fuente de radiación (Pérez, 2007).

Para este trabajo se usaron imágenes satelitales obtenidas de la misión Sentinel-2 y del satélite ALOS PALSAR. A continuación, se describen con más detalles cada una de estas misiones.

4.22 Misión Sentinel-2

La Agencia Espacial Europea (ESA), a través del programa Copernicus tiene la constelación de satélites diseñado para proporcionar información precisa y actualizada, para mejorar la gestión del medio ambiente, comprender y mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad ciudadana. Se comprenden de tres misiones iniciales que se encuentran en el espacio, Sentinel 1, 2 y 3.

La misión Copernicus Sentinel-2 comprende una constelación de dos satélites en órbita polar colocados en la misma órbita del sol a 180° entre sí. Su objetivo es monitorear la variabilidad en las condiciones de la superficie terrestre, y su amplia franja (290 km) y alto tiempo de revisión (10 días en el ecuador con un satélite y 5 días con 2 satélites en condiciones sin nubes, lo que da como resultado 2-3 días en latitudes medias) ayuda en el seguimiento de los cambios en la superficie de la Tierra. Captura la información de

la superficie terrestre en 13 bandas espectrales, con diferentes resoluciones espaciales, cuatro bandas de 10 m, seis bandas de 20 m y tres bandas con resolución de 60 m. El lanzamiento del Sentinel-2A se realizó el 23 de junio del 2015 y el del Sentinel-2B el 7 de marzo del 2017. El tiempo de revisita, estando ambos satélites operativos, es de 5 días (Copernicus, 2019). En la tabla 4.5 se describen las características por bandas de la misión Sentinel-2 y en la figura 4.14 se observa un gráfico con la distribución de las bandas según su longitud y tipo de onda.

Tabla 4.5 Bandas del Sentinel-2. (Tomado y modificado de MasterGis, 2019).

Bandas del Sentinel-2		Longitud central de Onda (μm)	Resolución espacial (m)
Banda	Descripción		
Banda 1	Ultra azul (costa y aerosol)	0.443	60
Banda 2	Azul	0.49	10
Banda 3	Verde	0.56	10
Banda 4	Rojo	0.665	10
Banda 5	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)	0.705	20
Banda 6	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)	0.74	20
Banda 7	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)	0.783	20
Banda 8	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)	0.842	10
Banda 8A	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)	0.865	20
Banda 9	Onda corta infrarroja (SWIR)	0.945	10
Banda 10	Onda corta infrarroja (SWIR)	1.375	60
Banda 11	Onda corta infrarroja (SWIR)	1.61	20
Banda 12	Onda corta infrarroja (SWIR)	2.19	20

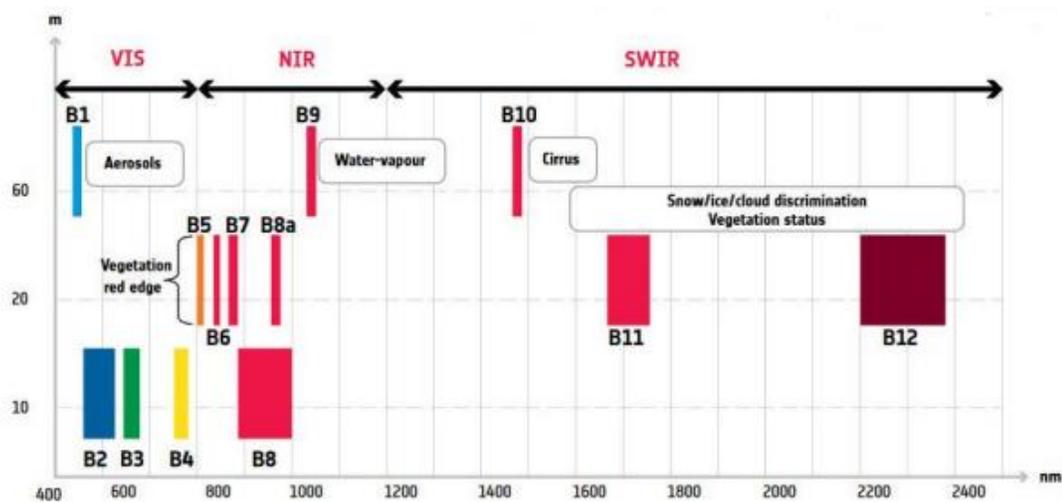


Figura 4.14 Gráfico de la distribución de las bandas de la Misión Sentinel 2, según la longitud y tipo de onda (tomado de Copernicus, 2019).

4.23 Satélite ALOS PALSAR

El satélite ALOS fue lanzado en enero del 2006 por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) en enero de 2006 y su nombre japonés es "DAICHI". El satélite ALOS durante su operación (May 16, 2006 – April 22, 2011), colectó imágenes de radar en escenas de 50 km x 70 km de todo el planeta cada 45 días aproximadamente a través de su sensor PALSAR (Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar). La resolución espacial de la imagen que se obtiene va desde 6.5 a 12.5 m, con un ángulo de incidencia de 8° y una capacidad de colección de escena de 50 km x 70 km. Las imágenes PALSAR están disponibles según 3 niveles de procesamiento (1.0-Imagen Cruda, 1.1-Datos comprimidos o 1.5-Imagen expandida) en formato CEOS con una resolución radiométrica de 16 bits (NASA, 2018). En la tabla 4.6 se encuentran las especificaciones del satélite ALOS PALSAR.

Tabla 4.6 Especificaciones del satélite ALOS PALSAR (tomado y modificado de Ingeniería Topográfica, 2020).

Modalidad PAL-SAR	Resolución (m)	Polarización	Cobertura transversal (km)
FBS resolución fina	10	Single HH	70
FBD resolución fina	20	Dual HH++HV	70
SL Scan SAR	100	Single HH	350
P fine Polarimetría	30	HH+HV+VH+VV	30

4.24 Modelo Digital de Elevación (MDE)

Los datos de elevación son un elemento muy importante en la geociencia, por lo que ha sido una variable muy necesaria y crítica para los sistemas de información geográfica (SIG). Moore *et al.* (1991) definen al modelo digital de elevaciones (MDE) como un arreglo ordenado de números que representa la distribución espacial de la elevación sobre un datum arbitrario en un paisaje. Por otra parte, Podobnikar (2016) define al modelo digital de elevación como un modelo superficial continuo, el cual consiste en valores de elevación que describen la superficie topográfica.

Amante y Eakins (2009) definen a ETOPO1 como un Modelo Digital de Elevación batimétrico-topográfico con un tamaño de celda de 1 minuto de arco, se puede encontrar en dos versiones: *Ice Surface*, que representa la superficie de las capas de

hielo de la Antártida y Groenlandia; y *Bedrock*, que representa el lecho de roca debajo de las capas de hielo. Este MDE se usa con mucha frecuencia ya que esta disponible en la página del Centro Internacional de Modelos Globales de la Tierra (ICGEM, por sus siglas en inglés).

4.25 Análisis de Decisiones Multi-Criterio (ADMC)

El MCDA (por sus siglas en inglés) o ADCM (siglas en español) es un conjunto de técnicas que se aplican en los SIG que ayudan a poner orden de una forma explícita, pero que no reemplazan a la propia toma de decisión. Los métodos de ADCM constituyen una herramienta al servicio de la toma de decisiones, proporcionando un método formalizado de ayuda en este empeño que procede de los modelos de investigación operativa. Cualquier aplicación del ADCM comprende una serie de pasos generales comunes, como son la identificación de alternativas y criterios de decisión (estructuración del problema), la construcción y utilización del modelo y el desarrollo de planes de acción (figura 4.15). En concreto, en la fase de modelización, la evidencia recogida es objeto de cuantificación por parte de los evaluadores para identificar la mejor alternativa, incorporando ponderaciones y puntuaciones explícitas. Las ponderaciones se refieren a la importancia relativa que tiene cada criterio para el evaluador, mientras que las puntuaciones reflejan el desempeño de la intervención evaluada en los criterios considerados (Zozaya *et. al*, 2019).

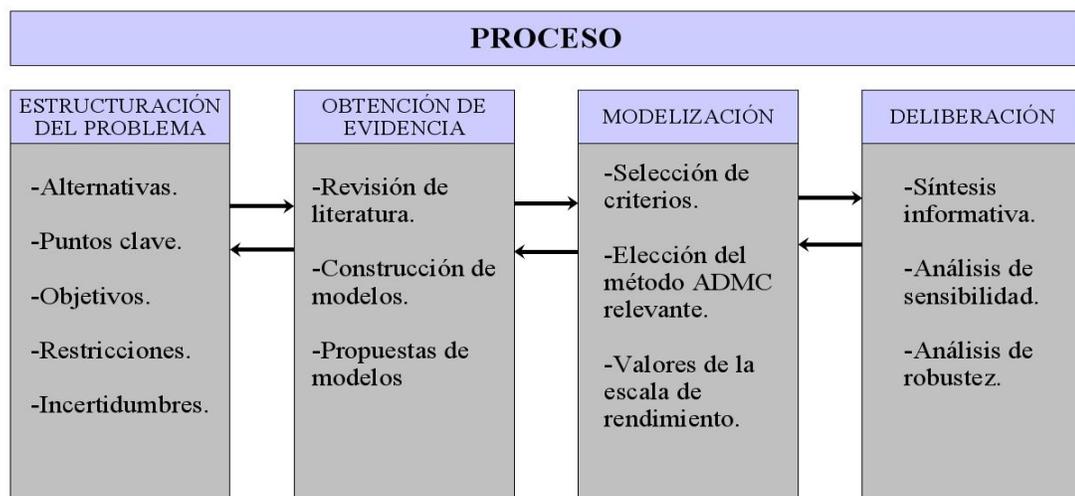


Figura 4.15 Proceso de realización de un ADCM (tomado y modificado de Thokala, 2012).

4.26 Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ)

Dentro del ADMC se encuentra el método denominado Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) o Analytical Hierarchy Process (AHP, por sus siglas en inglés) (Saaty, 1980). Dicha metodología, permite construir un modelo jerárquico que represente el problema objeto de estudio, mediante criterios y alternativas planteadas inicialmente, para luego poder deducir, cual o cuales son las mejores alternativas y tomar una decisión final óptima. Con este proceso analítico jerárquico se pretende dividir una decisión compleja en un conjunto de decisiones simples, facilitando la comprensión y solución del problema propuesto (Álvarez *et al.*, 2000).

Osorio y Orejuela (2008) mencionan que el PAJ utiliza comparaciones entre pares de elementos, construyendo matrices a partir de estas comparaciones, y usando elementos del álgebra matricial para establecer prioridades entre los elementos de un nivel, con respecto a un elemento del nivel inmediatamente superior. Cuando las prioridades de los elementos en cada nivel se tienen definidas, se agregan para obtener las prioridades globales frente al objetivo principal. Los resultados frente a las alternativas se convierten entonces en un importante elemento de soporte para quien debe tomar la decisión. La notación utilizada es la siguiente:

- Para i objetivos dados $i = 1, 2, \dots, m$, determinan los respectivos pesos W_i .
- Para cada objetivo i , se comparan las $j = 1, 2, \dots, n$ alternativas y se determinan los pesos W_{ij} con respecto al objetivo i .
- Se determina el peso final de la alternativa W_j con respecto a todos los objetivos así $W_j = W_{1j}W_1 + W_{2j}W_2 + \dots + W_{mj}W_m$

4.27 Comparaciones pareadas de PAJ

El PAJ utiliza una escala subyacente con valores de 1 a 9 para calificar las preferencias relativas de los dos elementos. Se presentan las calificaciones numéricas que se recomiendan para las preferencias verbales expresadas por el decisor (tabla 4.7) (Toskano, 2005).

Tabla 4.7 Escala de preferencias según Saaty (tomado y modificado de Toskano, 2005)

ESCALA DE PREFERENCIAS	
Planteamiento verbal de la preferencia	Calificación numérica
Extremadamente preferible	9
Entre muy fuertemente y extremadamente preferible	8
Muy fuertemente preferible	7
Entre fuertemente y muy fuertemente preferible	6
Fuertemente preferible	5
Entre moderadamente y fuertemente preferible	4
Moderadamente preferible	3
Entre igualmente y moderadamente preferible	2
Igualmente preferible	1

4.28 Matriz de comparaciones pareadas

Es una matriz cuadrada que contiene comparaciones pareadas de alternativas o criterios. Sea A una matriz $n \times n$, donde $n^a \mathbb{Z}^+$. Sea a_{ij} el elemento (i, j) de A , para $i = 1, 2, \dots, n$, y, $j = 1, 2, \dots, n$. Decimos que A es una matriz de comparaciones pareadas de n alternativas, si a_{ij} es la medida de la preferencia de la alternativa en el renglón i cuando se le compara con la alternativa de la columna j . Cuando $i = j$, el valor de a_{ij} será igual a 1, pues se está comparando la alternativa consigo misma (Toskano, 2005).

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

Además, se cumple que $a_{ij} \cdot a_{ji} = 1$; es decir:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

El proceso de análisis jerárquico se fundamenta en los siguientes axiomas:

- Axioma 1 (condición de juicios recíprocos): si A es una matriz de comparaciones pareadas se cumple que $a_{ij} = 1/a_{ji}$

- Axioma 2 (condición de homogeneidad de los elementos): los elementos que se comparan son del mismo orden de magnitud, o jerarquía.
- Axioma 3 (condición de estructura jerárquica o estructura dependiente): existe dependencia jerárquica en los elementos de dos niveles consecutivos.
- Axioma 4 (condición de expectativas de orden de rango): las expectativas deben estar representadas en la estructura en términos de criterios y alternativas.

4.29 Procedimiento para sintetizar juicios

Una vez que se elabora la matriz de comparaciones pareadas se puede calcular lo que se denomina prioridad de cada uno de los elementos que se comparan. A esta parte del PAJ se le conoce como sintetización. El siguiente procedimiento proporciona una buena aproximación de las prioridades sintetizadas (Toskano, 2005):

- Sumar los valores en cada columna de la matriz de comparaciones pareadas.
- Dividir cada elemento de tal matriz entre el total de su columna; a la matriz resultante se le denomina matriz de comparaciones pareadas normalizada.
- Calcular el promedio de los elementos de cada renglón de las prioridades relativas de los elementos que se comparan.

4.30 Razón de consistencia (RC)

El autor Toskano (*op. cit.*) describe que el PAJ ofrece un método para medir el grado de consistencia entre las opiniones pareadas que proporciona el decisor. Si el grado de consistencia es aceptable, puede continuarse con el proceso de decisión. Si el grado de consistencia es inaceptable, quien toma las decisiones debe reconsiderar y posiblemente modificar sus juicios sobre las comparaciones pareadas antes de continuar con el análisis. Esta razón o cociente está diseñado de manera que los valores que exceden de 0.10 son señal de juicios inconsistentes; es probable que en estos casos el tomador de decisiones desee reconsiderar y modificar los valores originales de la matriz de comparaciones pareadas. Se considera que los valores de la razón de consistencia de 0.10 o menos son señal de un nivel razonable de consistencia en las comparaciones pareadas. Este índice de consistencia fue desarrollado por Saaty (1980).

El proceso de análisis jerárquico calcula la razón de consistencia como el cociente entre el índice de consistencia de A y el índice de consistencia aleatorio.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4.4)$$

$CR \leq 0.10$: Consistencia Razonable $CR > 0.10$: Inconsistencia

Donde CI es el índice de consistencia de A y se calcula:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4.5)$$

El valor de λ_{max} se obtiene al calcular primero el vector columna A y después sumando sus elementos.

RI es el índice de consistencia aleatoria, es el índice de consistencia de una matriz de comparaciones pareadas generada en forma aleatoria propuesto por Saaty (1980). Se puede mostrar que el RI depende del número de elementos que se comparan, y comprende los siguientes valores (tabla 4.8):

Tabla 4.8 Índice de consistencia aleatoria (RI)

N° de elementos que se comparan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice aleatorio de consistencia (RI)	0	0	0.58	0.89	1.12	1.24	1.32	1.4	1.45	1.49

4.31 Evaluación de los recursos de agua subterránea utilizando SIG y ADMC

La evaluación, la planificación y la gestión de los recursos de aguas subterráneas se están volviendo cruciales y extremadamente urgentes en los últimos tiempos. Para hacer una evaluación de la disponibilidad de agua subterránea, se requiere delinear la zona potencial de agua subterránea usando sensores remotos, SIG y Análisis de Decisiones Multi-Criterio (ADMC). Un programa de desarrollo de aguas subterráneas requiere un gran volumen de datos de varias fuentes. La teledetección y el estudio del SIG, con sus ventajas de disponibilidad espacial, espectral y temporal de datos que cubren áreas grandes e inaccesibles en un corto período de tiempo, han resultado ser una herramienta eficaz para proporcionar la plataforma adecuada para el análisis

convergente de grandes volúmenes de datos multidisciplinarios y la toma de decisiones para los estudios de aguas subterráneas. Se deben generar varios mapas temáticos, tales como mapas de geomorfología, pendientes y densidad de lineamientos, para determinar las zonas potenciales de agua subterránea (ArcGeek, 2018).

4.32 La geofísica en estudios de agua subterránea

La mayor parte de estudios de geofísica en el ámbito de estudios de agua subterránea se emplean con propósitos de exploración, cuyo objetivo es analizar la rentabilidad de la explotación de un acuífero; también para caracterizar un acuífero con propósitos de remediación si está afectado por contaminantes debido a la actividad humana o por otro tipo de problemas como agua potable mezclada con aguas salobres, arsénico, flúor u otra sustancia cuya concentración no permita su aprovechamiento. La caracterización es parte importante en un proyecto de recarga (Hernández, 2017).

4.33 Métodos eléctricos

El método eléctrico de prospección se basa en el estudio de campos de potencial eléctrico, tanto en lo referente a los naturalmente existentes en la corteza terrestre, como a los artificialmente provocados en la misma. Mediante estas mediciones se puede determinar la situación en el subsuelo de la presencia de minerales o reconocer estructuras o accidentes geológicos. La modalidad más empleada y de más amplia aplicación es la segunda, o sea, la de campos artificiales provocados (Figuerola, 1974).

Los métodos eléctricos, también llamados métodos geoelectrónicos, estudian por medio de mediciones efectuadas en la superficie, la distribución en profundidad de algunas propiedades de magnitud electromagnética. Entre las principales magnitudes electromagnéticas o constantes materiales que en principio podrían utilizarse para identificar los cuerpos situados en el subsuelo, destacan: la resistividad, la permeabilidad magnética y la constante dieléctrica o permitividad (Orellana, 1982).

4.34 Resistividad eléctrica

La ley física fundamental utilizada en prospección eléctrica es la Ley de Ohm la cual establece que la caída de potencial ΔV entre dos 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 (Auge, 2008). A continuación, se escribe lo anterior.

$$\Delta V = I * R \quad (4.6)$$

Según Rodrigo *et al.* (2004), a través del método resistivo se introduce una corriente continua o de baja frecuencia en el suelo a través de un par de electrodos y se mide la diferencia de potencial entre otro par de electrodos. La relación de estas dos magnitudes proporciona una resistividad promedio o aparente que depende de la resistividad de los materiales presentes en el subsuelo. El valor de la resistividad aparente resulta entonces:

$$\rho_a = K * \frac{\Delta V}{I} \quad (4.7)$$

Donde ΔV es la diferencia de potencial que se mide entre los electrodos M-N, I es la corriente que se aplica al terreno por los electrodos A-B, y K es un factor geométrico que depende de la disposición de electrodos que se utiliza.

4.35 Resistividad de las rocas

Orellana (1982) explica que la resistividad de una porción determinada de roca puede medirse directamente por diversos métodos, los cuales pueden emplearse también para evaluar el grado de exactitud de las fórmulas teóricas. Tales determinaciones experimentales pueden efectuarse de tres modos diferentes:

- Por medio de mediciones geoelectricas realizadas en la superficie del terreno, tales como sondeos eléctricos verticales, sondeos magneto- telúricos.
- Por mediciones efectuadas en el interior de sondeos mecánicos, siguiendo los métodos (testificación eléctrica).
- Por medio de determinaciones de laboratorio, sobre muestras de roca extraídas de afloramientos o de labores mineras, o bien sobre testigos de sondeo. Estas mediciones tienen el inconveniente del pequeño tamaño del trozo de roca que se utiliza, el cual puede no ser representativo, y el más importante aún de que el grado de humedad que la roca poseía "in situ" se altera en las operaciones de

corte y transporte al laboratorio. En la tabla 4.9 se tiene las resistividades de algunas rocas según el contenido de agua y la tabla 4.10 muestra las resistividades según los sedimentos y rocas más comunes.

Tabla 4.9 Resistividad en rocas y sedimentos (tomado y modificado de Arias et al., 2012).

Material	Resistividad (Ωm)
Basamento, roca sana	> 10.000
Basamento, roca fracturada	1.500 - 5.000
Basamento, roca fracturada saturada con agua dulce	100 - 2000
Basamento, roca fracturada saturada con agua salada	1 - 100
Gravas no saturadas	500 - 2000
Gravas saturadas	300 - 500.
Arenas no saturadas	400 - 700
Arenas saturadas	100 - 200
Limos no saturados	100 - 200
Limos saturados con agua salada	5 - 15
Arcillas no saturadas	20 - 50
Arcillas saturadas	5 - 20
Arcillas saturadas con agua salada	1 - 10

Tabla 4.10 Tabla de resistividades en sedimentos y rocas comunes (tomado y modificado de USACE, 1995).

Material	Resistividad (Ωm)
Arcilla	1-20
Arena, mojada a húmeda	20-200
Lutitas	1-500
Caliza porosa	100-1000
Caliza densa	1000-1000000
Rocas metamórficas	50-1000000
Rocas ígneas	100-1000000

4.36 Resistividad de las aguas naturales

Las aguas que se encuentran en la naturaleza, presentan conductividad apreciable, pues siempre tienen disuelta alguna sal, generalmente NaCl. La cantidad y clase de estas sales dependen de la naturaleza de las rocas con las que las aguas superficiales o subterráneas hayan entrado en contacto en su marcha. La cantidad de sales de las aguas suele oscilar entre 0.1 g/l y 35 g/l, cifra esta última que corresponde a aguas marinas, y que es superada por algunas aguas de mina y por lagos salados, notablemente por el Mar Muerto, con unos 250 g/l (tabla 4.11) (Orellana, 1982).

Tabla 4.11 Resistividad del agua (Orellana, 1982).

Tipo de agua	Resistividad (Ωm)
Agua de lago	1000 - 3000
Agua dulces superficiales	10 - 1000
Aguas salobres superficiales	2 - 10
Aguas subterráneas	1 - 20
Aguas de lagos salados	0.1 a 1
Aguas marinas	0.2
Aguas de impregnación de roca	0.03 a 10

4.37 Sondeos eléctricos verticales

El sondeo eléctrico vertical genera información necesaria para la determinación de los cambios verticales de las propiedades geoeléctricas del subsuelo, este método consiste en la inyección de corriente eléctrica continua en la tierra proveniente de una fuente artificial a través de un par de electrodos de cobre o impolarizables AB. A través de otro par de electrodos de cobre o impolarizables MN colineales con AB, se mide la diferencia de potencial eléctrico entre ambos (Orellana, 1982).

Para Auge (2008), 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.

- 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 (figura 4.16).

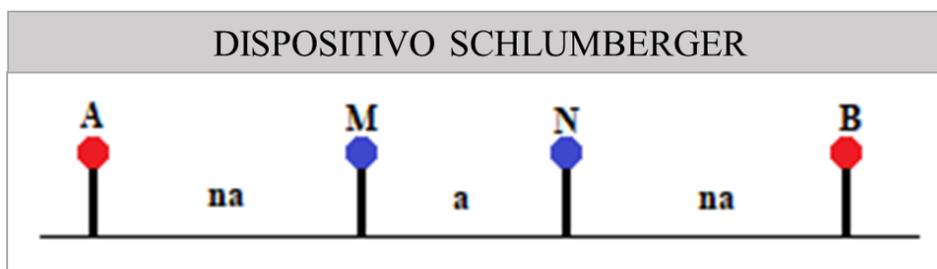


Figura 4.16 Dispositivo electródico tipo Schlumberger (tomado y modificado de Auge, 2008).

- Configuración Wenner

Es un dispositivo simétrico pero los elementos se mantienen equiespaciados (figura 4.17).

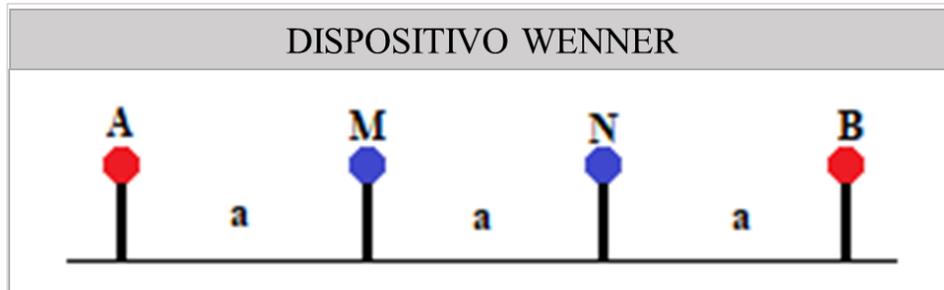


Figura 4.17 Dispositivo electrónico tipo Wenner (tomado y modificado de Auge, 2008).

4.38 Distancias de electrodos de corriente

Cavada (2019) explica que las distancias de los electrodos de corriente respecto al centro del dispositivo deben seguir una progresión geométrica, en la que cada distancia es igual a la anterior multiplicada por una constante C . Las siguientes relaciones son válidas para dispositivos Schlumberger y Wenner.

$$\mathcal{X}_i = \frac{AB_i}{2} \quad (4.8)$$

$$\mathcal{X}_i = C\mathcal{X}_0 \quad (4.9)$$

$$\mathcal{X}_2 = C\mathcal{X}_1 = C^2\mathcal{X}_0 \quad (4.10)$$

Donde, AB_i es la distancia i -ésima entre electrodos de corriente, \mathcal{X}_i corresponde a la distancia i -ésima entre el centro del dispositivo y un electrodo de corriente y C es la constante geométrica.

Si la constante C es mayor que 1, las distancias \mathcal{X}_i se incrementan exponencialmente, y si es menor que 1 decrecen exponencialmente.

La constante C , se elige de tal forma que se represente una cantidad constante de puntos de resistividad aparente por década logarítmica de distancia en un gráfico bilogarítmico.

Si se desea graficar n puntos por década logarítmica de distancia, debe cumplirse:

$$\mathcal{X}_{t+n} = C^n \mathcal{X}_t \quad (4.11)$$

$$\mathcal{X}_{t+n} = 10 \mathcal{X}_t \quad (4.12)$$

Por lo tanto:

$$C^n = 10 \quad (4.13)$$

$$C = 10^{\frac{1}{n}} \quad (4.14)$$

4.39 Parámetros de Dar Zarrouk

La resistencia transversal (T) y la conductancia longitudinal (S) ambos definidos por Maillet (1947) y denominados parámetros de Dar Zarrouk, se determinan a partir de la interpretación de las curvas de sondeo eléctrico vertical obtenidas en el campo. Son magnitudes aditivas, por lo que a un conjunto de n capas le corresponde la suma de sus parámetros individuales. Es decir, S y T se definen, para una secuencia de n capas horizontales, homogéneas e isótropas de espesor h_n y resistividad eléctrica ρ_n tal como se indica en la figura 4.18:

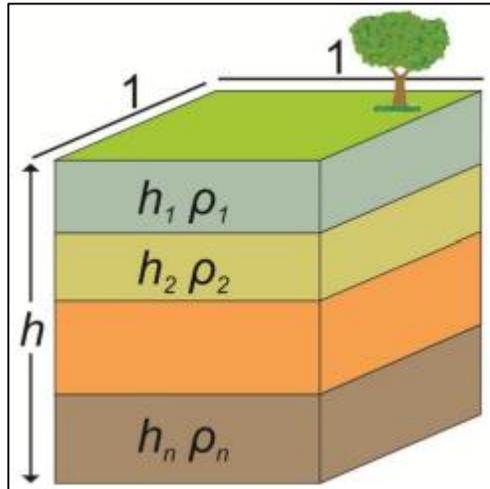


Figura 4.18 Parámetros de Dar Zarrouk (Sendrós, 2012).

Donde, la resistencia transversal unitaria (T) y la conductancia longitudinal (S) corresponde a la sumatoria de todas estas capas, como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$T = \sum_i T_i = \sum_i \rho_i \cdot h_i \quad (4.15)$$

$$S = \sum_i S_i = \sum_i h_i / \rho_i \quad (4.16)$$

4.40 Polígonos de Thiessen

El método de los polígonos de Thiessen o Voronoi es equivalente al método de interpolación del vecino más próximo; todos los puntos dentro del polígono se le asignan el mismo valor que corresponde a el mismo valor del punto con datos desde el cual se genera el polígono. Es decir, toda la zona que encierra el polígono corresponde al mismo dato que genera dicha zona. El método de los polígonos de Thiessen consiste en delimitar áreas de influencia (unidades discretas) a partir de un conjunto de puntos. El tamaño y la configuración de los polígonos depende de la distribución de los puntos originales. Una limitante que tiene el método es que no se puede estimar el error asociado, pues el valor para cada polígono se obtiene a partir de un solo punto. (Pardo, 1998).

4.41 Métodos sísmicos

La prospección con métodos sísmicos consiste en explorar el subsuelo mediante ondas sísmicas. La generación de ondas sísmicas se realiza por medio de una explosión o por un impacto mecánico denominado fuente. La onda transita a través de un medio de propagación (rocas, aire, agua) y es recibida en un elemento detector-registrador de las ondas denominado receptor, que permite analizar las ondas sísmicas una vez registradas y obtener información de las propiedades elásticas y morfológicas del medio de propagación (Dobrin, 1961).

4.42 Ondas sísmicas

FUNVISIS (2002), define a las ondas sísmicas como oscilaciones mecánicas, las cuales se propagan transportando energía desde el foco o hipocentro a través de un medio material elástico, bien sea sólido o líquido.

Las fuentes de energía sísmica, ya sea en la superficie de la Tierra o a profundidad, producen tipos de onda conocidos como: ondas corporales (ondas P y S), donde el transporte de energía es en todas las direcciones y ondas superficiales (ondas Love y Rayleigh), donde la energía viaja a lo largo o cerca de la superficie (Schuck y Lange, 2007).

Estos autores explican que, el interés principal en sísmica superficial son los dos tipos de ondas corporales: S y P.

- Ondas P

También conocidas como ondas primarias, longitudinales o de compresión, poseen un movimiento de partículas paralelo a la dirección de propagación de la energía. La velocidad de las ondas P en distintos materiales se muestra en la tabla 4.12.

- Ondas S

También conocidas como secundarias, cortantes o transversales, poseen un movimiento de partículas perpendicular a la dirección de propagación de la energía. Cuando dicho movimiento se produce en el plano vertical se les llama ondas SV, y ondas SH cuando el mismo está en el plano horizontal.

Tabla 4.12 Velocidad onda P en distintos materiales (tomado y modificado de Reynolds, 1997).

Material	Velocidad onda P (m/s)
Aire	330
Agua	1450-1550
Petróleo	1300-1400
Limos	300-600
Tierra	100-500
Arena (suelta)	200-2000
Arena (seca y suelta)	200-1000
Arena (saturada y suelta)	1500-2000
Morrena de glacial	1500-2700
Arena y grava (cercana a la superficie)	400-2300
Arena y grava (a 2 km de profundidad)	3000-3500
Arcilla	1000-2500
Estuarios de arcilla/lodo	300-1800
Aluvión (llanura aluvial)	1800-2200
Permafrielo (sedimentos cuaternarios)	1500-4900
Arenisca	1400-4500
Caliza (suave)	1700-4200
Caliza (dura)	2800-7000
Dolomitas	2500-6500
Anhidrita	3500-5500
Halita	4000-5500
Lutitas	2000-4100
Granito	4600-6300
Basalto	5500-6500
Gabro	6400-7000
Peridotita	7800-8400
Serpentinita	5500-6500
Gneis	3500-7000
Mármol	3750-7000
Tierra hecha	160-600
Concreto	300-3500

4.43 Método de refracción sísmica

La refracción sísmica es un método geofísico no destructivo para la interpretación de las propiedades de los suelos, y la detección de la profundidad de la roca, mediante el análisis de las variaciones en las velocidades sísmicas (Encinas, 2016). El autor antes citado dice que este método se basa en determinar los tiempos de recorrido de las ondas P (primarias), longitudinales o compresionales, desde un punto conocido (fuente

sísmica) hasta una serie de sensores (geófonos) situados a lo largo de una línea de adquisición (figura 4.19).

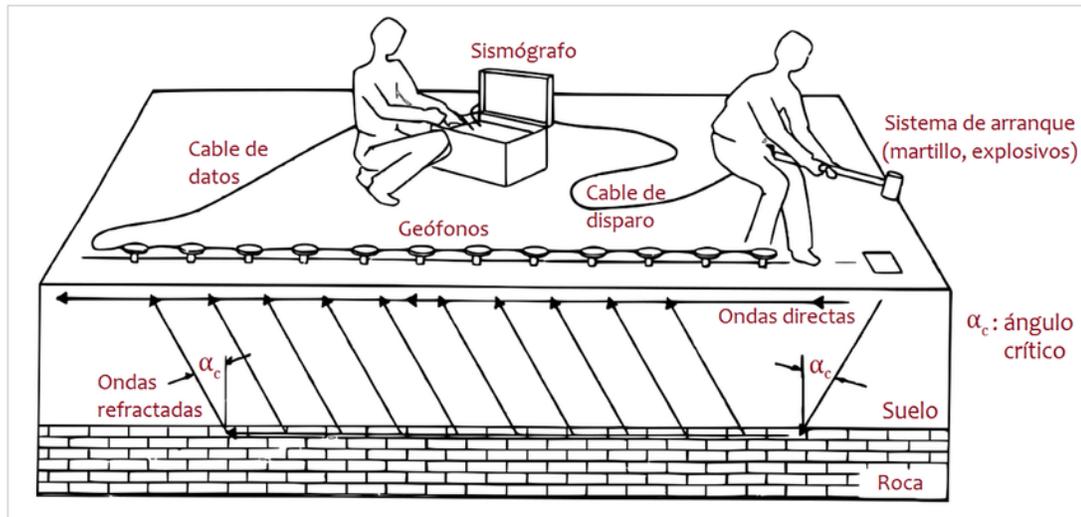


Figura 4.19 Sísmica de refracción (Tomado de ASTM D5777, 2018).

4.44 Velocidad en función de la temperatura, salinidad del agua y profundidad

La combinación del material y los poros influyen fuertemente en la velocidad de las ondas elásticas; una roca saturada de agua tiene una velocidad diferente comparada con una roca saturada de gas. La velocidad de las ondas P que viajan en el agua dependen de la temperatura y la salinidad, pero es normalmente considerada alrededor de los 1500 m/s para una salinidad de 35 ppm a una temperatura de 13 °C (Reynolds, 1997).

$$V = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.0003T^3 + (1.34 - 0.01T)(S-35) + 0.016d \quad (4.17)$$

Donde S y T se refieren a la salinidad (ppm), la temperatura se mide en °C, d es la profundidad en metros (Ewing and Worzel, 1948, Fofonoff and Millard, 1983).

4.45 Refracción sísmica para la caracterización de la estructura de un acuífero y su contenido de humedad

Según el autor Hernández (2017), la densidad y las propiedades elásticas de un medio poroso controlan la velocidad de las ondas sísmicas que se propagan a través de un medio, la cual se conoce como velocidad sísmica del medio. La velocidad sísmica en

el aire es de 0.35 (km/s) y en el agua de 1.5 (km/s). La velocidad sísmica en las rocas va de rangos de 1.75 (km/s) en esquistos porosos a más de 7 (km/s) en dolomitas de muy baja porosidad (Birch, 1966). La velocidad sísmica en medios porosos saturados aumenta parcialmente al incrementarse el contenido de agua. Este incremento es un balance entre los efectos de enormes velocidades de propagación mediante los poros llenos de agua y al incremento de densidad debido al desplazamiento del aire dentro del medio. La relación entre las propiedades elásticas del medio, de la densidad de la matriz y del contenido volumétrico de agua en conjunto con la velocidad de las ondas sísmicas, puede usarse como un método para investigar la distribución del contenido de agua en una estructura hidrogeológica.

4.46 Métodos gravimétricos

Según Dobrin (1988), los métodos gravimétricos tienen como finalidad medir las variaciones laterales y verticales de la atracción gravitatoria del suelo, las cuales se encuentran relacionados a cambios de densidades. Este método permite estudiar estructuras geológicas en el subsuelo y su composición, además de la estructura interna de la Tierra, debido a los contrastes de densidades.

4.47 Gravedad teórica

Martínez (2008) define que esta es la gravedad que teóricamente se tiene en un punto que esté sobre el elipsoide de referencia, correspondiendo concretamente al valor promedio de la gravedad para una latitud dada. Hinze *et al.* (2005) exponen que el último modelo elipsoidal recomendado por la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica es el *Geodetic Reference System 1980 (GRS80)* (Moritz, 1980). La expresión para calcular la gravedad teórica (G_{TEO}) sobre este elipsoide a una latitud (sur o norte) φ , es:

$$G_{TEO} = \frac{g_e * (1 + k * \sin^2\varphi)}{(1 - e^2 * \sin^2\varphi)^{1/2}} \quad (4.18)$$

Donde el elipsoide de referencia *GRS80* tiene el valor g_e de 978032.67715 mGal, siendo este el valor de la gravedad en el ecuador; $k = 0.001931851353$ y representa a

una constante; $e= 0.0066943800229$ siendo el valor de la primera excentricidad numérica.

4.48 Gravedad de la Tierra

Considerando una masa en la superficie de la Tierra relativamente pequeña en comparación a la masa total de la misma, y dado que la fuerza es resultado del producto entre la masa y aceleración, se obtiene que la aceleración de gravedad en cualquier punto en la superficie de la Tierra es:

$$g = G \frac{M_T}{R_T^2} \quad (4.19)$$

Donde R_T y M_T son el radio y masa de la Tierra y G es la constante de gravitación universal (Kearey *et al.*, 2002).

4.49 Medidas de la gravedad

Según Estrada (2012), existen dos formas de medir la gravedad, estas son:

Absoluta: La determinación del valor absoluto de la gravedad requiere de instrumentos sofisticados, difíciles de transportar y un tiempo considerable para efectuar la medición de un sinnúmero de cuidados. El péndulo es uno de estos instrumentos. Una masa suspendida a una longitud L , oscila con un período T , y la gravedad es la fuerza recuperadora del sistema.

Relativa: La determinación del valor relativo de la gravedad requiere de instrumentos de diseño más simple, prácticos y fácil traslado, y son los que determinan la diferencia de gravedad entre dos estaciones. El péndulo también podría ser usado para medir la diferencia de gravedad con lo que se obtendrá una precisión de 0,1 mGal, pero no son prácticos para el campo.

4.50 Variaciones de la gravedad con la altura

Dado que la gravedad varía con la altura por diferentes factores, se consideran tres tipos de variaciones fundamentales, también conocidas como correcciones.

4.50.1 Corrección de aire libre

Corresponde a la diferencia entre el valor de la gravedad observada y el valor teórico de gravedad medido con respecto a una superficie de referencia (elipsoide, geoide) mediante la aplicación de esta corrección se elimina el efecto de gradiente de gravedad, en el cual es inversamente proporcional a la altura y disminuye linealmente a razón de 0.3086 mGal/m, esto suponiendo un modelo de Tierra esférica (Silva, 2015). Se calcula mediante la relación que se muestra a continuación:

$$C_{AL} = 0.3086 * h \text{ [mGal]} \quad (4.20)$$

4.50.2 Corrección de Bouguer

La corrección de Bouguer representa la atracción gravitatoria de la capa de la Tierra entre la estación y el datum vertical, en otras palabras, entre el elipsoide y la estación (Hinze *et al.*, 2005). Esta corrección se calcula suponiendo que las capas terrestres ubicadas entre la estación y el datum vertical se pueden representar por una placa horizontal, mediante la siguiente expresión:

$$C_B = 0.04191 h \rho_B \text{ [mGal]} \quad (4.21)$$

4.50.3 Corrección topográfica

Toma en cuenta el valor de la gravedad que resulta del efecto de las masas que se encuentran por encima y por debajo de una capa de altura h y de densidad ρ_B , con respecto al nivel del mar. Para esta corrección se emplean gráficos que consisten en una serie de círculos concéntricos alrededor de una estación y dividida en sectores, llamada retícula de Hammer (Dobrin, 1988).

4.51 Anomalías gravimétricas

Es la diferencia entre el valor de la gravedad observada y el valor teórico de gravedad en el esferoide para una estación de la latitud y longitud determinada (Lowrie, 2007) y depende de la ubicación de la estación y de los parámetros de corrección tomados en cuenta.

4.51.1 Anomalía de aire libre

La anomalía de aire libre representa la diferencia entre la gravedad observada y la gravedad teórica debido al elipsoidal GRS80 y el efecto atmosférico en toda la ubicación de la estación. Esta anomalía se usa con frecuencia en el modelado e interpretación de mapas de las zonas marinas y sin variaciones significativas batimétricas (Telford *et al.*, 2004). Esta anomalía se determina con la siguiente expresión:

$$A_{AL} = G_{OBS} - G_{Teo} + C_{AL} \text{ [mGal]} \quad (4.22)$$

Donde, G_{OBS} : gravedad observada; G_{Teo} : gravedad teórica y C_{AL} : corrección de aire libre.

4.51.2 Anomalía de Bouguer

Esta anomalía considera la atracción causada por una placa horizontalmente infinita, de altura h igual a la altura de la estación de medición y de densidad ρ_B igual a la densidad de Bouguer. Es adecuada para ser utilizada en mediciones realizadas sobre la superficie y se define como la aplicación de todas las correcciones descritas anteriormente (Telford *et al.*, 2004).

$$A_B \text{ [simple]} = G_{OBS} - G_{Teo} \pm C_{AL} \mp C_B \text{ [mGal]} \quad (4.23)$$

$$A_B \text{ [completa]} = G_{OBS} - G_{Teo} \pm C_{AL} \mp C_B + C_T \text{ [mGal]} \quad (4.24)$$

4.51.3 Anomalía regional

Silva (2015) la define como la componente regional, producida por contrastes de densidad en las regiones inferiores de la corteza terrestre y las superiores del manto. Las anomalías regionales son de alta amplitud y baja frecuencia, su estudio permite determinar rangos geológicos a nivel macro-regional, tales como contacto de placas y discontinuidades.

4.51.4 Anomalía residual

Silva (2015) la define como la componente residual, producida por contraste de densidad en las regiones intermedias y superiores de la corteza. Las anomalías

residuales son de baja amplitud y alta frecuencia, su estudio permite determinar efectos someros como fallas y cuencas sedimentarias. Puede calcularse a través de la siguiente ecuación:

$$A_{RESIDUAL} = A_{BOUGUER} - A_{REGIONAL} \quad (4.25)$$

4.52 Separación regional-residual

La exploración e interpretación gravimétrica se enfoca principalmente en las anomalías que resultan del cambio en la densidad de los cuerpos del subsuelo a diferentes profundidades. Estas anomalías pueden provenir de masas cercanas a la zona de interés, sin embargo, otras pueden encontrarse en profundidades inferiores o superiores. A medida que las fuentes de anomalías se profundizan, la anomalía se amplía y se suaviza. Dependiendo de la profundidad del objetivo se utilizan anomalías de distintos rangos (Telford *et al.*, 1990). Algunos de los métodos utilizados para realizar esta separación de anomalías se explican a continuación:

4.52.1 Filtro Pasabanda

Los filtros pasabanda se utilizan para realzar los efectos de las diferentes fuentes que intervienen en la señal (provenientes del gráfico de análisis espectral), creando de este modo los mapas representativos de las fuentes profundas, intermedias y someras (Geosoft, 2007).

4.52.2 Filtro Butterworth

Este es un filtro usado como filtro pasa alto o pasa bajo, el cual permite el paso de frecuencias mayores o menores a cierto valor. Esto se logra controlando el grado del filtro, mientras se deja el número de ondas central fijo (Geosoft, 2007).

4.52.3 Continuación hacia arriba

Es utilizado para mejorar las respuestas de fuentes regionales o remover ruido llevando el plano de mediciones o de referencia a un nivel más elevado. Se considera un filtro que no produce efectos adversos considerables y no requiere de otros filtros o procesos para corregirlo (Geosoft, 2007).

4.52.4 Filtro Gaussiano regional/residual

Es un filtro suave que se utiliza frecuentemente como un filtro pasa bajo o pasa alto (Geosoft, 2007).

4.52.5 Continuación analítica del campo

La continuación analítica es un filtro utilizado en el procesamiento de las anomalías de la gravedad, su función consiste en separar las anomalías de distintos órdenes y para la apreciación cuantitativa de los parámetros de los objetos perturbadores. El filtro consiste en que, a mayor altura de la fuente, las anomalías disminuyen de distinta manera, según la profundidad y dimensiones de la fuente origen: Las anomalías de los objetos pequeños y que yacen a poca profundidad, decrecen con mayor rapidez que las anomalías de objetos más grandes y de mayor profundidad (Mironov, 1977).

4.53 Análisis espectral

El análisis espectral es un método que brinda la posibilidad de determinar las profundidades de un cuerpo aplicando filtros al mallado de datos en el dominio del espacio, y lo lleva al dominio de la frecuencia, permitiendo así transformar el espectro de energía en función de la frecuencia. Esta transformación se realiza mediante una transformada bidimensional de Fourier de la cual se obtiene posteriormente, un espectro radial. Este espectro radial es por utilidad representado gráficamente en logaritmo neperiano y se seleccionan bandas de frecuencias que conserven una relación lineal para el conjunto de datos. Los autores Spector y Grant (1970) enfatizan que las pendientes de las relaciones lineales son directamente proporcionales a la profundidad del tope de la estructura que se encuentra asociada a ese rango de frecuencias. Además, señalan que la ecuación para estimar la profundidad es la siguiente:

$$Z = \frac{m}{4\pi} \quad (4.26)$$

Donde: Z es la profundidad del tope de la fuente y m es la pendiente de la relación lineal.

4.54 Deconvolución de Euler

Es una herramienta de interpretación que emplea gradientes para localizar límites de cuerpos y estimar sus profundidades. El método de Euler se aplica sólo en funciones homogéneas, las cuales relacionan el campo gravimétrico o magnético del cuerpo y las componentes de sus gradientes con la localización de la fuente. El grado de homogeneidad se expresa por el índice estructural (SI), el cual es una medida de la tasa de atenuación del campo con la distancia a la fuente y brinda un medio de discriminar entre geometrías de fuentes (Thompson, 1982). La deconvolución de Euler se basa en la ecuación de homogeneidad de Euler (ecuación 4.27) que Reid *et al.* (1992) la describe como:

$$(x - x_0) \frac{\partial f}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial f}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial f}{\partial z} = N(B - F) \quad (4.27)$$

Donde: x_0, y_0, z_0 representan la posición de la fuente anómala; x, y, z la ubicación del campo total f ; B es la regional del campo total f y N es el grado de homogeneidad o índice estructural

4.55 Modelado gravimétrico

De acuerdo con Dobrin (1988), esta es una de las técnicas más usadas en la interpretación cuantitativa de datos gravimétricos consiste en calcular directamente el efecto gravimétrico de una distribución de densidad que se toma como un punto de partida y comparar el valor calculado con el valor observado. Esta distribución inicial se va modificando por ensayo y error (usualmente teniendo ciertos controles con información geológica y geofísica independiente) hasta alcanzar un ajuste satisfactorio entre los valores calculados y observados. Se han desarrollado diferentes métodos para calcular el efecto gravimétrico de una distribución de densidad supuestas en dos, dos y media y tres dimensiones. Uno de estos métodos es el método analítico de Talwani, el cual se usa para definir diferentes cuerpos o el basamento rocoso, usando un polígono de n -lados para aproximarse al contorno de la sección vertical de un cuerpo de dos dimensiones. Se puede calcular el efecto de la gravedad a mano o digitalmente en computadora (Talwani *et al.*, 1959).

CAPÍTULO V

MARCO METODOLÓGICO

Para alcanzar los objetivos planteados en la investigación, la metodología de trabajo fue llevada a cabo en tres fases, las cuales se resumen en el esquema presentado en la figura 5.1.

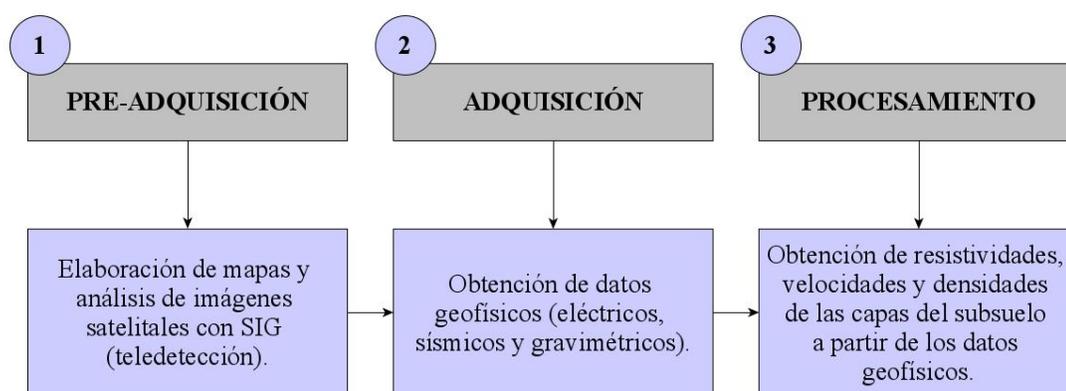


Figura 5.1 Representación esquemática de la metodología general de trabajo.

5.1 Metodología de pre-adquisición

5.1.1 Recopilación y revisión de información previa disponible

Esta etapa consistió en la revisión de información acerca de geología, geomorfología, hidrogeología, datos de pozos, imágenes satelitales, delimitación de la subcuenca hidrográfica y bases de datos disponibles en la zona de estudio. Las ubicaciones de los pozos encontrados, se muestran en la figura 5.2., mientras que la información detallada (nombre, coordenadas, profundidad perforada, profundidad entubada, nivel freático, nivel dinámico, diámetro de tubería, litología, etc.) se muestra en la tabla B.1 de la sección de apéndices B.

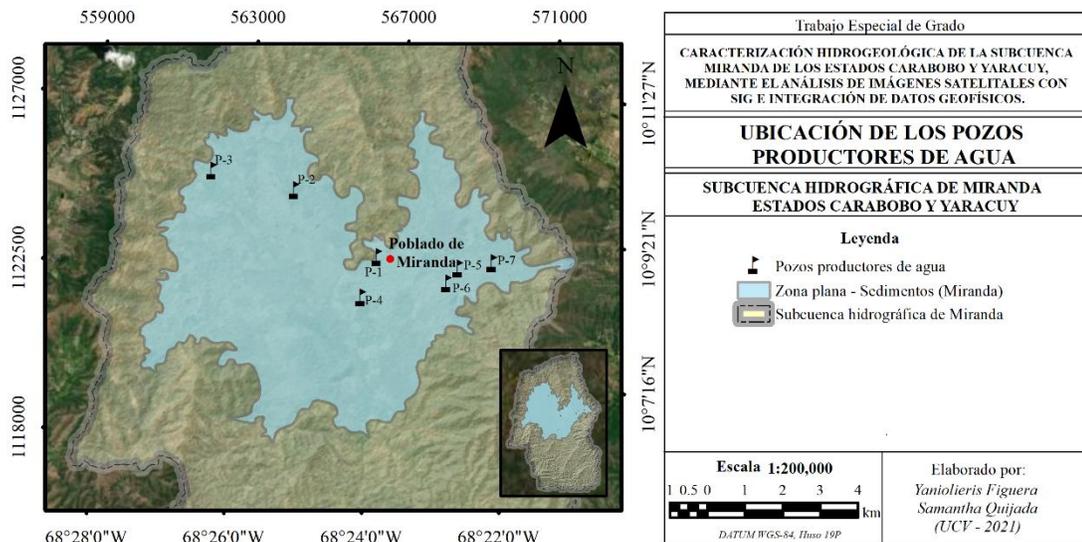


Figura 5.2 Ubicación de los pozos productores de agua en la zona de estudio.

5.1.2 Morfometría e hipsometría

El análisis de las características morfométricas y funcionales de una cuenca hidrográfica a través de parámetros de forma, relieve y red de drenajes, es básico en la modelación hidrológica para determinar el movimiento y captación del agua de lluvia (Gaspari *et al.*, 2012). El análisis de las características morfométricas de la subcuenca hidrográfica de Miranda, se basó en establecer y analizar los parámetros de forma y relieve y, aquellos que son relativos a la red hidrográfica, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y planillas de cálculo. En primera instancia, se procedió a calcular los parámetros iniciales a partir del modelo digital de elevación (MDE o DEM, por sus siglas en inglés) obtenido del satélite ALOS PALSAR y cuya resolución es 12.5 m x 12.5 m. Para ello se utilizó el software *ArcMap* versión 10.5 *ArcGis*, desarrollado por la empresa *ESRI*. Una vez obtenidos todos los datos básicos (perímetro, área, longitud máxima, longitud del cauce principal, ancho de la cuenca, altura mínima, altura máxima, altura media, desnivel altitudinal, número de cauces de orden 1) se procedió a calcular los demás parámetros mediante la aplicación de las ecuaciones establecidas en la sección 4.11 y el uso del software *Microsoft Excel*. Adicionalmente, se obtuvo la curva hipsométrica de la subcuenca, con la finalidad de estimar el grado de evolución de la misma. Para ello, se generó una tabla con los valores

de alturas más frecuentes, establecidos en 20 intervalos, ocupados desde la altura mínima hasta la altura máxima, así como el área ocupada respectivamente por estas alturas en cada intervalo. Una vez obtenida la tabla, se procedió a graficar la curva mediante el software *Microsoft Excel*.

A continuación, en la figura 5.3 se muestra un esquema con el resumen de la metodología para obtener la morfometría de la cuenca hidrográfica.

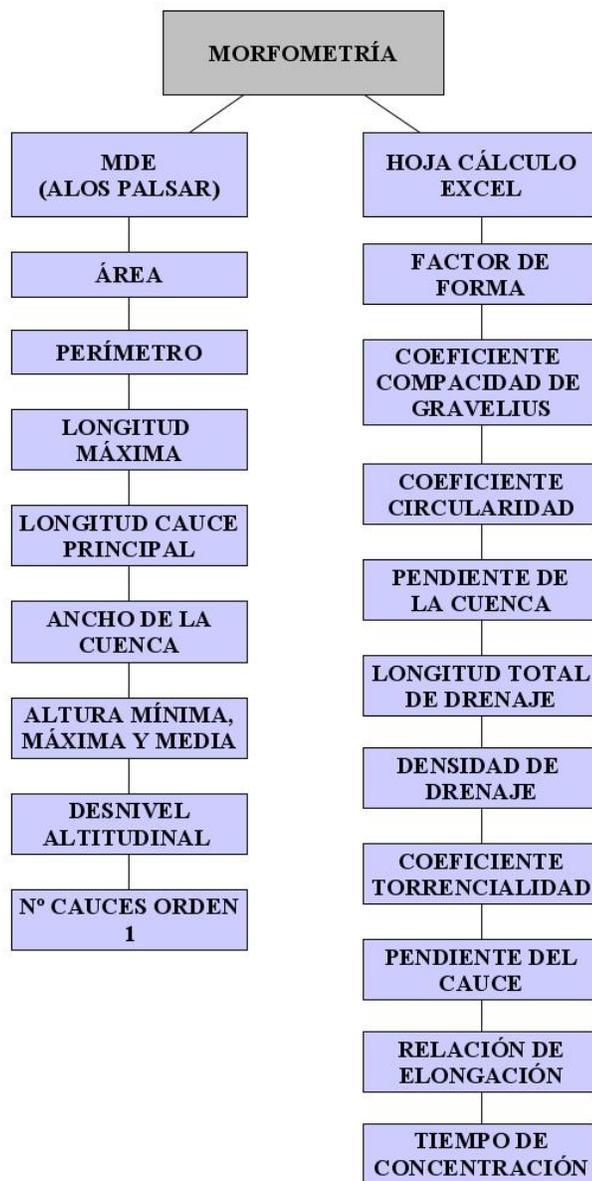


Figura 5.3 Esquema con la metodología para obtener la morfometría de la cuenca.

5.1.3 Delimitación de la subcuenca hidrográfica de Miranda

Para delimitar una cuenca hidrográfica se debe estudiar la conformación de los drenajes a los que está conectada (Bertoni y Lombardi, 2008). Esta delimitación se puede realizar usando las herramientas disponibles en la mayoría de los SIG (Gabrecht y Martz, 1993). Tales herramientas emplean algoritmos que identifican las divisorias de agua y la hidrografía de una matriz de representación topográfica como lo es un modelo digital de elevación (Fairfield y Leymarie, 1991). La delimitación de una cuenca mediante un MDE se basa en un algoritmo llamado Deterministic-8Node, el cual determina el flujo de agua que pasa de cada celda a sus 8 celdas contiguas, por medio de una cuadrícula de celdas representadas por valores de alivio altimétrico (de forma ortogonal y diagonal) en la dirección de la pendiente más alta, definiendo así los límites de los drenajes que conforman un área determinada. Para delimitar la subcuenca hidrográfica de Miranda se utilizó el MDE en combinación con herramientas suministradas por el software *ArcMap 10.5*, donde se definió la dirección y acumulación de flujo de agua de la zona de estudio. Posterior a ello, se definió el punto de desfogue de la subcuenca y se empleó la herramienta Watershed (cuenca) para delimitarla.

5.1.4 Elaboración de mapas temáticos

Se generó un conjunto de mapas temáticos, que tuvieron como finalidad principal la de servir de soporte para evaluar los lugares con condiciones más favorables para la aplicación de métodos geofísicos para la prospección de sistemas acuíferos. La elaboración de estos mapas está basada en el estudio realizado por los autores Macas y López (2018). Estos autores plantean que, para la elaboración del mapa de potencial acuífero, se debe aplicar un ADMC y la evaluación de imágenes de satélites en donde, además, se debe establecer un peso jerárquico de un total de cinco (5) capas correspondientes a mapas principales (permeabilidad, pendientes, densidad de drenajes, precipitación e índice de vegetación). Para la elaboración de estos mapas, se utilizó el software *ArcMap* versión *10.5*. El esquema de la figura 5.4 resume la metodología general que se siguió en esta fase de trabajo.

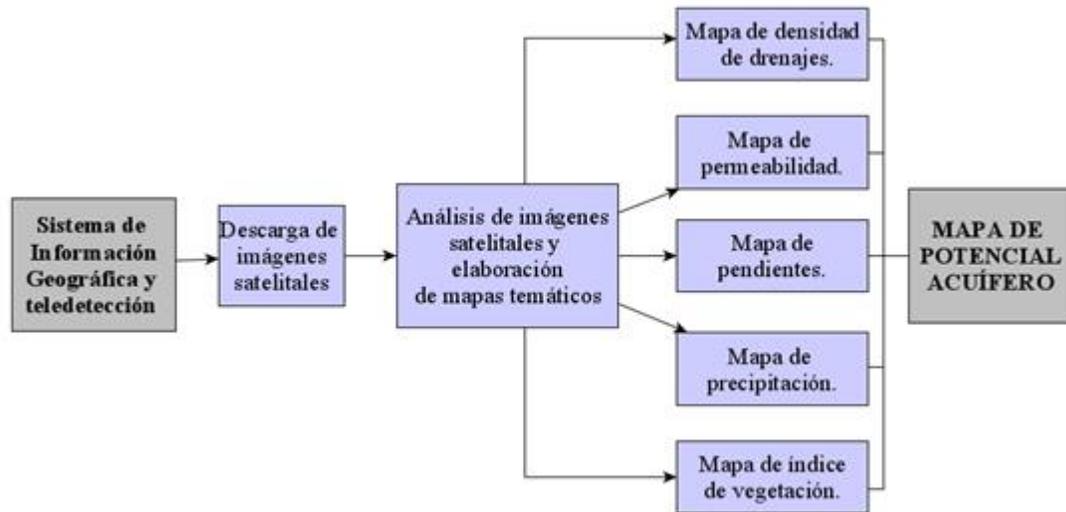


Figura 5.4 Metodología general aplicada durante la elaboración de los mapas temáticos.

5.1.4.1 Mapa de densidad de drenajes

Según Tucci (2004) la densidad de drenajes es un indicador del relieve superficial y de las características geológicas de las cuencas que permite evaluar la eficacia de drenaje de una cuenca. Cuanto mayor sea la densidad de drenajes, mayor será la capacidad de la cuenca.

El mapa de densidad de drenajes se obtiene a partir de la red de drenajes, la cual permite conocer los tipos de afluentes de agua presentes en la zona, tales como, ríos, riachuelos, lagunas, lagos, etc.

- Red de drenajes

Para obtener la capa de la red de drenajes de la zona de estudio, se utilizó nuevamente el MDE, obtenido del satélite ALOS PALSAR. Una vez cargado el MDE en el software se siguió el siguiente procedimiento:

- Primeramente, se aplicó una herramienta para rellenar vacíos y quitar imperfecciones en la información del MDE.
- Después, con la herramienta correspondiente, se obtuvo la dirección del flujo de la red hídrica.

- Posteriormente, se obtuvo el flujo acumulado de la red hídrica, a partir de su dirección.
- Se calculó el orden de la red hídrica, a partir del flujo acumulado.
- Seguidamente, se aplicó un condicional con el fin de obtener todos los drenajes de orden 2 (afluentes tipos ríos).
- Luego, una vez obtenidos los afluentes de ríos y la dirección del flujo de los mismos, se calculó la diferencia de orden de la red hídrica.
- Finalmente, con la finalidad de obtener la longitud de los ríos se transformó la imagen *raster* obtenida a una capa de polilíneas, y de esta manera se generó la capa de la red hídrica.

Este procedimiento se observa con más detalle en el esquema de la figura 5.5 mostrada a continuación.

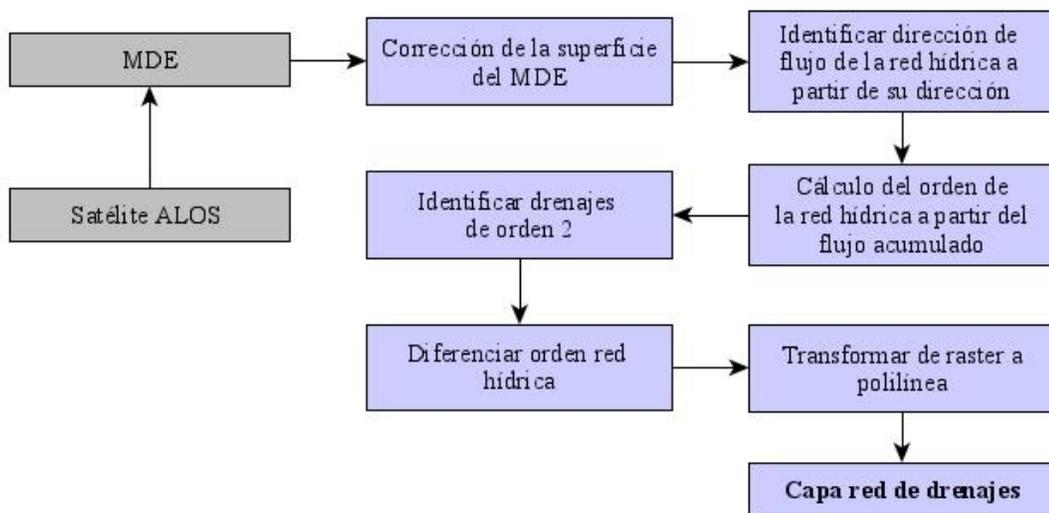


Figura 5.5 Metodología para elaborar la capa de la red de drenajes.

En la figura 5.6, se muestra el mapa de red de drenajes de la subcuenca hidrográfica de Miranda. La desembocadura del drenaje principal se encuentra hacia la zona sur, teniendo un flujo preferencial de orientación norte-sur. La red de drenajes es de gran

importancia para el estudio hídrico de la cuenca, ya que aporta la información necesaria para conocer las zonas con mayor densidad de drenajes.

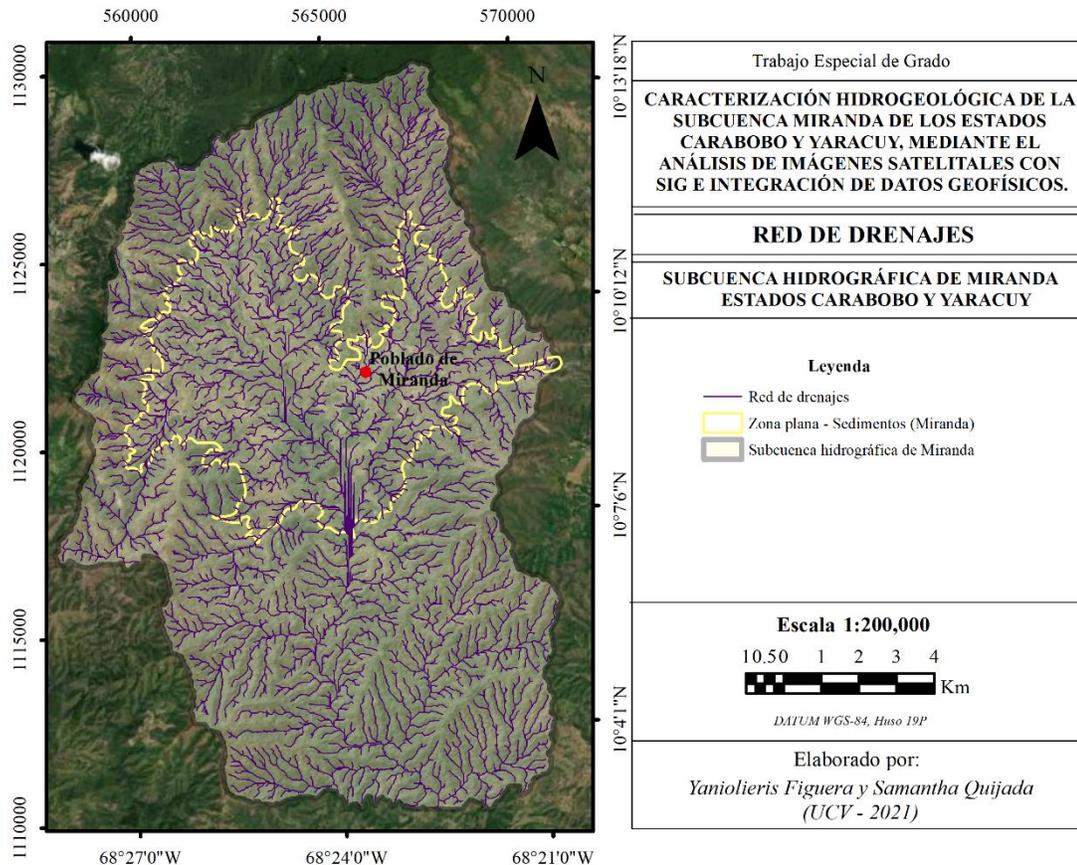


Figura 5.6 Mapa correspondiente a la red de drenajes (orden 2, afluentes tipos ríos).

Una vez generada la capa de la red de drenajes, se procedió a generar la capa del mapa densidad de drenajes, siguiendo el siguiente procedimiento:

- Se unificaron los objetos de la capa de la red de drenajes, ya que se presentaban como objetos independientes uno de otro.
- Se generó una red de celdas rectangulares por un área definida, con el fin de superponerlo a la red de orden hídrica o red de drenajes.
- Se agregó una columna consecutiva en la tabla de atributos de la red de celdas rectangulares, para posteriormente, enlazar los campos de la red de drenajes con la red de celdas.

- Luego, con el fin de obtener la delimitación de los drenajes por el área de cada celda (1 km²) para toda el área de estudio, se procedió a intersectar la red de drenajes con la red de celdas rectangulares.
- Seguidamente, a través del cálculo de geometría, se calculó la longitud de los drenajes.
- La capa correspondiente a la red de celdas rectangular se transformó de polígonos a puntos, con la finalidad de buscar el punto medio de cada polígono.
- Seguidamente, a los puntos obtenidos en la parte anterior se les asignó el atributo de los drenajes cortados por cada kilómetro cuadrado.
- A los puntos obtenidos en el paso anterior, se les calculó la distancia Euclidiana (distancia del centro de cada celda de la red hídrica hasta el centro de cada una de las celdas circundantes). Esto se realizó a partir de la herramienta de interpolación llamada Ponderación de Distancia Inversa (PDI).
- Finalmente, se generó el mapa de densidad de drenajes, el cual fue ajustado y guardado en formato de producto final.

Este procedimiento se observa con más detalle en el diagrama de flujo de la figura 5.7 mostrada a continuación.

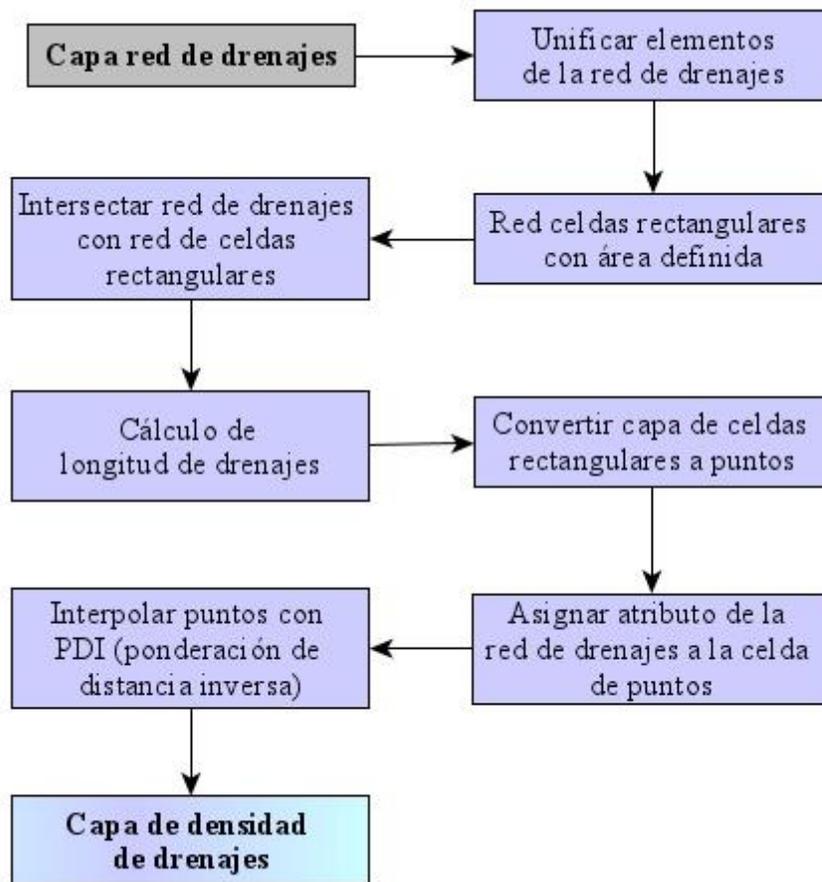


Figura 5.7 Metodología para obtener el mapa de la densidad de drenajes.

Con el mapa de densidad de drenajes (figura 5.8) se puede inferir las zonas de posible acumulación de agua subterránea. Los valores de alta densidad de drenajes indican una baja posibilidad de existencia de agua subterránea, en cambio, las zonas que presentan una baja densidad de drenajes poseen una mayor infiltración y poca presencia de escorrentía superficial (Rahmati *et al.*, 2015).

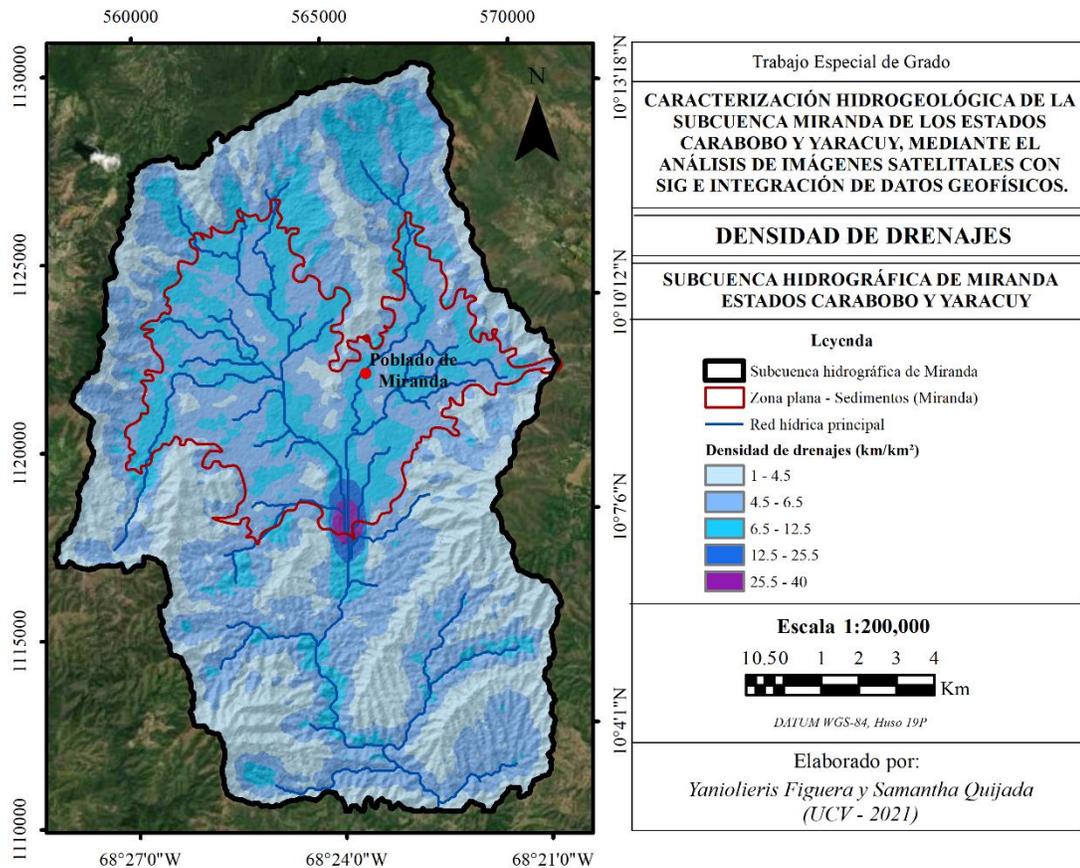


Figura 5.8 Mapa correspondiente a la densidad de drenajes.

5.1.4.2 Mapa de permeabilidad de las rocas

Para obtener la permeabilidad de las rocas de una zona de estudio se debe tomar en cuenta su información geológica. El mapa de permeabilidad se obtiene a partir del análisis de la litología y la densidad de lineamientos. Ayazi *et al.* (2010) explican que la litología influye tanto en la porosidad como en la permeabilidad de las rocas acuíferas. Para definir la permeabilidad de las formaciones presentes en la zona de estudio se tomó en cuenta los datos de la tabla 5.1, donde se muestra la relación que hay entre las distintas litologías y la permeabilidad:

Tabla 5.1 Atributos de litología y permeabilidad (tomado y modificado de Macas y López, 2018).

Permeabilidad	Litología
Alta	Depósito aluvial
	Terraza aluvial
Media	Depósito glacial
	Conglomerado arenisca
Impermeable	Granito
	Peridotita
	Filita
	Esquisto
	Anfibolita
	Riolita, tonalita
Baja	Andesita basáltica
	Conglomerado arcilla
	Andesitas
	Arcilla
	Caliza
	Pizarra
	Rocas metamórficas
	Cuarcita
	Lutita
Muy baja	Rocas volcánicas
	Intercalaciones de lava
	Intercalaciones de sedimentos
	Capas de lava
	Capas metavolcánicas

Tomando en cuenta la geología de la zona de estudio, se definió el tipo de permeabilidad de cada formación según su contenido litológico, destacando el predominio de rocas impermeables en la zona montañosa conformadas por esquistos con variación de composición para cada formación, a excepción de la zona central de la cuenca, en donde se encuentran aluviones del Cuaternario con sedimentos poco consolidados de arcillas, limos, arenas, gravas y peñones (Tahal, 1970), siendo la arena la más permeable (tabla 5.2).

Además, como se dijo anteriormente, se tuvo que tomar en cuenta las zonas con mayor densidad de lineamientos (tabla 5.3), ya que éstas poseen un mayor grado de fracturamiento y permiten una mayor infiltración del agua. Por lo tanto, donde se

encuentre mayor densidad de lineamientos hay una mayor probabilidad de recarga de agua (Tapia *et al.*, 2015).

Tabla 5.2 Clasificación de litologías de acuerdo a su permeabilidad.

Litología según su permeabilidad		
Formaciones geológicas	Categoría	Ranking
Aluvión	Alta	5
Esquistos Las Mercedes	Muy baja	2
Fm. Maporita	Muy baja	2
Complejo San Julián	Impermeable	1
Complejo Nirgua	Impermeable	1

Tabla 5.3 Clasificación de categorías según la densidad de lineamientos geológicos.

Densidad de lineamientos	
Clase (km/km²)	Ranking
4.6 - 7	5
3 - 4.6	4
2 - 3	3
0.85 - 2	2
0 - 0.85	1

Una vez establecidos los rangos para cada uno, se procedió a realizar la comparación por ADMC en conjunto con PAJ, en donde se estableció que la litología tenía una importancia del 90% y la densidad de lineamientos correspondía al 10% de influencia sobre la capa final de permeabilidad.

Posterior a esto, se realizó la comparación de matrices pareadas normalizadas y la asignación de su peso normalizado. El peso para la capa de geología y la capa de densidad de lineamientos se obtuvo con base en el estudio y metodología aplicada por los autores Macas y López (2018). Para calcular el peso normalizado, se utilizó la ecuación 5.1:

$$Peso\ normalizado(w) = \frac{Peso\ asignado(w_i)}{\sum_{k=1}^n Peso\ total\ (w_k)} \quad (5.1)$$

Donde el peso asignado (w_i) corresponde al peso de la muestra y el peso total (w_k) se refiere a la suma total de todos los pesos. La sumatoria de los pesos normalizados debe ser igual a 1. Se obtuvo un peso normalizado de 0.90 para la capa temática de litología

y un peso de 0.10 para la capa de densidad de lineamientos. Finalmente se aplicó la herramienta de Asignación ponderada multicriterio del Software *ArcMap 10.5* para obtener el mapa de permeabilidad.

- Densidad de lineamientos

Para generar la capa del mapa de densidad de lineamientos se usó, en primera instancia, el software “Geomatica 2016” del paquete *PCI Geomatics*, con el fin de extraer los lineamientos desde el MDE de la zona de estudio, para lo cual, se utilizó la herramienta de extracción del programa. Seguidamente, se guardó la capa en formato vectorial (*shape*), para luego ser utilizado en *ArcMap* y de esta manera generar la capa de densidad de lineamientos, donde se siguió la metodología descrita anteriormente para obtener la densidad de drenajes.

La figura 5.9 muestra las zonas donde se concentran la mayor cantidad de lineamientos.

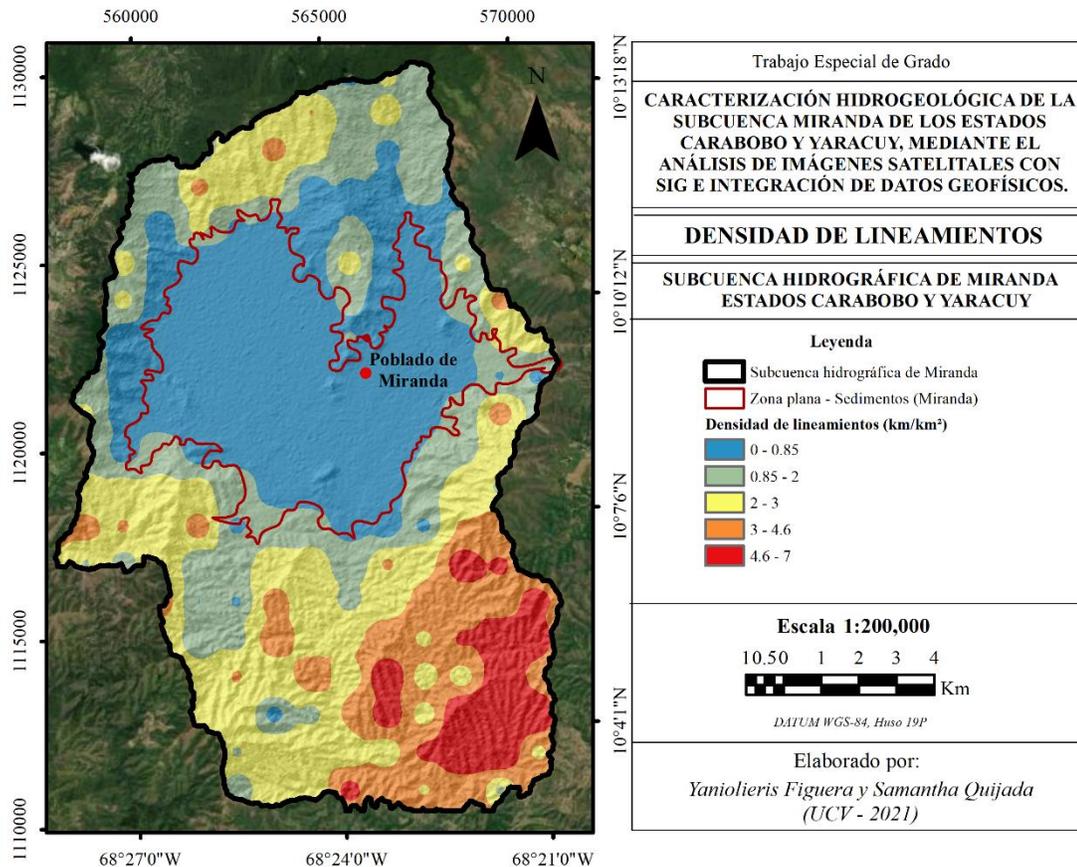


Figura 5.9 Mapa de densidad de lineamientos.

Una vez generada la capa de densidad de lineamientos, se procedió a generar la capa de permeabilidad. Para ello, se utilizó, no solo la capa de densidad de lineamientos, sino también, la capa de geología, mediante el siguiente procedimiento:

- Primeramente, se reclasificó cada capa a usar con el fin de asignarles una escala de valores, donde el número más bajo representaba el menos importante y el número más alto al más importante. Para efectos de este estudio se utilizó una escala del 1 al 5 para las capas de geología y densidad de lineamientos.
- Una vez se generaron las capas con los valores correspondientes, se procedió a generar el mapa de permeabilidad, haciendo uso de la “superposición ponderada de análisis multicriterio (ADMCM)”, en donde se asignó porcentaje de peso a cada capa, utilizando la herramienta correspondiente a la superposición ponderada (*weighted overlay*).
- Luego, se procedió a colocar los parámetros para la superposición ponderada.
- Finalmente se generó la capa de permeabilidad de las rocas, el cual fue ajustado y guardado de forma correspondiente (figura 5.11 permeabilidad de las rocas).

Este procedimiento se observa con más detalle en el esquema de la figura 5.10 que se muestra a continuación.



Figura 5.10 Metodología para realizar la capa correspondiente al mapa de permeabilidad de las rocas.

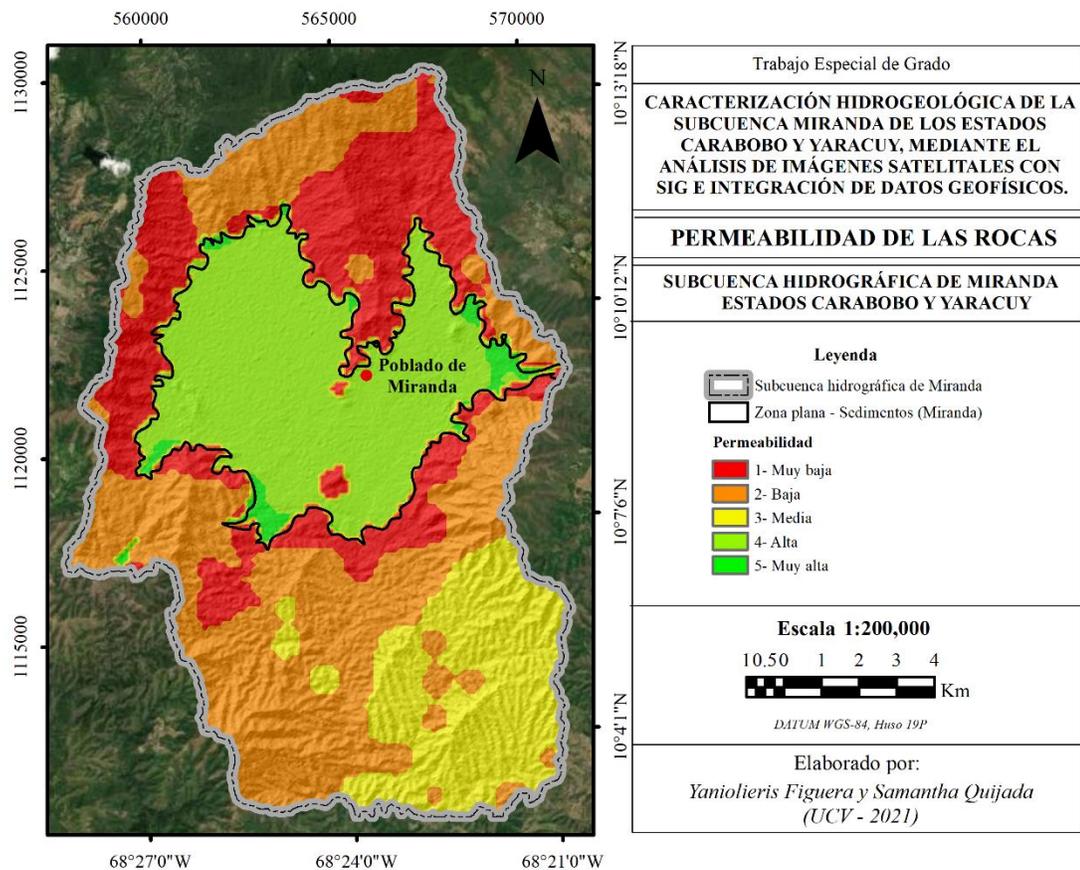


Figura 5.11 Mapa de permeabilidad de las rocas.

5.1.4.3 Mapa de pendientes del terreno

En general, el mapa de pendientes representa la inclinación del terreno. Los autores Delgado y Godoy (2009) definen la pendiente como la inclinación, cuesta o declive de un terreno con respecto a la horizontal. Estos autores indican que la pendiente es una característica fundamental del territorio, pues influye directamente en elementos tan importantes como la vegetación o la construcción de edificaciones por parte del ser humano. En el caso de este estudio, el mapa de pendientes permite identificar las posibles zonas de recarga. Macas y López (2018) establecen que la pendiente es un factor para la predicción de zonas potenciales de agua y que las zonas con menos pendiente son las más adecuadas para la recarga de aguas subterráneas.

Para generar la capa que representa el mapa de pendientes se utilizó, al igual que en los dos mapas anteriores, el Modelo Digital de Elevación (MDE) o DEM (*Digital Elevation Model*) de la zona de estudio.

Como se observa en la figura 5.12, se necesitó de un único paso, en donde solo se utilizó la herramienta “slope”, la cual consiste en identificar la pendiente de cada celda. De esta manera se generó la capa correspondiente al mapa de pendientes, la cual fue ajustada y guardada de forma correspondiente.

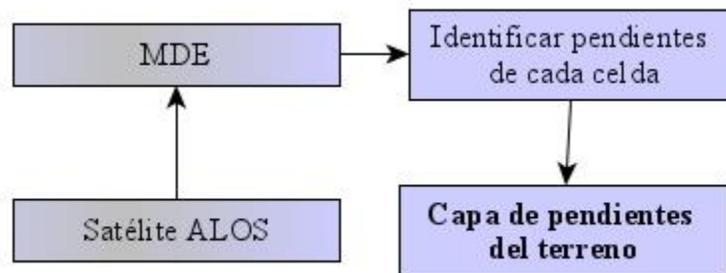


Figura 5.12 Metodología para obtener la capa correspondiente al mapa de pendientes del terreno.

En la figura 5.13 se muestra el mapa de pendientes de la zona que indica la inclinación del terreno lo que permite determinar la posibilidad que tiene el sistema hídrico de la zona para fluir y llegar a la zona plana.

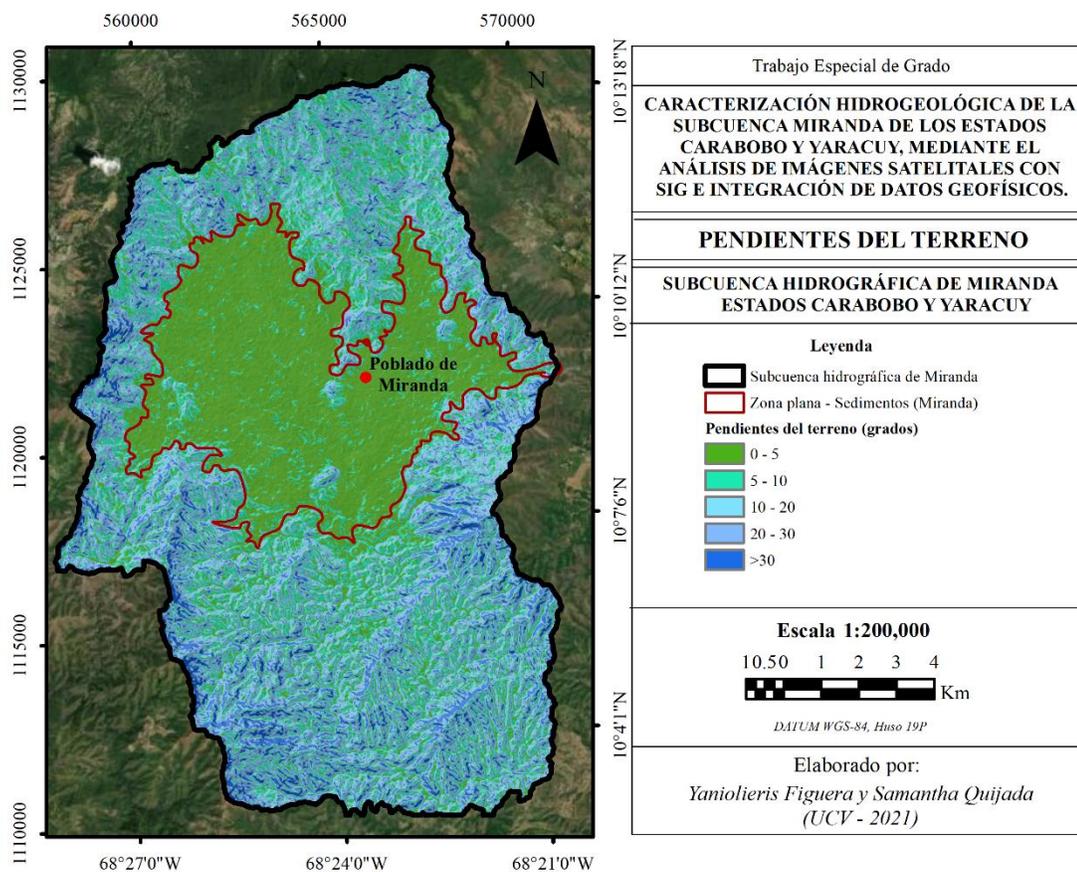


Figura 5.13 Mapa de pendientes del terreno en grados

5.1.4.4 Mapa de precipitación

La precipitación determina la cantidad de agua que podría filtrarse en acuíferos, siendo la principal fuente de recarga de los mismos (Nampak *et al.*, 2014), por lo que es un factor de gran importancia a considerar en la elaboración del mapa final de potencial acuífero. Musa *et al.* (2009) en su estudio afirman que la precipitación es considerada como la mayor fuente de recarga.

Para generar la capa que representa el mapa de precipitación se utilizaron datos de 11 estaciones climatológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrológica (INAMEH) que se encontraban cercanas a la zona de estudio. Se utilizó un promedio de precipitación que abarca desde el año 2011 hasta el 2019. Las estaciones utilizadas se muestran a continuación en la tabla 5.4:

Tabla 5.4 Estaciones climatológicas usadas para generar mapa de precipitación (tomado y modificado del INAMEH, 2020).

Nombre	Este (m)	Norte (m)	Estado	Precipitación (mm)
Guaparo El Café	603300.50	1135018.40	Carabobo	1.104
Morón Pequivén	597124.30	1139921.60	Carabobo	692.200
Valencia Oficina	608177.50	1131077.60	Carabobo	953.500
Guataparo Campo de Golf	598708.10	1124959.80	Carabobo	1310.667
Campo Carabobo	592724.10	1106862.70	Carabobo	896.850
Bejuma Prefectura	580962.80	1125279.20	Carabobo	1151.650
Miranda La Trinidad	563223.10	1124850.00	Carabobo	879.300
Salón Universidad	553679.30	1120931.90	Yaracuy	309.520
Temerla	562419.60	1135728.30	Yaracuy	745.100
Taria	553679.30	1152079.50	Yaracuy	632.333
Puerto Cabello Base Naval	608490.10	1159760.30	Carabobo	234.200

Para poder generar la capa correspondiente al mapa de precipitación, tal como se muestra en el diagrama de la figura 5.14, se realizó una interpolación entre todos los puntos (cargados previamente), para efectos de este estudio se utilizó la interpolación *spline*, ya que de todas fue la que presentó mejores resultados. Finalmente, para que la capa tuviese valores dentro de la ventana de estudio se configuraron los parámetros de interpolación.

Luego de establecer los parámetros correspondientes, se generó el mapa de precipitación.

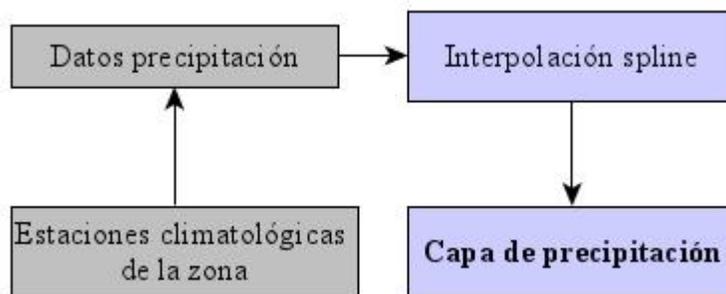


Figura 5.14 Metodología para elaborar la capa correspondiente al mapa de precipitación.

En la figura 5.15 (mapa de precipitación) se muestra que la mayor cantidad de precipitación se encuentra hacia la parte sur de la zona, mientras que al norte la precipitación se da en menor proporción.

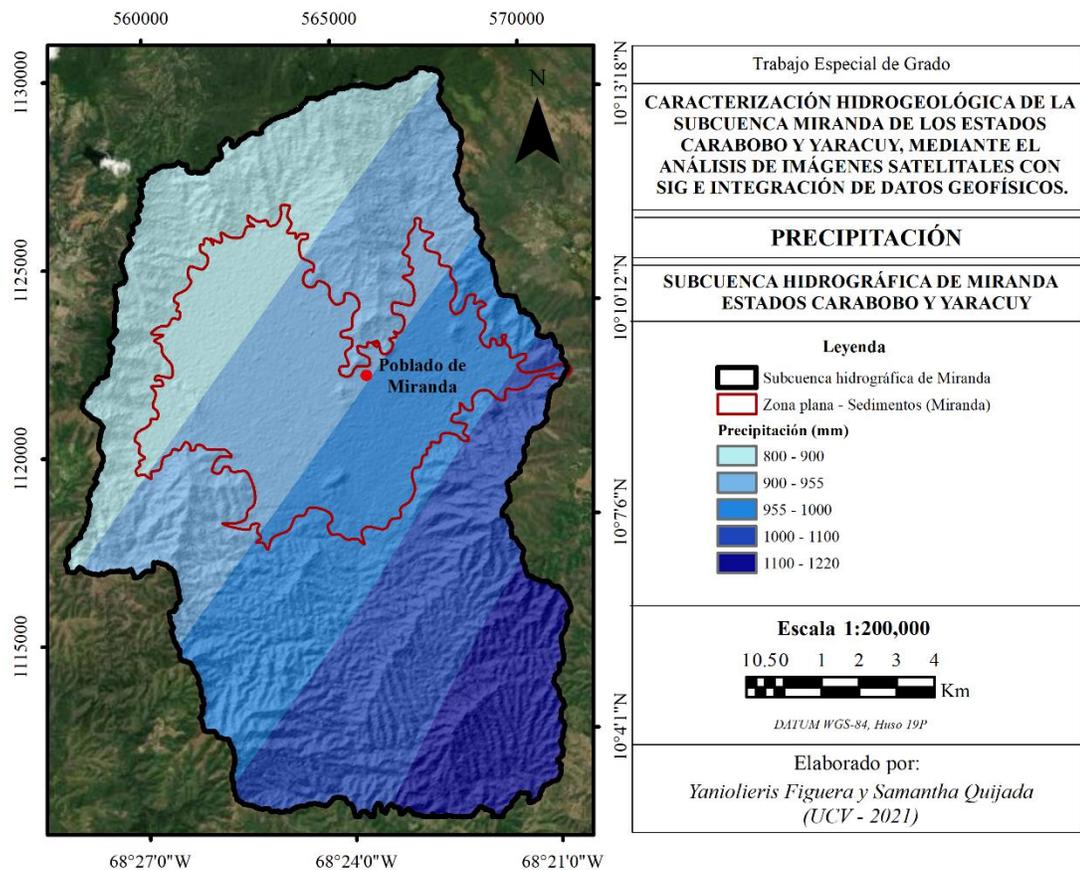


Figura 5.15 Mapa de precipitación (desde el 2011 hasta el 2019).

5.1.4.5 Mapa del índice de vegetación

En general, la vegetación podría indicar la presencia de agua en un lugar determinado. Según Alonso, D. (2015) el mapa de índice de vegetación representa combinaciones de bandas espectrales obtenidas por satélites, con la finalidad de realzar la vegetación de la zona de estudio en función de la respuesta espectral y la atenuación de otros elementos como el suelo, la iluminación, el agua, etc.

Para la elaboración de esta capa se utilizó el índice de vegetación denominado Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (IVDN), también conocido como NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index, por sus siglas en inglés*), ya que resulta el mejor y más preciso. Alonso, D. (2015) indica que este índice consiste en estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja. Este autor también explica que para el cálculo de los índices de vegetación es

necesaria la información que se encuentra en las bandas roja e infrarroja de ese espectro electromagnético y se calcula a través de la ecuación 5.2:

$$IVDN = \frac{(NIR - VIS)}{(NIR + VIS)} \quad (5.2)$$

Donde NIR es la banda de infrarrojo cercano y VIS es la banda roja visible.

Para generar la capa del mapa correspondiente al índice de vegetación se utilizaron imágenes ópticas de la misión Sentinel-2, obtenidas de forma libre a través de la página web del servicio Copernicus Hub de la agencia EOS. Las descripciones de las bandas de las imágenes espectrales correspondientes a este satélite se pueden observar en la tabla 4.5 del marco teórico.

Para obtener este índice se operó con las bandas de la imagen de la siguiente forma: $IVDN = (B8-B4) / (B8+B4)$, las cuales corresponden a las respectivas bandas del rojo e infrarrojo cercano de la misión *Sentinel-2* (Alonso D., 2019).

Luego, se utilizó la herramienta correspondiente para calcular el índice de vegetación.

Finalmente, se generó la capa correspondiente al mapa de índice de vegetación. En la figura 5.17 (índice de vegetación) se observa que en la zona hay buena cobertura vegetal, especialmente en las zonas norte y sur.

Este procedimiento se observa con más detalle en el diagrama de flujo de la figura 5.16 mostrada a continuación.

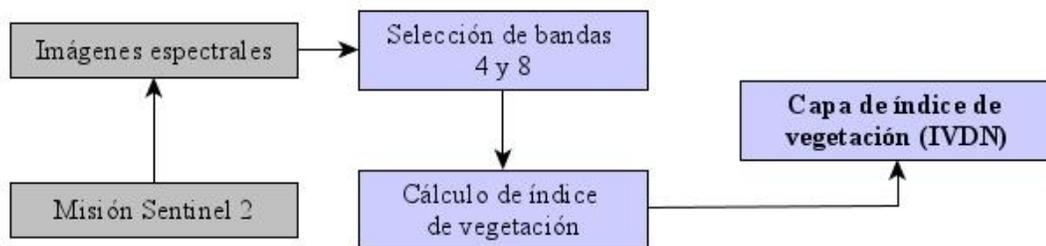


Figura 5.16. Metodología para generar la capa correspondiente al índice de vegetación.

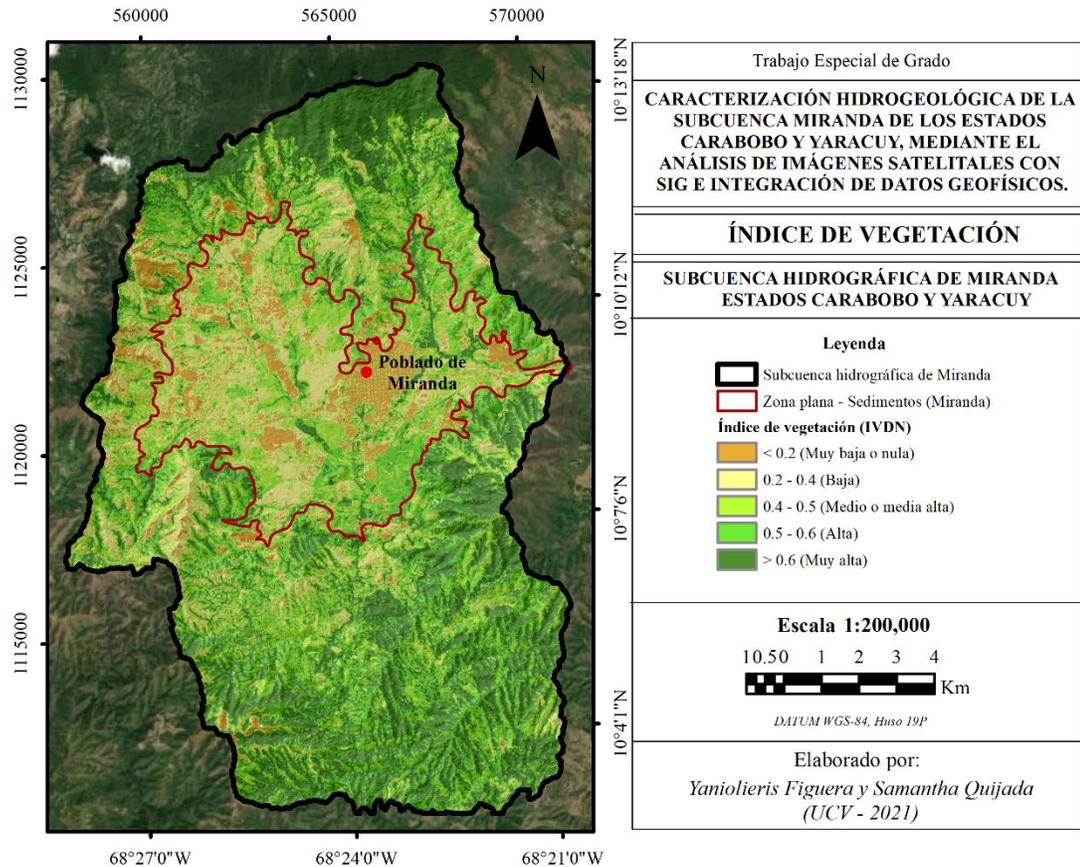


Figura 5.17 Mapa del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (IVDN).

5.1.5 Mapa de potencial acuífero

Como se mencionó anteriormente, para generar el mapa de potencial acuífero se hizo referencia a los cálculos realizados por los autores Macas y López (2018). En su estudio, ellos usaron la herramienta de Análisis de Decisión Multi-Criterio (ADMC), donde aplicaron el Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ) para establecer el peso normalizado para cada capa temática (permeabilidad, precipitación, densidad de drenajes, pendientes e índice de vegetación). La jerarquía de cada capa la obtuvieron mediante la escala de comparación (1-9) establecida por Saaty (1980). La matriz de comparaciones pareadas generada para el proceso de análisis jerárquico fue propuesta por Saaty (*op. cit.*) (tabla 5.5). La metodología aplicada para poder generar el mapa de potencial acuífero se muestra en la figura 5.18.

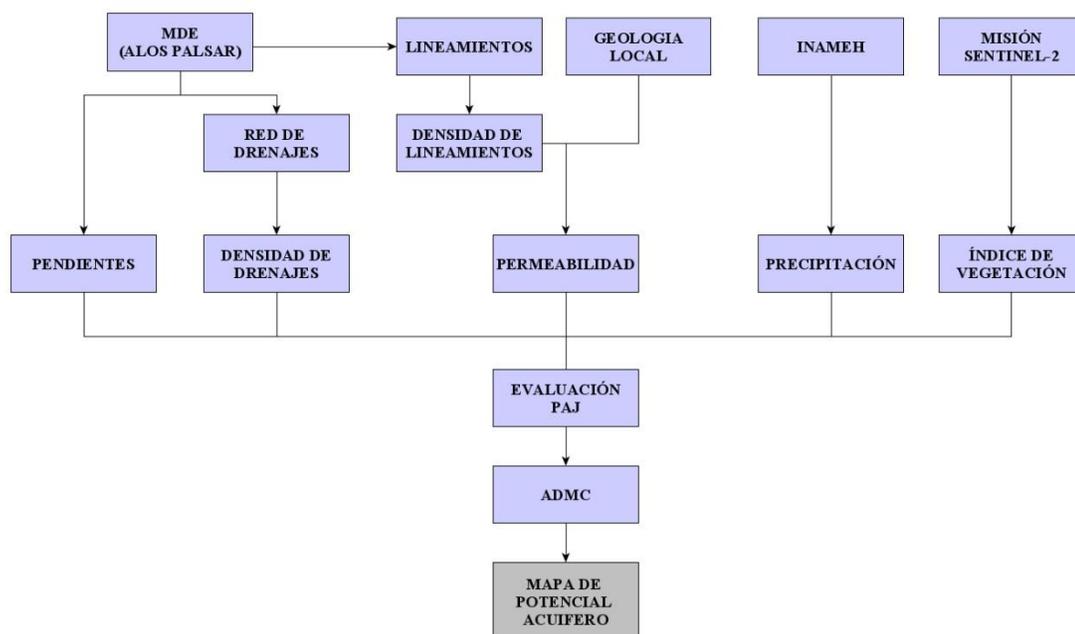


Figura 5.18. Metodología para generar el mapa de potencial acuífero.

Tabla 5.5 Matriz de comparaciones pareadas para el proceso de análisis jerárquico (tomado y modificado de Macas y López, 2018).

Capa temática	Permeabilidad	Densidad de drenajes	Pendientes	Precipitación	Índice de vegetación
Permeabilidad	1	5	6	7	8
Densidad de drenajes	0.20	1	4	5	6
Pendientes	0.17	0.25	1	2	4
Precipitación	0.14	0.20	0.50	1	3
Índice de vegetación	0.13	0.17	0.33	0.33	1
Suma de cada columna	1.63	6.62	11.83	15.33	22

Luego de generar la matriz de comparaciones pareadas (tabla 5.5), se calculó el peso normalizado (W) (ecuación 5.1) para cada capa temática individualmente (tabla 5.6) y para cada capa en conjunto (tabla 5.7) (ecuación 5.1). La asignación de estos pesos fue verificada con la relación de consistencia (CR) establecida por Saaty (*op. cit.*) (ecuación 5.3). El índice RI utilizado fue de $RI=1.12$, valor establecido por Saaty (*op. cit.*) para el número de capas utilizadas $n=5$.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5.3)$$

Para el cálculo del índice de consistencia (CI) se utilizó la ecuación 5.4, obteniendo un valor de CI = 0.09 y finalmente un valor de CR = 0.08. Este valor no debe superarse de 0.10, ya que valores inferiores a este indican que los pesos normalizados asignados son coherentes y consistentes.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (5.4)$$

Según los pesos asignados en la tabla 5.6 cada capa temática fue reclasificada basándose en la escala de clasificación del 5 a 1, conservando la misma cantidad de elementos, siendo este método muy efectivo para clasificarlas según los autores (Nampak *et al.*, 2014; Rahmati *et al.*, 2015). Los valores de cada ranking se muestran en la tabla 5.7 (tabla de valores de potencial acuífero).

Tabla 5.6. Peso normalizado y ranking asignado para cada capa temática.

Capa temática	Categoría	Ranking	Peso normalizado
Permeabilidad	Alta	5	0.444
	Media	4	0.222
	Baja	3	0.167
	Muy baja	2	0.111
	Impermeable	1	0.056
Precipitación (mm)	38.8-31.8	5	0.333
	31.8-27	4	0.267
	27-23	3	0.200
	23-18.5	2	0.133
	18.5-12.6	1	0.067
Pendientes (°)	70-28.8	5	0.333
	28.8-21.1	4	0.267
	21.1-14.5	3	0.200
	14.5-7.7	2	0.133
	7.7-0	1	0.067
Densidad de drenajes (km/km ²)	147.087-32.628	5	0.333
	32.628-9.954	4	0.267
	9.954-5.463	3	0.200
	5.463-4.573	2	0.133
	4.573-82	1	0.067
Índice de vegetación	0.78-0.55	5	0.333
	0.55-0.45	4	0.267
	0.45-0.34	3	0.200
	0.34-0.22	2	0.133
	0.22-(-0.35)	1	0.067

Tabla 5.7. Matriz de comparación pareada normalizada y pesos normalizados para cada capa temática (tomado y modificado de Macas y López, 2018).

Capa temática	Permeabilidad	Densidad de drenajes	Pendientes	Precipitación	Índice de vegetación	Peso normalizado (%)
Permeabilidad	0.61	0.76	0.51	0.46	0.38	54
Densidad de drenajes	0.12	0.15	0.34	0.33	0.29	24
Pendientes	0.10	0.04	0.08	0.13	0.14	11
Precipitación	0.09	0.03	0.04	0.07	0.14	7
Índice de vegetación	0.08	0.03	0.03	0.02	0.05	4

Tabla 5.8. Tabla clasificación potencial acuífero.

Capa temática	Categoría	Ranking
Mapa de potencial acuífero	Muy alto	5
	Alto	4
	Moderado	3
	Bajo	2
	Muy bajo	1

Cada capa fue procesada en el modelo de datos vectoriales, para finalmente ser calculado el mapa de potencial acuífero, utilizando la herramienta de superposición ponderada de análisis multi-criterio (*weighted sum*). Por último, para obtener la escala de clasificación de la tabla 5.8 se usó la herramienta de reclasificación, para generar la capa correspondiente al mapa de potencial acuífero de la zona de estudio.

5.2 Metodología de adquisición

Una vez elaborado el mapa de potencial acuífero se establecieron los lugares óptimos y adecuados para hacer la prospección geofísica. La mayoría fueron realizados en la zona con menor pendiente, aplicando métodos eléctricos, sísmicos y gravimétricos, con el fin de complementar la información suministrada por este y todos los mapas elaborados. La adquisición de los datos geofísicos se realizó de la siguiente manera:

5.2.1 Métodos eléctricos

La adquisición de los datos geoelectrónicos fue realizada en un lapso de diecisiete (17) días, desde el 27/08/2019 hasta el 13/09/2019. Para ello se utilizaron los equipos que se listan en la tabla B.2 de la sección de apéndices B.

Se obtuvo como producto un total de 16 sondeos eléctricos verticales tipo Wenner Alfa, los cuales fueron distribuidos, de acuerdo a las facilidades de acceso a las zonas aledañas de la población de Miranda. Estos se ubicaron específicamente en aquellas áreas de baja pendiente o zonas aluvionales pertenecientes a la subcuenca, que fueron identificadas con mayor potencial acuífero mediante el ADMC y PAJ, con la finalidad de determinar los espesores y litologías favorables para la acumulación de aguas subterráneas. En la figura 5.19 se observa la ubicación de los sondeos eléctricos verticales, los cuales están referenciados al punto de atribución o punto medio de cada sondeo.

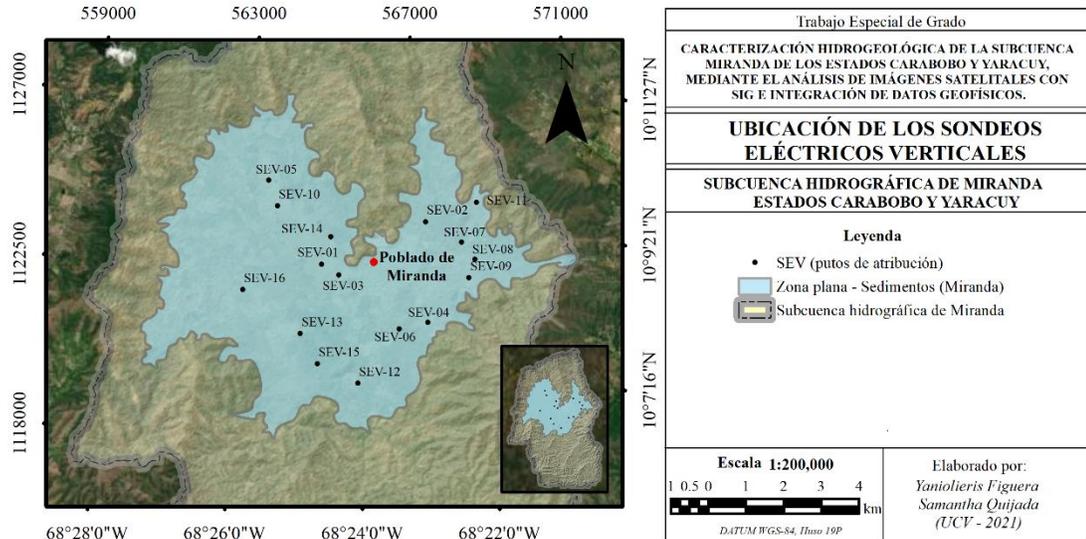


Figura 5.19 Ubicación de los puntos medios de los sondeos eléctricos verticales.

A continuación, en la tabla 5.9 se presentan los datos de identificación y ubicación de la totalidad de sondeos realizados.

Tabla 5.9 Ubicación e identificación de los sondeos eléctricos verticales (coordenadas están referidas al datum geodésico WGS84).

Identificador de Sondeo	Fecha	Lugar	Longitud (°)	Latitud (°)	Rumbo	Elevación (m)
SEV-01	27/08/2019	Hacienda Monterrey	-68.40976	10.15164	N35°E	597
SEV-02	28/08/2019	Agropecuaria San Miguel	-68.38456	10.16180	N24°E	622
SEV-03	29/08/2019	Sector La Gripta (Urb. Diego Salazar)	-68.40562	10.14902	N45°E	609
SEV-04	31/08/2019	Urb. San Roque	-68.38406	10.13758	N52°W	620
SEV-05	31/08/2019	Sabana de Arriba (La Podenca)	-68.42258	10.17186	N3°E	617
SEV-06	01/09/2019	Urb. San Roque	-68.39096	10.13609	N28°E	610
SEV-07	04/09/2019	Finca El Milagro (Empresa Pardo Suizo)	-68.37579	10.15689	N25°E	627
SEV-08	04/09/2019	Finca El Milagro (Empresa Pardo Suizo)	-68.37256	10.15272	N89°W	628
SEV-09	05/09/2019	Agrícola Las Clavelinas	-68.37408	10.14831	N59°E	630
SEV-10	05/09/2019	Urb. La Guaruga	-68.42044	10.16568	N49°W	613
SEV-11	06/09/2019	Finca El Milagro (Empresa Pardo Suizo)	-68.37223	10.16642	N10°E	650
SEV-12	06/09/2019	Sector Las Parchas	-68.40107	10.12297	N-S	596
SEV-13	12/09/2019	Cooperativa Dos Fronteras	-68.41501	10.13497	N75°E	602
SEV-14	12/09/2019	Finca de Andrés Olivo	-68.40752	10.15827	N12°E	603
SEV-15	13/09/2019	Cooperativa Dos Fronteras	-68.41087	10.12770	N17°E	616
SEV-16	13/09/2019	Hacienda Guayabal (Alto Viejo)	-68.42895	10.14558	N7°W	615

El proceso de adquisición de métodos eléctricos se resume en el esquema mostrado en la figura 5.20. Una explicación más detallada se encuentra en la sección de apéndices B.3.

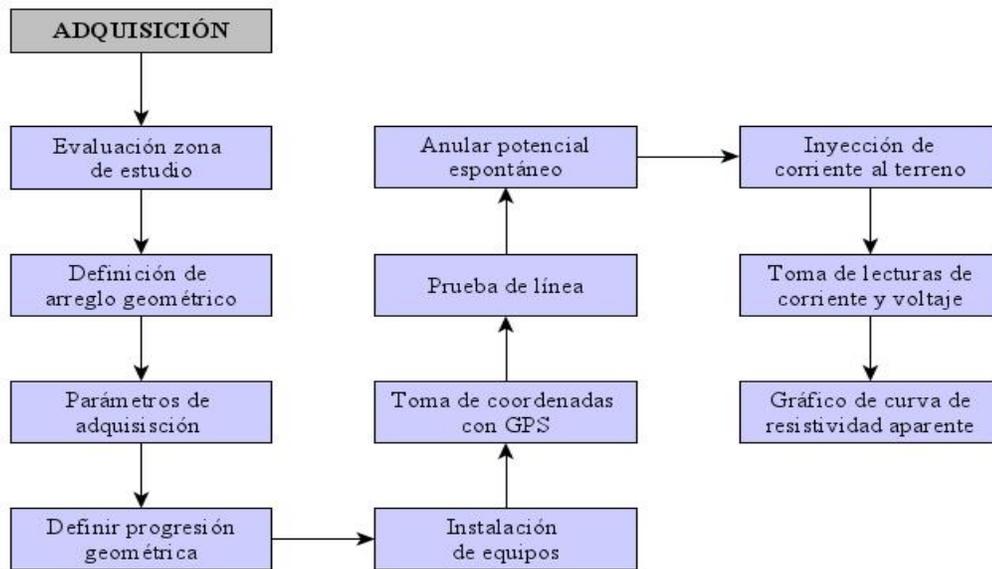


Figura 5.20 Metodología de adquisición de métodos eléctricos.

5.2.2 Métodos sísmicos

La adquisición de los datos de refracción sísmica fue llevada a cabo en un lapso de diecisiete (17) días, desde el 27/08/2019 hasta el 13/09/2019, para lo cual se utilizaron los equipos que se mencionan en la tabla B.3 de la sección de apéndices B.

Se obtuvo como producto un total de 17 perfiles sísmicos con longitudes variables, los cuales fueron distribuidos en las zonas aledañas a la población de Miranda, según las facilidades de acceso a las áreas que fueron identificadas con mayor potencial acuífero. En la figura 5.21 se observa la ubicación del punto medio de todos los perfiles sísmicos.

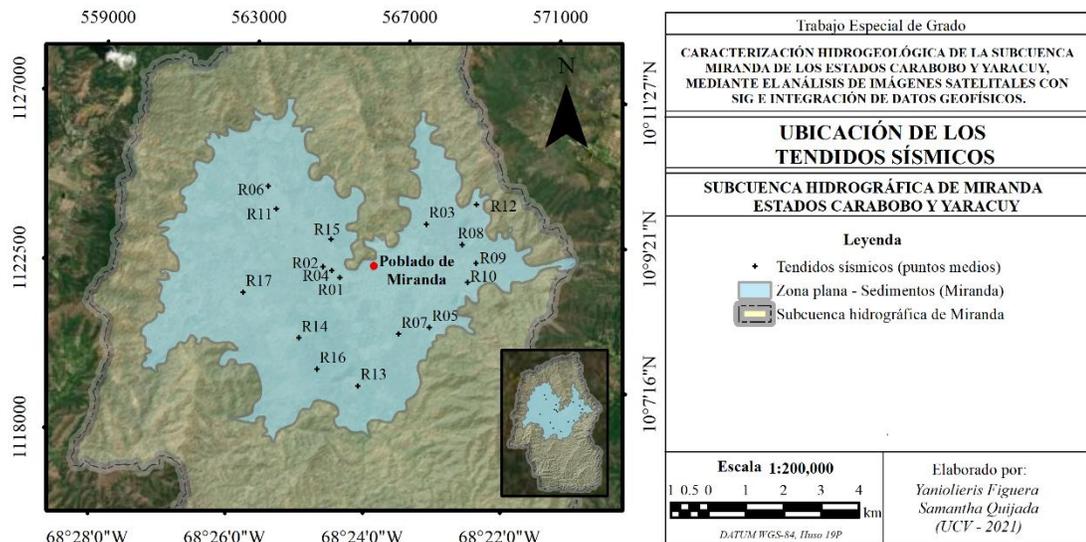


Figura 5.21 Ubicación de los puntos medios de los tendidos sísmicos (tomado de Google Earth, 2020)

A continuación, en la tabla 5.10 se presentan los datos de identificación, ubicación, rumbo y coordenadas de la totalidad de los perfiles sísmicos realizados, los cuales tuvieron una longitud de 200 m y cuyos parámetros generales de adquisición fueron: duración del registro 1024 ms, intervalo de muestreo 0.5 ms y cantidad de muestras por trazas 2048.

Tabla 5.10 Identificación, rumbo y coordenadas de los tendidos sísmicos.

Sondeo	Fecha	Lugar	Rumb o	Extremo A			Extremo B		
				Latitud (°)	Longitud (°)	cota (m)	Latitud (°)	Longitud (°)	Cota (m)
R01	27/08/2019	Hacienda Monterrey	N39°E	10.15127	-68.40998	603	10.15266	-68.40884	606
R02	27/08/2019	Hacienda Monterrey	N42°E	10.15042	-68.40788	605	10.15174	-68.40668	613
R03	28/08/2019	Agropecuaria San Miguel	N24°E	10.16135	-68.38476	626	10.16298	-68.38403	624
R04	29/08/2019	Urb. Diego Salazar	N45°E	10.14872	-68.40598	606	10.15001	-68.40471	609
R05	31/08/2019	Urb. San Roque	N53°W	10.13790	-68.38436	613	10.13680	-68.38290	619
R06	31/08/2019	Sábana de Arriba (La Podeca)	N4°E	10.17229	-68.42254	616	10.17050	-68.42265	616
R07	04/09/2019	Urb. San Roque	N26°E	10.13661	-68.39072	612	10.13494	-68.39155	609
R08	04/09/2019	Finca El Milagro (Empresa Pardo Suizo)	N20°E	10.15644	-68.37593	626	10.15797	-68.37537	629
R09	04/09/2019	Finca El Milagro (Empresa Pardo Suizo)	E-W	10.15273	-68.37319	626	10.15274	-68.37137	630
R10	05/09/2019	Agrícola Las Clavelinas	N58°E	10.14815	-68.37440	632	10.14765	-68.37521	627

Sondeo	Fecha	Lugar	Rumb o	Extremo A			Extremo B		
				Latitud (°)	Longitud (°)	cota (m)	Latitud (°)	Longitud (°)	Cota (m)
R11	05/09/2019	Urb. La Guaruga	N49°W	10.16535	-68.42004	614	10.16651	-68.42139	611
R12	06/09/2019	Finca El Milagro (Empresa Pardo Suizo)	N12°E	10.16590	-68.37235	648	10.16766	-68.37197	656
R13	06/09/2019	Sector Las Parchas	N1°E	10.12242	-68.40108	595	10.12421	-68.40105	593
R14	09/12/2019	Cooperativa dos fronteras	N75°E	10.13519	-68.41447	602	10.13473	-68.41624	602
R15	09/12/2019	Finca de Andrés Olivo	W-E	10.15773	68.40765	603	10.15948	-68.40730	605
R16	13/09/2010	Cooperativa dos fronteras	N20°E	10.12822	-68.41068	611	10.12653	-68.41129	605
R17	13/09/2010	Hacienda Guayabal (Alto Viejo)	N6°E	10.14505	-68.42876	614	10.14675	-68.42857	616

El proceso de adquisición de métodos sísmicos se resume en el esquema mostrado en la figura 5.22. La explicación con más detalle se ubica en la sección de apéndices B.4.

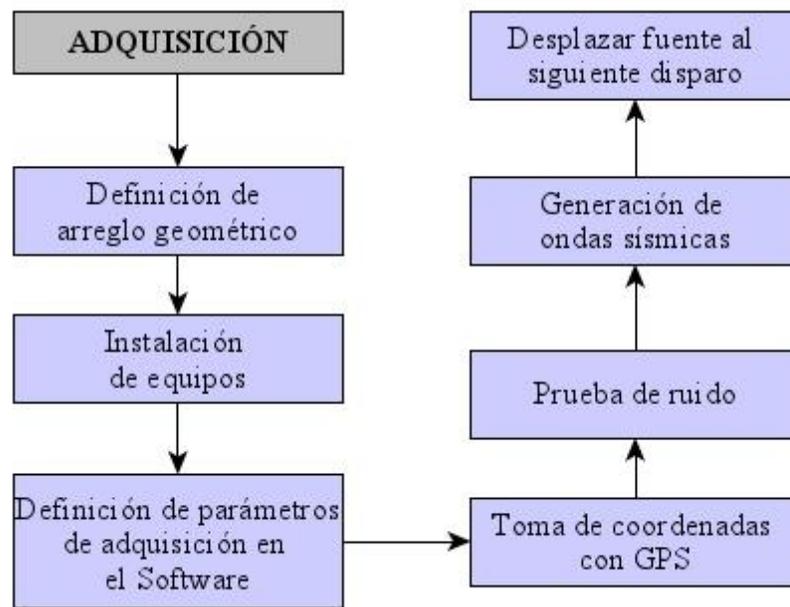


Figura 5.22 Metodología de adquisición de métodos sísmicos.

5.2.3 Métodos gravimétricos

La adquisición de los datos gravimétricos fue llevada a cabo en un lapso de doce (12) días, desde el 25/01/2020 hasta el 05/02/2020, para lo cual se necesitaron los equipos que se describen en la tabla B.4 de la sección de apéndices B.

Se obtuvo como producto un total de 501 estaciones gravimétricas ordinarias, las cuales se distribuyeron en las zonas aledañas a la población de Miranda y una estación base de tercer orden (figura B.5) ubicada en la Plaza Bolívar de la población de Montalbán (latitud $10^{\circ}21478'N$ y longitud $-68^{\circ}32899'W$). En la figura 5.23 se observa la ubicación de las estaciones gravimétricas ordinarias levantadas.

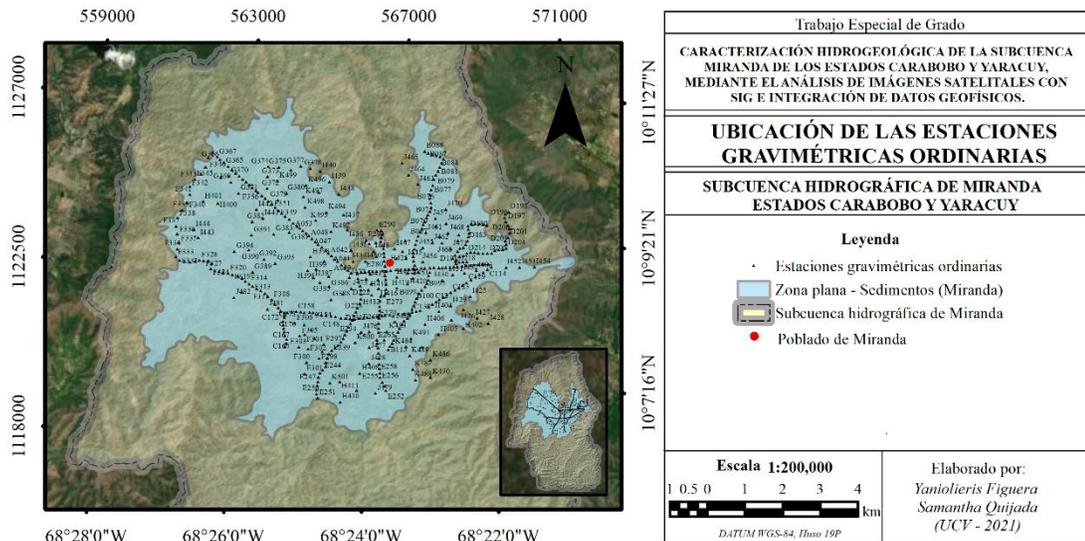


Figura 5.23 Ubicación de las estaciones gravimétricas ordinarias levantadas.

Adicionalmente, se utilizó el *BenchMark* o estación base de segundo orden (figura B.4) ubicado en San Blas, Municipio Valencia, Estado Carabobo (latitud $10^{\circ}0912421'N$, longitud $68^{\circ}02163424'W$), como punto de control para la calibración de los circuitos.

Este estudio se realizó con el fin de generar un modelo geoestructural de la subcuenca de Miranda, así como estimar el espesor de los sedimentos y la geometría y profundidad del basamento. La ubicación e identificación de las estaciones gravimétricas ordinarias y la base de Montalbán se especifica en la tabla E.1 en la sección de Apéndices E.

Antes de iniciar las mediciones, fue necesario calibrar el offset y la sensibilidad a la inclinación de los ejes del gravímetro, medidos en arcosegundos, con la finalidad de garantizar una buena calidad de los datos adquiridos.

Adicionalmente, durante los días 24/1/2020 y 25/1/2020 se realizó la medición de la deriva instrumental del gravímetro *Scintrex CG-5 Autograv* por un lapso de 24 horas. En la figura 5.24 se puede observar la gráfica obtenida a partir de los datos adquiridos y las variaciones de gravedad durante este tiempo.

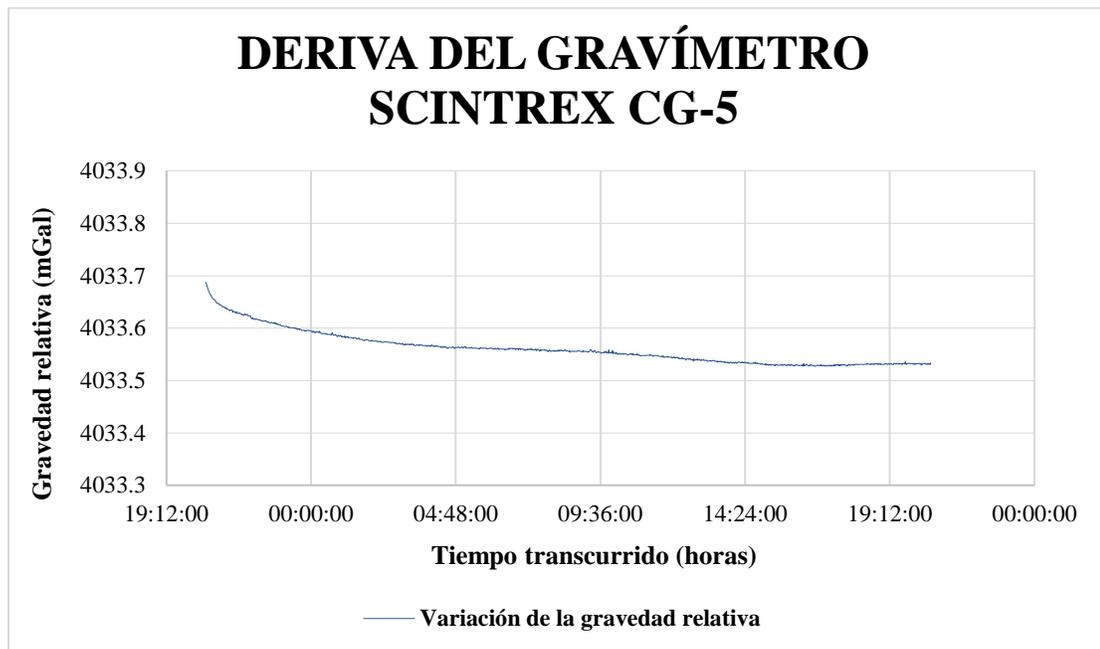


Figura 5.24 Deriva instrumental por 24 horas del gravímetro Scintrex CG-5 (entre los días 24-25/1/2020).

Para el levantamiento de la estación base de tercer orden (plaza Bolívar, Montalbán) se realizaron tres circuitos cerrados, con recorridos desde el pueblo de Montalbán hasta la población de San Blas, Estado Carabobo, en donde se encontraba el *benchmark* (estación base de primer orden) más cercano a la zona de estudio. En la figura 5.25 podemos observar el esquema del circuito realizado para el levantamiento de la estación base. También en la tabla E.1 de la sección de apéndices se pueden observar los datos adquiridos durante el levantamiento de la estación base.

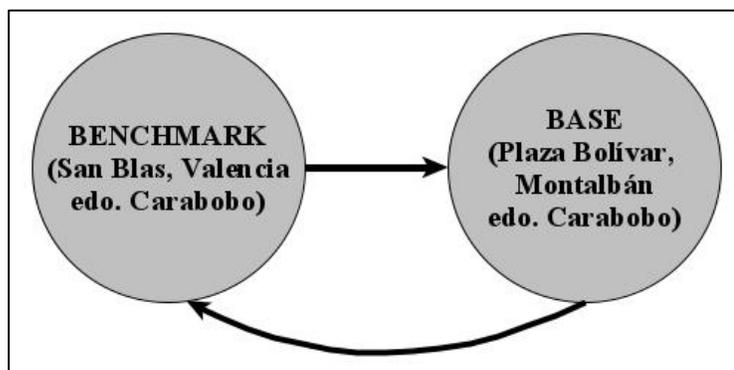


Figura 5.25 Esquema del circuito realizado para el levantamiento de la estación base.

En cuanto a los parámetros de adquisición para el levantamiento de las estaciones ordinarias se realizaron mediciones que consistieron de tres (3) lecturas por cada estación, las cuales se programaron para que se hicieran cada un minuto con un retardo de 3 s. La mayoría de las estaciones ubicadas sobre carreteras principales fueron levantadas con una separación aproximadamente constante de 100 m. Sin embargo, en aquellas zonas con difícil acceso, esa separación fue un poco mayor, procurando que la distribución fuese lo más uniforme posible, para tener una mayor cobertura de la zona y calidad de los datos. Las coordenadas y cotas de las estaciones fueron tomadas con un posicionador satelital (GPS) y referidas al datum geodésico WGS84.

El proceso de adquisición de métodos gravimétricos se resume en el esquema mostrado en la figura 5.26. En la sección B.5 de apéndices se encuentra el procedimiento de adquisición detalladamente.

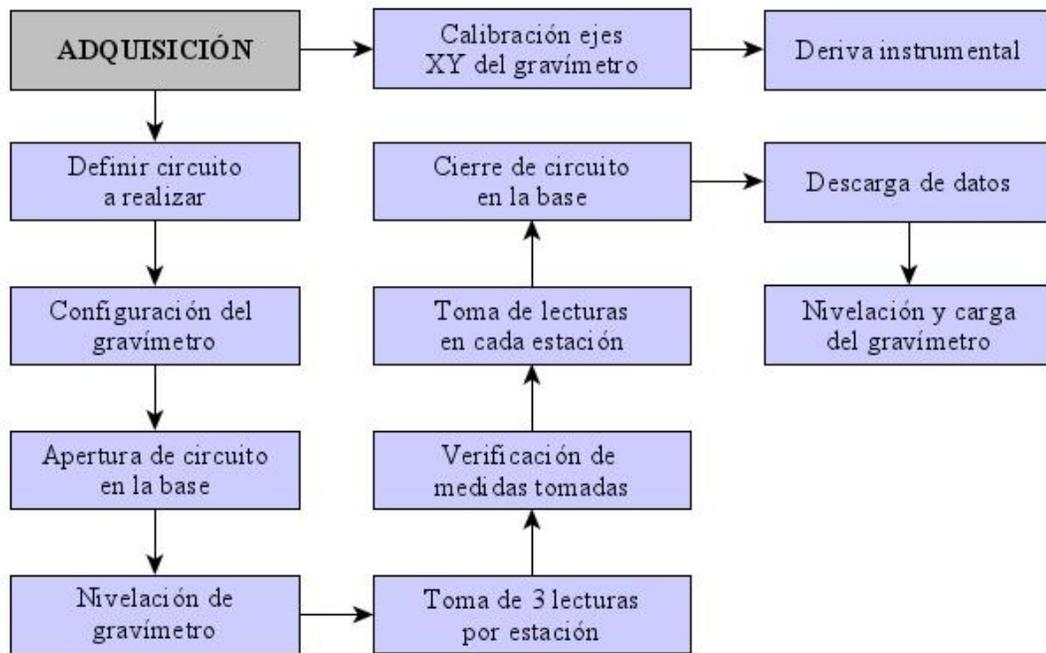


Figura 5.26 Metodología de adquisición de los métodos gravimétricos.

5.3 Estadística de los datos geofísicos

Antes de realizar el procesamiento de los datos geofísicos se efectuó un análisis estadístico descriptivo de todos los datos geofísicos, con el fin de verificar la calidad y características de los mismos. Para ello, se utilizó el programa *OriginPro 2018*, versión b9.5.1.195 perteneciente a *OriginLab Corporation*, mediante el cual se obtuvieron los indicadores estadísticos descriptivos y gráficos más relevantes para el análisis de los datos. Se determinaron parámetros estadísticos tales como: media, desviación estándar, varianza, coeficiente de variación, máximo, mínimo, rango intercuartil, mediana, percentiles 25, 50 y 75 y gráficos como histogramas de frecuencia y diagramas de caja.

5.4 Metodología de procesamiento

Una vez realizada la prospección geofísica, aplicando tres métodos importantes como son, métodos eléctricos, sísmicos y gravimétricos, se pasó a la siguiente fase de trabajo, la cual consistió en determinar las resistividades, velocidades y densidades de las capas del subsuelo a partir de los datos geofísicos. Esto se realizó de la siguiente manera:

5.4.1 Métodos eléctricos

El procesamiento de métodos eléctricos se basó en el estudio de los datos geoelectrónicos obtenidos durante la prospección, los cuales fueron 16 sondeos eléctricos verticales tipo Wenner. Para el procesamiento de los datos obtenidos a través de los métodos eléctricos se siguió la metodología que se observa en la figura 5.27.

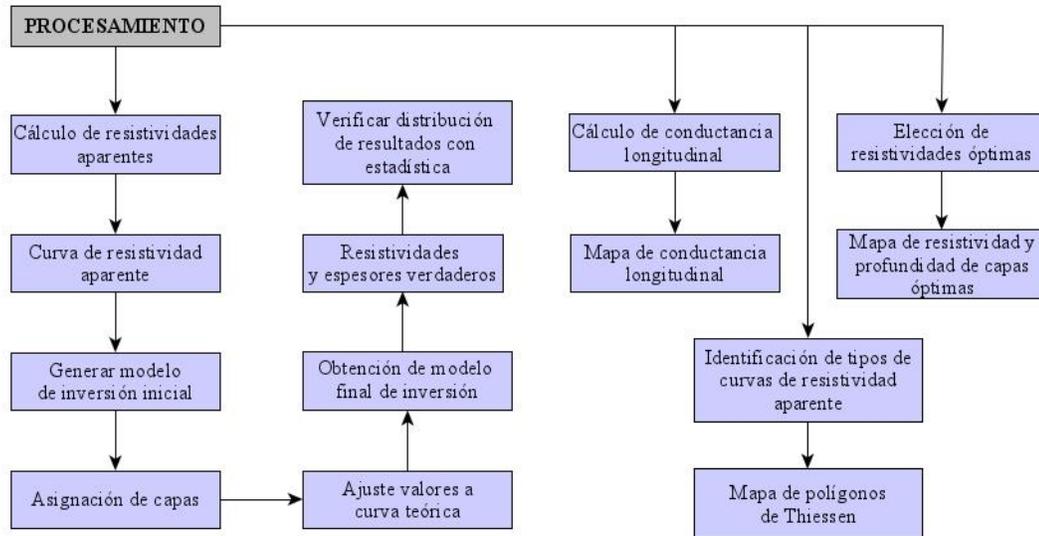


Figura 5.27 Metodología de procesamiento de los datos obtenidos por los métodos eléctricos.

A continuación, se describe el procesamiento aplicado a los datos obtenidos mediante la ejecución de los sondeos eléctricos verticales.

En primer lugar, para el procesamiento de los datos se utilizó el software *Microsoft Excel* con el fin de calcular la resistividad aparente del subsuelo a través de parámetros obtenidos en campo, como son el voltaje y la intensidad, mediante la ecuación 4.6 (marco teórico). Los valores de resistividad obtenidos fueron ordenados según las distancias establecidas en la progresión geométrica empleada, lo cual sirvió para elaborar los gráficos en escala logarítmica de las curvas de resistividades (apéndices C, desde la figura C.2 hasta la C.5). A partir de esta información, se procesaron los 16 sondeos eléctricos verticales empleando el software *IPI2WIN* versión 3.0.1 desarrollado por la *Moscow State University*, el cual permite obtener un modelo del

subsuelo que mejor se ajuste a los datos adquiridos a través de una inversión matemática. Para ello se empleó el siguiente procedimiento:

1. Se generó un modelo de inversión inicial donde, además, se ingresaron los datos topográficos correspondientes al sondeo eléctrico vertical.
2. Seguidamente se inició el ajuste del modelo de inversión generado, haciendo que la curva a modelar tuviera una buena aproximación a la curva teórica o curva de inversión, tratando así, de obtener el menor error posible.
3. Para realizar el mejor ajuste se agregaron nuevas capas al modelo, generando así una mejor aproximación entre la curva a modelar y la teórica.
4. Se generó el modelo de inversión final, donde también se generó una tabla con valores en la cual se representaron parámetros como la cantidad de capas, valores de resistividad calculados por inversión, espesores de inversión de cada capa, profundidad de las capas y altura de las capas con respecto al nivel del mar.
5. Se obtuvieron las resistividades verdaderas después de realizar los ajustes correspondientes.

Finalmente, se generó un total de 17 modelos de inversión de resistividades, a partir de los cuales se obtuvieron parámetros como la resistividad aparente, el espesor de las capas, la profundidad de las capas y la altura con respecto al nivel del mar de las mismas. Estos modelos se pueden observar en la sección de apéndices C, desde la figura C.6 hasta la figura C.9.

5.4.2 Métodos sísmicos

El procesamiento de los registros de refracción sísmica adquiridos en campo fue llevado a cabo mediante los softwares *Pickwin v 3.3.0.3* y *Plotrefa v 2.8.0.2* del paquete *Seisimager* patentado por *OYO Corporation*. Por medio de este programa se realizó la selección de primeras llegadas de ondas P y se generaron las dromocrónicas que permitieron elaborar un modelo con las velocidades y espesores de las primeras capas del subsuelo.

Para el procesamiento de los datos por refracción de ondas P se siguió la metodología de la figura 5.28:

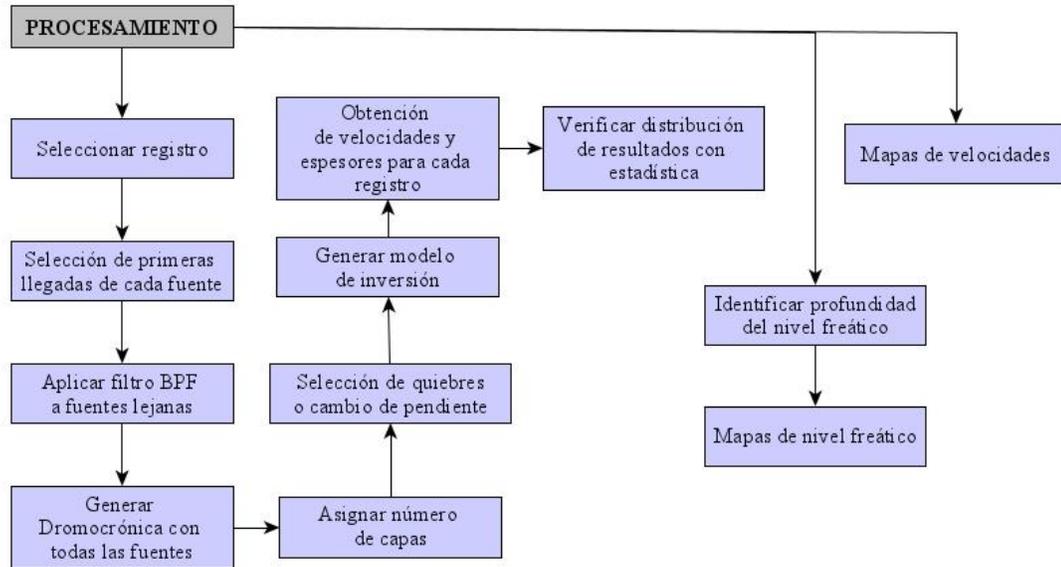


Figura 5.28 Metodología de procesamiento de datos por refracción de ondas P.

A continuación, se describe el procedimiento llevado a cabo para el procesamiento de los datos sísmicos de refracción adquiridos.

1. En primera instancia se cargaron los archivos DAT obtenidos en los registros de campo mediante el sismógrafo en el software Pickwin.
2. A los archivos correspondientes a los extremos de los tendidos sísmicos (0 m y 200 m) se les aplicó un filtro pasa banda, para atenuar el ruido presente en las trazas lejanas. Los parámetros se encuentran en la tabla 5.11

Tabla 5.11. Parámetros para aplicar el filtro pasa banda

Filtro pasa banda			
Frecuencia de corte bajo	1 Hz	Corte	20 db/oct
Frecuencia de corte alto	70 Hz	Corte	20 db/oct

3. Seguidamente, se aplicaron las herramientas necesarias para acondicionar las trazas y de esta manera poder realizar la selección de las primeras llegadas.

4. Se guardaron los archivos de la selección de las primeras llegadas para ser utilizados en el software *Plotrefa*.
5. Se generó la dromocrónica correspondiente a cada tendido sísmico.
6. Luego se asignó el número de capas del modelo.
7. Posteriormente, se realizó la selección de los quiebres de pendientes.
8. Se generó el modelo de velocidades.

En total se generaron 17 modelos de inversión de ondas P, los cuales se muestran en la sección de apéndices D, desde la figura D.1 hasta la D.17, a partir de los cuales se estimaron los valores de velocidad y el espesor de las capas para cada uno de los tendidos sísmicos realizados.

5.4.3 Mapas elaborados a partir del procesamiento de datos sísmicos y eléctricos

Los mapas que se describen en esta sección corresponden a los procesados a partir de los datos de sondeos eléctricos verticales y refracciones sísmicas. Debido a que, por limitaciones de tiempo y accesibilidad, no fue posible realizar un número suficientemente significativo y con buena distribución de sondeos eléctricos verticales y refracciones sísmicas, los mapas generados mediante ambos estudios no presentan una cobertura detallada de la zona de estudio, razón por la cual los mapas que de ellos se derivan solo representan una tendencia general de los diferentes parámetros estudiados.

Por otra parte, los resultados sísmicos y eléctricos solo se pueden correlacionar en condiciones ideales del subsuelo, para que pueda observarse un cambio en ambas propiedades a la misma profundidad. Debido a que esta relación no siempre existe, las capas geológicas, sísmicas y litológicas descritas, no necesariamente concuerdan entre sí en todos los puntos de medición.

Otro aspecto que influye en los resultados obtenidos es la resolución vertical. El método de refracción sísmica posee mayor resolución vertical a poca profundidad en comparación al método eléctrico. Sin embargo, el método de refracción sísmica no permite la detección de capas con inversión de velocidad, lo cual implica que, para una

misma profundidad, el método de refracción podría detectar 2 capas, mientras que el sondeo eléctrico podría detectar 3 capas. No obstante, la resolución de los SEV decae rápidamente con la profundidad, por lo que la fiabilidad del resultado va disminuyendo a medida que se aumenta la profundidad de prospección.

En este mismo orden de ideas, se reitera que, no necesariamente debe existir coincidencia en los topes o interfaces de las capas consideradas como potencialmente “acuíferas” entre ambos métodos. Estas interfaces son el resultado del contraste de valores (tanto de resistividad como de velocidad) en cada uno de estos métodos, los cuales son independientes entre sí. La realización de ambos métodos en un mismo lugar se hizo con la finalidad de poder correlacionar ambos datos e identificar de manera más precisa la posible respuesta obtenida.

Asimismo, la denominada “capa” utilizada en ambos métodos no se refiere específicamente a capas litológicas, sino más bien al cambio del valor de resistividad o velocidad (según sea el caso) que se observa a medida que se aumenta la profundidad. Por tal razón, la capa “*n*” observada en un punto por determinado método (sondeo eléctrico o sísmica de refracción), no necesariamente es equivalente a la capa “*n*” observada en otro punto por el mismo método. De igual manera, si una capa “*n*” es identificada en un punto por determinado método, la misma podría no ser identificada por el otro método como una sola capa, ya que las respuestas medidas por ambos métodos dependerá de los materiales presentes en cada capa.

Para confirmar el tipo de litología presente en el subsuelo es necesario contar con datos de pozos cercanos. Sin embargo, no es posible precisar si existe continuidad litológica en cada punto sondeado, en especial si los pozos se encuentran muy alejados entre sí, ya que en los medios sedimentarios fluviales se pueden presentar características estratigráficas complejas y poca continuidad horizontal de las capas.

5.4.3.1 Mapa de polígonos de Thiessen

A partir de las curvas de resistividad aparente obtenidas en campo, se determinó el tipo de curva correspondiente a cada sondeo realizado (tabla 5.12) con el fin de determinar

si se observaban patrones de semejanza entre diferentes sondeos y de esta manera poder realizar una mejor interpretación de los datos.

Tabla 5.12 Curvas de resistividad para cada SEV.

SONDEO	TIPO DE CURVA	SONDEO	TIPO DE CURVA
SEV-01	QH	SEV-09	KHA
SEV-02	KQH	SEV-10	HKHK
SEV-03	QH	SEV-11	KHK
SEV-04	HKH	SEV-12	KHK
SEV-05	KHA	SEV-13	HKH
SEV-06	KH	SEV-14	H
SEV-07	AKH	SEV-15	Q
SEV-08	KH	SEV-16	KH

Para ello, se generaron polígonos de Thiessen, los cuales permiten establecer las zonas de influencia y relaciones geoespaciales entre los datos que son objeto del estudio. El mapa de polígonos de Thiessen se generó utilizando el software *Arcmap, versión 10.5*. Primeramente, se generó una capa vectorial que contenía la ubicación de cada SEV y su tipo de curva respectivamente, posteriormente se usó la herramienta *Crear - Polígono de Thiessen* para la obtención de los respectivos polígonos.

5.4.3.2 Selección de capas óptimas para la prospección de aguas subterráneas

Se conceptualiza una capa óptima a aquellas que podrían considerarse como capas con posible presencia de acuíferos saturados. Para seleccionarlas, se establecieron los siguientes criterios:

- Se consideraron como capas óptimas para la prospección de aguas subterráneas a aquellas con resistividades que se encuentren en el rango de 50-500 Ω .m, ya que son los valores esperados para arenas y gravas saturadas, las cuales son las mejores litologías para acuíferos.
- Se consideraron capas óptimas a aquellas donde la velocidad de onda V_p fuesen mayores a 1450 m/s y menores a 2000 m/s, ya que este rango de velocidad es el esperado para capas saturadas con agua. Las interfaces sísmicas que se encontraron dentro de este rango fueron asociadas a la presencia del nivel freático.

- Para identificar las zonas con mayor potencial acuífero, según el estudio geoelectrico realizado, se seleccionaron las capas donde se encontraban las resistividades dentro de los rangos óptimos mencionados anteriormente, así como también aquellas que poseían los mayores espesores.
- Las profundidades seleccionadas para las resistividades óptimas dependieron de la profundidad a la que se encontraba el tope de la capa sísmica con las velocidades mencionadas anteriormente. Es decir, sólo se tomaron en cuenta las capas resistivas cuya profundidad fueran igual o mayor a la profundidad del tope del nivel freático. Se deduce que la capas que se encuentran por encima de este nivel no están saturadas.
- Se tomó en consideración un espesor mínimo de una capa impermeable confinante mayor a 6 metros, ya que así se garantiza la protección del acuífero de contaminantes potenciales (Thomas y Lowe, 2007).
- La clasificación hidrogeológica utilizada para identificar las capas en el subsuelo fue: acuíferos, acuitardos, acuicludos y acuífugos, cumpliendo con los parámetros presentes en la tabla 4.1 (clasificación hidrogeológica de acuíferos).
- Se tomó en cuenta la información litológica suministrada por aquellos pozos más cercanos al punto de realización de cada sondeo para precisar un mejor el resultado obtenido con los sondeos.

Una vez establecido los puntos expuestos anteriormente, se generaron tablas haciendo uso del software *Microsoft Excel* las cuales contienen información de resistividad, espesor y profundidad de cada capa obtenida para cada sondeo eléctrico. También se dispuso la información de velocidad, espesor y profundidad para cada capa calculadas a partir de la refracción. Por último, se seleccionaron los pozos cercanos para incluir información litológica. Toda esta información se dispuso en tablas para cada sondeo realizado, con el fin de identificar las capas óptimas para la identificación de acuíferos y la elaboración de los mapas respectivos para su interpretación.

5.4.3.3 Mapas de resistividad y profundidad de las capas óptimas para prospección de agua subterráneas

Los mapas de resistividad y profundidad de las capas óptimas se realizaron a partir de la información obtenida por los modelos de inversión de resistividades y la selección de capas óptimas (tabla 5.13). Para ello, cada mapa de resistividad y de profundidad óptima fue generado mediante el Software *Surfer versión 18.1.186* por medio de la interpolación por mínima curvatura y posteriormente se exportaron al software *Arcmap, versión 10.5*, en donde se identificó con el formato utilizado para presentar los resultados del trabajo.

Tabla 5.13 Resistividades y profundidades óptimas.

Sondeo	Coordenadas		Capa óptima	
	Este (m)	Norte (m)	Resistividad (Ω .m)	Profundidad (m)
SEV-01	564658.5157	1122237.117	97.8	28.1
SEV-02	567417.0487	1123365.634	56.7	24.5
SEV-03	565112.5817	1121948.249	534	50.1
SEV-04	567476.8956	1120687.719	172	44
SEV-05	563250.1135	1124470.318	102	62.8
SEV-06	566721.2743	1120521.547	103	52.8
SEV-07	568378.8184	1122824.565	56.7	14.4
SEV-08	568733.551	1122364.166	59	31.9
SEV-09	568567.9736	1121876.228	81.4	10
SEV-10	563485.7552	1123787.413	61.1	40.3
SEV-12	565616.3369	1119068.812	68.9	56.2
SEV-13	564086.6939	1120392.877	302.4	17.4
SEV-15	564541.7072	1119589.851	113	49.6

5.4.3.4 Mapa de conductancia longitudinal unitaria (S)

Con el fin de identificar las zonas más favorables para la explotación de recursos hídricos subterráneos, se realizó el mapa de conductancia longitudinal (S). Las conductancias más altas podrían indicar presencia de algunos contaminantes o electrolitos disueltos en las aguas. Valores de S superiores a 0.5 siemens pueden indicar zonas en las que el sistema acuífero está más protegido contra agentes contaminantes que se filtran desde la superficie, mientras que valores de S inferiores a 0.5 siemens indican zonas con mayor riesgo a que las aguas subterráneas se vean afectadas por la contaminación, ya sea puntual o difusa (Sendrós, 2012).

Para la elaboración de estos mapas, primeramente, se calcularon los parámetros de Dar Zarrow para cada capa, haciendo uso de la fórmula dispuesta en la sección 4.39. Una vez obtenido los valores para cada sondeo, se seleccionaron solo aquellos valores que estuviesen en un rango de resistividades entre 50-500 Ω .m, ya que es el valor esperado que indica la presencia de acuíferos. Con el fin de determinar el grado de protección que tienen los posibles acuíferos, se seleccionó las capas óptimas y se sumaron los parámetros *S* para obtener un solo valor por sondeo y se elaboró una tabla, con la identificación de cada SEV, las coordenadas y los parámetros de Dar Zarrow. Esta tabla se puede observar en la sección de apéndices C (tabla C.3). Para generar el mapa, se hizo uso del software *Surfer, versión 18.1.186*, mediante la interpolación por mínima curvatura y posteriormente se exportó al software *Arcmap, versión 10.5*, en donde se identificó con el formato utilizado para presentar los resultados del trabajo.

5.4.3.5 Mapas de velocidad de la onda P en cada capa

Con el fin de determinar las posibles zonas acuíferas mediante el estudio de las variaciones de velocidad sísmica, se realizaron 4 mapas de velocidades por capa. Para ello, se generaron los mapas mediante el software *Surfer, versión 18.1.186*, los cuales se obtuvieron mediante la interpolación por mínima curvatura y finalmente se exportaron al software *Arcmap, versión 10.5* para identificarlos con el formato utilizado para presentar los resultados del trabajo.

5.4.3.6 Mapa de nivel freático

Se generó un mapa de la profundidad del nivel freático haciendo uso del software *Surfer, versión 18.1.186*. Para ello, se seleccionaron las profundidades del tope de la capa que tuviese velocidades superiores a 1450 m/s y menores a 2000 m/s para cada refracción sísmica (tabla 5.14) y se generó el mapa en el Software Surfer haciendo uso de la interpolación por mínima curvatura, luego este mapa fue identificado con el debido formato para presentar los resultados del trabajo, usando el software *Arcmap, versión 10.5*.

Tabla 5.14 Profundidad del nivel freático.

Sondeo	Coordenadas		Profundidad nivel freático (m)
	Este (m)	Norte (m)	
R-01	564658.5157	1122237.117	3.6
R-03	567417.0487	1123365.634	11.0
R-04	565112.5817	1121948.249	18.0
R-05	567476.8956	1120687.719	12.7
R-06	563250.1135	1124470.318	19.0
R-07	566721.2743	1120521.547	20.0
R-08	568378.8184	1122824.565	2,4
R-09	568733.551	1122364.166	9.8
R-10	568567.9736	1121876.228	9.8
R-11	563485.7552	1123787.413	10.0
R-12	568766.7748	1123879.057	12.0
R-13	565616.3369	1119068.812	12.0
R-14	564086.6939	1120392.877	11.0
R-15	564902.5707	1122970.643	2.4
R-16	564541.7072	1119589.851	10.0
R-17	562557.4351	1121563.309	10.0

5.4.4 Cortes geoelectrónicos y columnas estratigráficas

Se elaboraron columnas estratigráficas y cortes geoelectrónicos, a partir de la litología presente en los datos de pozo y sondeos eléctricos, respectivamente, con la finalidad de correlacionarlas entre sí. Para ello, se representó el nivel freático, los espesores y las resistividades de las capas caracterizadas hidrogeológicamente en cada sondeo, mediante el uso del software Strater, versión 5.0.710.

5.4.5 Métodos gravimétricos

Se realizó el procesamiento de las 501 estaciones gravimétricas ordinarias adquiridas en campo, a partir de la estación base de tercer orden ubicada en la Plaza de Montalbán, estado Carabobo, cuyo valor de referencia absoluto fue 978026.235 mGal (figura B.5). La metodología de procesamiento se dividió en tres fases principales, las cuales se puede observar en la figura 5.29.

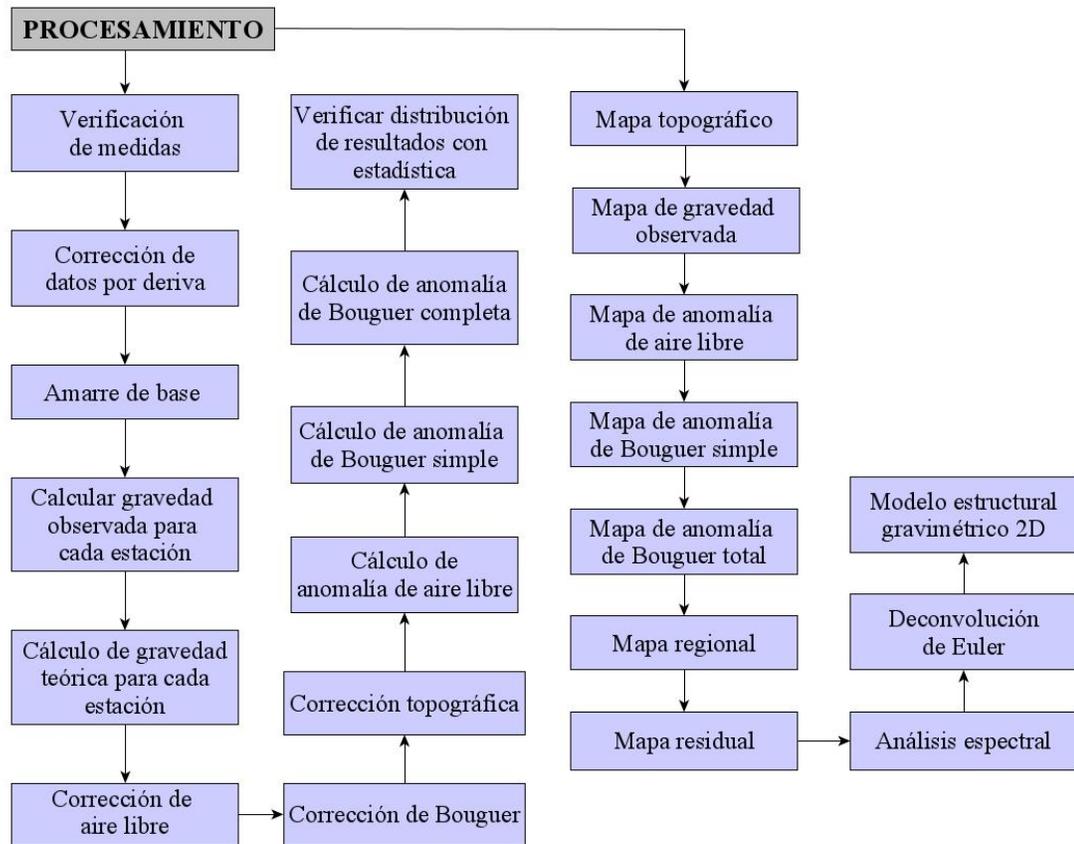


Figura 5.29 Metodología de procesamiento de los datos gravimétricos.

5.4.5.1 Cálculo de la gravedad observada

La primera fase de procesamiento de los datos gravimétricos incluyó la verificación de las medidas adquiridas y el amarre de todos los circuitos de estaciones ordinarias con respecto a la base de tercer orden. Esta fase se desarrolló mediante el uso de gráficas y hojas de cálculo mediante el software *Microsoft Excel*, siendo posible la obtención de las gravedades observadas (relativas) ya corregidas por marea y deriva.

5.4.5.2 Correcciones de aire libre y de Bouguer

Se realizaron los cálculos de la corrección de Aire Libre (ecuación 4.20) y Bouguer Total (ecuación 4.21), mencionadas en la sección 4.51 del marco teórico. Adicionalmente, para la corrección de Bouguer se utilizó la densidad promedio de las rocas predominantes que se encuentran por encima del nivel de referencia, ya que se busca compensar lo que se está omitiendo con esta corrección, con lo cual la roca

predominante corresponde a una capa de aluviones o sedimentos (arcilla, grava, arena, arenisca, etc.) cuya densidad promedio, según Telford *et al.* (1990), es 2.3 g/cm³.

A continuación, en la tabla 5.15 se muestran las densidades de los sedimentos predominantes en la zona de estudio y con los cuales se obtuvo el promedio de la densidad usada.

Tabla 5.15 Densidades para los sedimentos predominantes en la zona de estudio (tomado de Telford *et al.*, 1990).

Sedimentos	Densidad (g/cm ³)
Arcilla	2.21
Grava	2.00
Arena	2.00
Arenisca	2.35
Pizarra	2.40
Caliza	2.55

Antes de efectuar los cálculos de las anomalías gravimétricas, fue necesario establecer un nivel de referencia de cota fija diferente al geoide para todas las estaciones, con la finalidad de garantizar que las respuestas gravimétricas generadas por la geometría de la subcuenca estuviesen representadas en los mapas de anomalías. Para ello, se tomó como nivel de referencia una cota de 640 m, la cual representa una cota intermedia entre las obtenidas para cada estación gravimétrica ordinaria adquirida. Este fue elegido tomando en cuenta que la corrección de Bouguer elimina la porción de masa que se encuentre por encima del nivel de referencia y debido a que se desea modelar la geometría de la subcuenca y las estructuras presentes en el subsuelo, el nivel de referencia elegido debe permitir visualizar información de la estructura y composición de la cuenca.

5.4.5.3 Corrección topográfica

Para realizar la corrección topográfica se utilizó el MDE, del satélite *ALOS PALSAR* de la zona de estudio, mediante el software *Oasis Montaj*® versión 6.4.2, con el fin de obtener los datos de topografía local. Los datos topográficos regionales, fueron obtenidos a partir del Modelo Digital de Elevación de ETOPO1 disponible desde la página: icgem.gfz-potsdam.de para una ventana de 1° mayor a la de la zona de estudio.

5.4.5.4 Cálculo de las anomalías gravimétricas

Una vez aplicadas todas las correcciones gravimétricas, se calcularon las anomalías de Aire Libre y de Bouguer simple (ecuaciones 4.22 y 4.23, respectivamente) para cada estación. Posteriormente, se calculó la anomalía de Bouguer total mediante la ecuación 4.24. Por último, se generó una base de datos en versión .txt con las coordenadas, gravedad observada y las anomalías correspondientes a cada estación (tabla E.1 del apartado apéndices E).

5.4.5.5 Elaboración de mapas gravimétricos

En esta fase se cargó la base de datos en el software *Oasis Montaj*, se generaron coordenadas UTM a partir de coordenadas geográficas y luego se generaron los *grids* correspondientes a los mapas de topografía, gravedad observada, anomalía de aire libre, anomalía de Bouguer simple y anomalía de Bouguer completa. Para ello, se utilizó la interpolación por mínima curvatura. Según Mederos (2009), esta interpolación genera una superficie mediante el promedio de la distancia inversa de los datos existentes que se encuentran en un radio específico.

5.4.5.6 Separación regional-residual

La separación regional y residual de la anomalía de Bouguer se obtuvo a través del filtro de la Continuación Analítica Hacia Arriba (CAHA), con el fin de obtener una respuesta suavizada del mapa de Bouguer.

Para obtener el mapa regional a través de este filtro (*Upward Continuation Filter*) se utilizó el programa *Oasis Montaj* (Geosoft Inc, 2007), a través del comando *MAGMAP* y la extensión *Interactive Filtering*. Además, fue necesario utilizar el *grid* de la anomalía de Bouguer y el espectro de frecuencia. La Continuación Analítica Hacia Arriba se generó a distintas alturas (300, 400, 500, 600, 700, 800 y 890 m) para determinar el mapa que mejor representara a la respuesta regional de la zona de estudio. De todas las alturas anteriormente citadas, la de 800 m fue la que mejor mostró una tendencia regional más significativa con respecto a las demás.

Finalmente, se obtuvo el mapa de anomalía residual por medio de la sustracción de los efectos regionales para una altura de 800 m, a partir de la anomalía de Bouguer Completa.

5.4.5.7 Determinación de profundidades

- Espectro de frecuencia

Con el fin de estimar la profundidad a la que se encuentran las principales estructuras presentes en la zona de estudio, se calculó el espectro de potencia utilizando la extensión *MAGMAP > Spectrum calculation and display* del programa Oasis Montaj. Luego se importó al software *Microsoft Excel*, en donde se clasificaron las respuestas obtenidas para las profundidades somera, media y profunda, mediante la determinación de las distintas pendientes de la curva generada en el espectro de potencia radial y usando la ecuación 4.26 del marco teórico.

- Deconvolución de Euler

Para realizar la deconvolución de Euler se utilizó el programa *Oasis Montaj* (Geosoft, Inc., 2007), a través de la extensión *EULER3D* y la opción *Standard Euler Deconvolution*.

Para ello se utilizó el mapa residual junto con las derivadas X, Y y Z calculadas previamente. También se tomaron en cuenta tres parámetros principales: 1) el índice estructural, el cual permite definir la forma del cuerpo al que se le desea conocer la profundidad (en la tabla 5.16 se observa los índices estructurales en función del campo gravimétrico y los cuerpos geológicos), 2) el máximo porcentaje de tolerancia permitido, que limita la cantidad de datos que se van a mostrar en los resultados y 3) el tamaño de la ventana, el cual se relaciona con el tamaño del área de la zona de estudio. Se realizó alrededor de 18 pruebas, las cuales se detallan en la sección E.3 de los apéndices. Los parámetros utilizados se muestran en la tabla 5.17.

Tabla 5.16 Índices estructurales del campo gravimétrico y cuerpos geológicos (Modificado de Geosoft Inc, 2007)

Índice estructural	Campo gravimétrico
0.0	Sill/ diques/ saltos
0.5	Laminaciones mineralizadas
1.0	Cilindros
2.0	Esferas

Tabla 5.17 Parámetros seleccionados para la aplicación de la deconvolución de Euler

Índice estructural	% de tolerancia permitido	Tamaño de la ventana
1.0	20	8

Finalmente, una vez realizado este proceso, se obtuvo una base de datos con las soluciones de Euler, las cuales fueron mostradas en el mapa residual a través de la opción *Plot Solution Symbols*.

5.4.5.8 Modelo gravimétrico 2D

Para la elaboración de los modelos gravimétricos en 2D se utilizó el programa *Oasis Montaj* (Geosoft, Inc., 2007), a través de la extensión *GMSYS*, la cual permite modelar la distribución y geometría bidimensional de las estructuras geológicas en profundidad, de tal manera que su respuesta gravimétrica teórica se ajuste a la respuesta gravimétrica obtenida a partir de las mediciones en la zona de estudio (Mederos, 2009).

Con la finalidad de determinar las respuestas gravimétricas generadas por la extensión, profundidad y geometría de la subcuenca, se decidió realizar el modelado gravimétrico sobre las anomalías residuales, las cuales son relativamente pequeñas en comparación a las respuestas gravimétricas generadas por las estructuras regionales. Éstas son causadas por los efectos de las estructuras locales y se evidencian por la presencia de anomalías gravimétricas de altas frecuencias presentes en la zona de estudio. Para ello, se trazaron dos perfiles gravimétricos identificados como A-A' y B-B'.

El perfil A-A' se trazó con dirección N50°W con la finalidad de atravesar las principales estructuras locales, así como el mínimo más significativo que se observa en el mapa, el cual se estima esté asociado al principal depocentro de la subcuenca. Por otro lado, el perfil B-B' se trazó perpendicular al perfil A-A', pasando por los máximos y mínimos gravimétricos representativos, con la finalidad de obtener mayor cobertura de la subcuenca y, de esta manera, poder apreciar el contacto entre las formaciones.

Posteriormente, se realizó el modelado geológico, para lo cual, se utilizaron los datos de espesores y densidades de las formaciones presentes en la zona de estudio, estos se especifican en la tabla 5.18.

Tabla 5.18 Parámetros utilizados para el modelado gravimétricos de los perfiles A-A' y B-B' (tomado y modificado de Mederos, 2009)

Unidad	Espesor (m)	Densidad (g/cm ³)
Aluviones	0-100	2.3
Esquistos Las Mercedes	3000	2.67
Complejo Nirgua	4000	2.7
Complejo San Julián	2000	2.72
Corteza Superior		2.78
Corteza Inferior		2.79
Manto		3.2

Finalmente, se generaron los modelos geoestructurales 2D, donde se ajustó la geometría del basamento y de los aluviones presentes en la subcuenca, de acuerdo a los datos geológicos disponibles y al ajuste del mínimo error entre los valores de gravedad observados y calculados en cada modelo.

5.4.6 Modelado 3D de la topografía con integración de datos de pozo y nivel freático

Este modelo 3D se realizó para visualizar tridimensionalmente la ubicación del nivel freático en el subsuelo y a su vez, ver su profundidad con respecto a los espesores de grava y arena de los datos de pozos, identificando las posibles capas prospectivas de aguas subterráneas que tuviesen las condiciones idóneas para ser consideradas como un acuífero productor.

Inicialmente con el software *Microsoft Excel* se generaron las siguientes bases de datos:

- Datos topográficos: para poder generar esta base de datos se exportó por medio del software *Arcmap 10.5* los datos de elevación del MDE descargado del satélite ALOS PALSAR. Para efectos de una mejor visualización, solo se tomó en cuenta la topografía que englobaba a la zona aluvional.
- Profundidad del nivel freático: se generó por medio de los resultados obtenidos con las refracciones sísmicas (apartado 5.4.3.6).

- Datos de pozo: para generar esta base de datos se utilizó los datos litológicos suministrados por los pozos (apéndices figura B.1), donde se tomó en cuenta solamente los espesores de gravas y arenas, debido a que se consideran las litologías óptimas para almacenar y extraer agua.

Una vez generadas todas las bases de datos, se realizó el modelado 3D donde se utilizó el Software *Surfer versión 18.1.186*. Para efectos de una mejor visualización, se realizó una proyección hacia abajo del modelado 3D de la superficie topográfica, con el fin de identificar mejor la ubicación de los datos mostrados. Es importante destacar que esta proyección no representa la profundidad total de los sedimentos ni la geometría de la subcuenca en el subsuelo, solamente es una herramienta para poder orientar de una manera más sencilla la interpretación.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS Y RESULTADOS

6.1 Morfometría e hipsometría de la cuenca

En aspectos generales, la subcuenca hidrográfica de Miranda abarca un área total de 187.2 km², con un perímetro de 68.7 km, presenta una elevación máxima de 1540 m.s.n.m. hacia el extremo norte y una cota mínima de 560 m hacia la parte sur, la altura promedio que ocupa gran parte del área de la subcuenca es de 727 m.s.n.m. Esta distribución de elevación a lo largo de la zona ocasiona que los ríos fluyan con una orientación preferencial norte-sur, en un terreno con una pendiente promedio de 4.8%, siendo ésta una cuenca con pendiente suave (Heras, 1972).

Los valores de los parámetros morfométricos que se obtuvieron a partir del MDE del terreno, mediante la aplicación de las herramientas de análisis espacial que dispone el software *ArcGIS 10.5*, fueron los siguientes: área, perímetro, longitud máxima de la cuenca, ancho de la cuenca, longitud del cauce principal y longitud total de drenajes, desnivel altitudinal, altura máxima, mínima y media. Para los parámetros restantes se siguió el procedimiento descrito por los autores Gaspari *et al.* (2012). Los resultados calculados para la subcuenca de Miranda se resumen en la tabla 6.1.

Tabla 6.1 Parámetros morfométricos de la subcuenca de Miranda.

Parámetro	Símbolo	Valor
Perímetro (km)	<i>P</i>	68.7
Área (km ²)	<i>A</i>	187.2
Longitud máxima (km)	<i>L_{max}</i>	20.5
Longitud cauce principal (km)	<i>L_{cp}</i>	15.5
Ancho de la cuenca (km)	<i>Ac</i>	9.1
Altura máxima (m.s.n.m.)	<i>H_{max}</i>	1540
Altura mínima (m.s.n.m.)	<i>H_{min}</i>	560
Altura media (m.s.n.m.)	<i>H_m</i>	727
Desnivel altitudinal (m)	<i>DA</i>	980
Factor forma de Horton	<i>IF</i>	0.44
Coefficiente de compacidad	<i>K_c</i>	1.41
Coefficiente de circularidad	<i>C_c</i>	0.5
Relación de elongación	<i>Re</i>	0.75
Pendiente promedio (%)	<i>P_m</i>	4.8
Longitud total de drenajes (km)	<i>L_n</i>	361.3
Densidad de drenajes (km/km ²)	<i>D_d</i>	1.93
Número de cauces de orden 1	<i>N_c</i>	206
Coefficiente de torrencialidad	<i>C_t</i>	1.1
Pendiente del cauce (%)	<i>Sc</i>	0.43

Analizando con detalle los parámetros morfométricos, se puede inferir que la subcuenca posee una geometría semi alargada ($IF=0.44$), con una superficie plana y porciones accidentadas ($Re=0.75$), siendo propensa a una sufrir inundaciones por precipitaciones de magnitud moderada. A su vez, posee una forma oval-redonda ($Kc=1.41$), ocasionando una tendencia acentuada para concentrar volúmenes de aguas de escurrimiento, ya que esta posee una pendiente suave ($Pm=4.8\%$ y $Sc=0.43\%$), limitando así la descarga de aguas superficiales con rapidez ante posibles eventos de precipitaciones intensas, debido a que su densidad de drenaje es baja a moderada ($Dd=1.93$ km/km²). En tal sentido, la caracterización morfométrica permitió identificar la influencia que tiene el relieve y morfología sobre la velocidad de respuesta de la subcuenca ante un evento de precipitación.

Para un estudio más completo, se obtuvo la curva hipsométrica de la subcuenca para poder definir el grado de evolución que posee la misma. Para ello, se estableció una tabla con 20 intervalos de altura asociadas con el área que estos valores ocupan, respectivamente, dentro del perímetro en la cuenca. Los datos utilizados para generar la curva hipsométrica se muestran en la tabla 6.2.

La curva hipsométrica (figura 6.1) muestra que el 25% posee una forma cóncava hacia arriba y el 75% restante es una curva ligeramente horizontal decreciente. Esto significa que la subcuenca es sedimentaria y se encuentra en su fase de vejez, indicando que ya superó la mayor parte de su aporte erosivo.

Tabla 6.2 Datos para generar la curva hipsométrica

Altura mínima (m.s.n.m.)	Altura máxima (m.s.n.m)	Área parcial (km ²)	Área acumulada (km ²)	Área que queda sobre la superficie (km ²)
560	625	44.37	44.37	187.17
625	663	37.19	81.56	142.80
663	702	21.89	103.45	105.61
702	744	18.68	122.13	83.72
744	790	18.52	140.65	65.04
790	836	13.67	154.32	46.52
836	882	9.89	164.21	32.85
882	928	7.04	171.25	22.96
928	973	4.72	175.97	15.92
973	1023	3.33	179.31	11.20
1023	1077	1.90	181.21	7.87
1077	1134	1.33	182.54	5.96
1134	1184	0.96	183.50	4.63
1184	1234	0.87	184.38	3.67
1234	1280	0.76	185.14	2.80
1280	1322	0.64	185.78	2.03
1322	1364	0.58	186.35	1.39
1364	1406	0.43	186.78	0.82
1406	1459	0.28	187.06	0.39
1460	1540	0.12	187.18	0.11

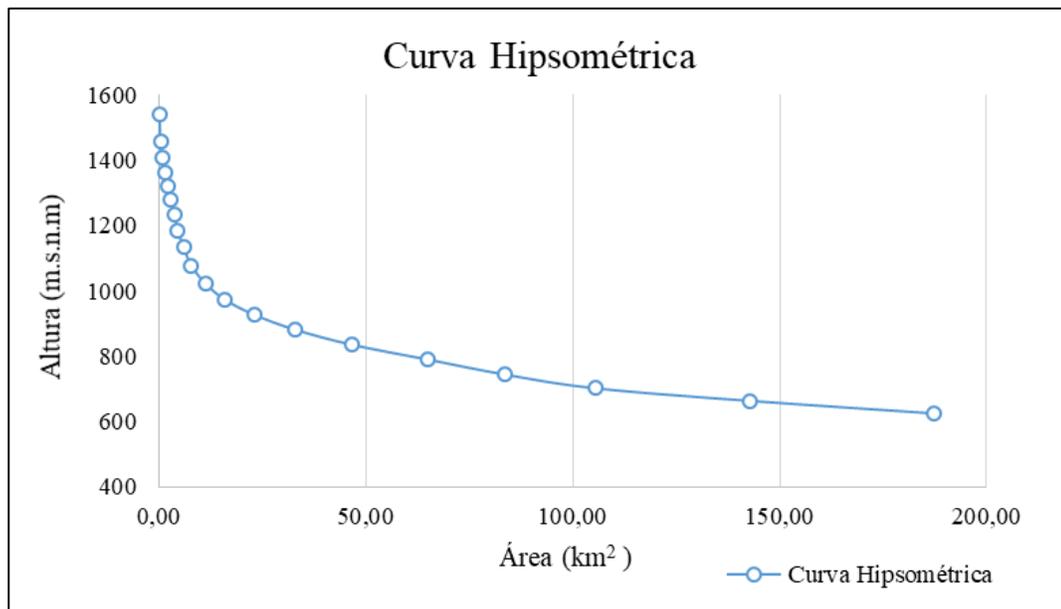


Figura 6.1 Curva hipsométrica de la subcuenca Miranda.

6.2 Mapa de potencial acuífero

A partir del mapa de potencial acuífero de la subcuenca Miranda, obtenido por medio del ADMC (Análisis de Decisiones Multi-Criterio) y el cual se muestra en la figura 6.2, se puede apreciar que la zona de muy alto potencial acuífero (color verde claro) ocupa aproximadamente un 21% del área, concentrándose mayormente en la parte central de la cuenca, al igual que la zona de alto potencial acuífero (color azul claro), el cual ocupa el 15% de la cuenca, ubicándose ambas en la zona de baja pendiente o zona aluvional. Esta área representa la de mayor interés, ya que es donde los habitantes de la población de Miranda y zonas aledañas, por su cercanía, se pueden beneficiar del abastecimiento de estas aguas subterráneas. Otras localidades con muy poco porcentaje de potencialidad acuífera, entre alto y muy alto, se encuentran ubicadas mayormente hacia la zona montañosa de la subcuenca.

De igual forma, se observa hacia la zona noreste y noroeste, adyacentes al área de baja pendiente, que predomina un muy bajo potencial (color rojo), siendo estas partes donde se encuentra la zona montañosa. También, se pueden encontrar pequeñas zonas que rodean a la zona plana, cuyo potencial es muy bajo, ocupando en general, un 13% de

la extensión de la cuenca. A lo largo de toda la zona de estudio se reparte la categoría de potencial moderado y bajo, ocupando cada uno entre el 25% y 26% del área respectivamente. Estas últimas categorías (potencial moderado, bajo y muy bajo), corresponden a las zonas montañosas de la cuenca, las cuales poseen muy bajo potencial, ya que la composición geológica es principalmente esquisto, mármol, gneis y anfibolitas, rocas con muy baja permeabilidad y adicionalmente presentan terrenos con muy alta pendiente. Estas zonas montañosas están conformadas por el Complejo Nirgua, San Julián y Esquistos las Mercedes.

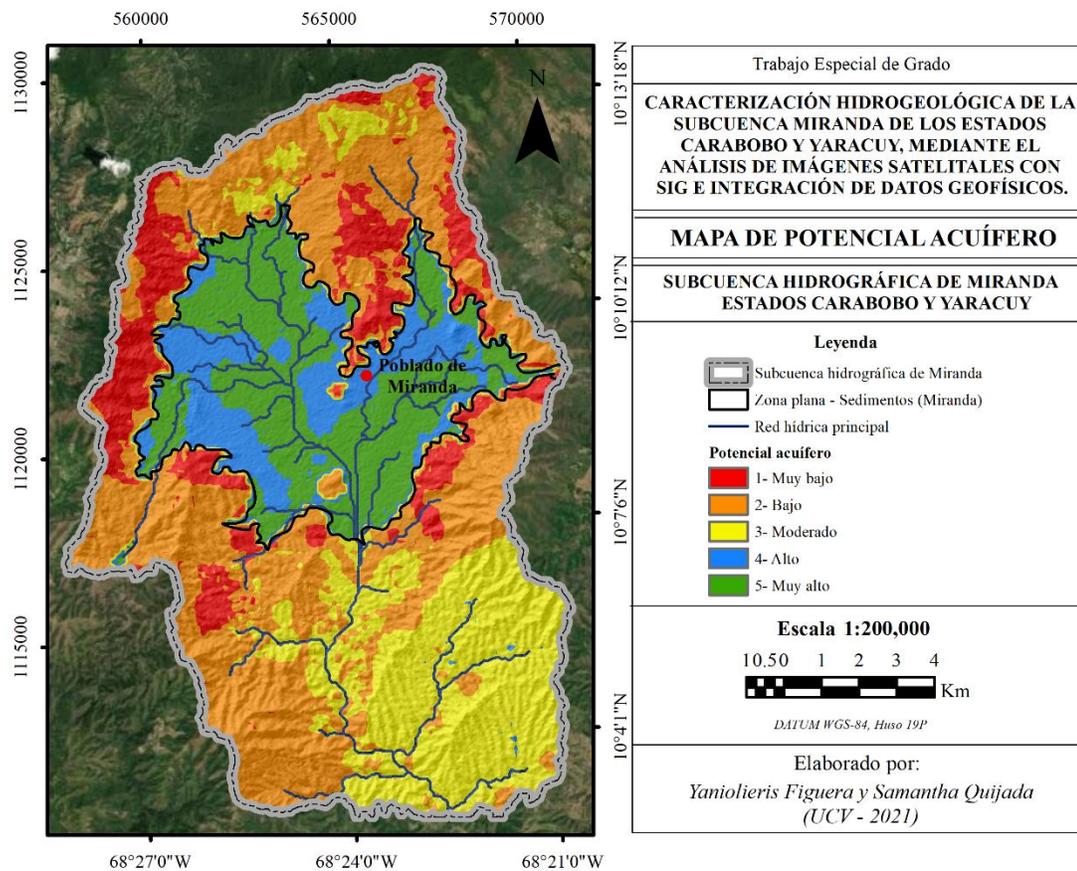


Figura 6.2 Mapa de potencial acuífero.

Tomando en cuenta lo descrito anteriormente, se puede destacar que la mayor cantidad de acumulación de agua subterránea se encuentran ubicada hacia la zona central de la subcuenca Miranda, específicamente en la zona de baja pendiente o zona aluvional,

entre las capas de sedimentos del Cuaternario que conforman la subcuenca. La litología predominante corresponde a sedimentos poco consolidados de arcillas, limos, arenas, gravas, conglomerados, hasta una profundidad máxima de 100 m, según datos de pozos y geología consultada (datos de pozos tabla B.1 y estratigrafía tabla 2.1). Se estima que la zona de recarga hídrica de los acuíferos por infiltración en las zonas montañosas, se encuentra ubicada hacia el noreste, noroeste, adyacentes a la zona sedimentaria, también, hay que destacar que puede existir recarga hídrica directa a lo largo de toda la zona sedimentaria, mayormente por las zonas donde se ubican los drenajes principales de la misma, siempre y cuando la composición litológica de los aluviones sea permeable y permita el flujo de agua hacia niveles más profundos.

Los datos litológicos de pozos en su mayoría indican presencia de alto contenido de arcillas en las primeras capas, haciéndolas semi-permeables. Sin embargo, a profundidades de 10 m en adelante, se encuentra presencia de arenas, gravas, mezcladas con arenas arcillosas, gravas arcillosas que van siendo arenas y gravas más limpias a medida que aumenta la profundidad. Cabe destacar que, los mayores caudales se encontraron en pozos ubicados hacia la zona noreste y este de la parte aluvional de la subcuenca, considerándose la zona con mayor potencial acuífero.

6.3 Métodos eléctricos

Para la interpretación de los resultados obtenidos mediante los SEV realizados, es importante destacar que, la resistividad es una de las propiedades físicas con mayor variabilidad en la prospección geofísica, dado que ésta es afectada principalmente por las variaciones en la porosidad, permeabilidad, temperatura, saturación y salinidad de las rocas presentes en el subsuelo. Estos factores favorecen el flujo de fluidos o el relleno con sedimentos, lo que altera el valor de la resistividad de la roca sana (Daza, 2012). Por ello, es inapropiado hablar de un valor exacto de resistividad eléctrica para una roca, sino más bien hablar de un rango de valores de resistividades, por lo que, a lo largo de esta interpretación, no se dará un valor preciso para determinar tipos de litologías o formaciones, sino que se proporcionará un rango de valores, los cuales serán correlacionados con información geológica y datos de pozos presentes en la zona.

En la figura 6.3 se muestra un ejemplo del modelo de inversión final obtenido por el procesamiento de un sondeo eléctrico vertical, a partir de esta curva se obtienen los valores de resistividad y espesores verdaderos para cada sondeo. Ésta curva varía dependiendo de las propiedades geoelectricas del lugar donde se realiza el sondeo. Los modelos de inversión de todos los sondeos se pueden observar en la sección de apéndices C.3.

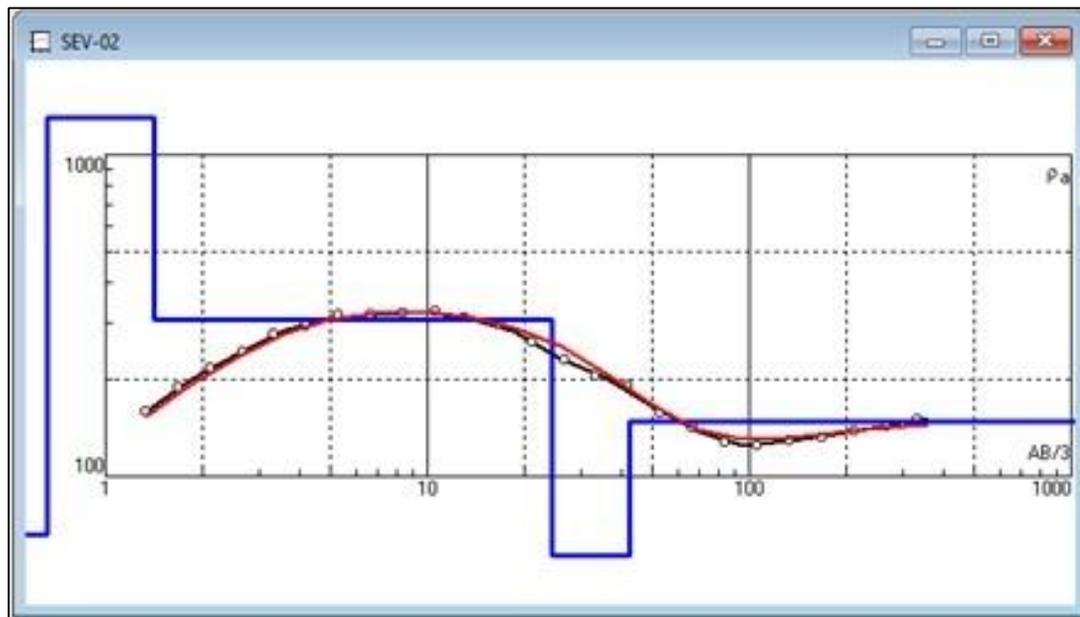


Figura 6.3 Curva de inversión del SEV-02.

6.3.1 Control estadístico del procesamiento de los sondeos eléctricos verticales

Se realizó un análisis estadístico-descriptivo con la finalidad de determinar las características, distribución, tendencias y demás características que permitieran describir los datos geoelectricos y sus valores atípicos. En la tabla 6.3 se muestra la estadística descriptiva para cada capa de resistividad verdadera y el espesor de todos los SEV, obtenida por medio de los modelos de inversión.

Tabla 6.3 Estadística descriptiva por capa para resistividades y espesores.

Estadística descriptiva	CAPA 1		CAPA 2		CAPA 3		CAPA 4	
	Resistividad ($\Omega.m$)	Espesor (m)						
N total	16	16	16	16	16	14	14	10
Media	175	3	361	9	520	31	594	42
Desviación estándar	238	7	421	12	1563	42	1190	26
Mínimo	11	0.2	16	0.7	5	0.9	11	14
Máximo	801	30	1503	44	6355	97	4057	104
Mediana	65	0.7	205	5	50	20	90	38
Rango	789	29	1487	43	6349	155	4046	90
Percentil 25	34	0.5	59	1	29	3	36	22
Percentil 50	65	0.7	205	5	50	20	90	38
Percentil 75	167	2	476	16	279	39	534	52
Desviación absoluta (mediana)	43	0.4	171	4	34	17	68	15

Se analizaron los 16 SEV para la primera capa geoelectrica, obteniéndose un valor máximo de resistividad de 801 $\Omega.m$ (SEV-15) y un mínimo de 11.3 $\Omega.m$ (SEV-09), con valores promedios de 175.05 $\Omega.m$ y una mediana de 65.21 $\Omega.m$.

Para la segunda capa geoelectrica, se encontraron valores máximos de resistividad de 1503 $\Omega.m$ (SEV-02) y mínimos de 16.3 $\Omega.m$ (SEV-14), con espesores máximos de 43.6 m (SEV-15) y mínimos de 0.715 m (SEV-09). El valor promedio de resistividad fue de 361.38 $\Omega.m$ y con una mediana de 205 $\Omega.m$ y un espesor promedio de 9.87 m y una mediana de 5.11 m. Estos valores de resistividad sugieren condiciones favorables para que estas capas puedan asociarse a la presencia de sistemas acuiferos.

La tercera capa geoelectrica, presenta valores de resistividad máxima de 6355 $\Omega.m$ (SEV-14) y mínima de 5.52 $\Omega.m$, con valores promedios de 520.68 $\Omega.m$ y mediana de 50.8 $\Omega.m$. Los espesores que se tienen para esta capa van desde un mínimo de 0.95 m (SEV-09) hasta 97.3 m (SEV-16), la media es de 30.85 m y su mediana de 20.43 m.

Para la última capa geoelectrica, la resistividad máxima encontrada es de 4057 $\Omega.m$ y mínimas de 10.80 $\Omega.m$, con una media de 594.26 $\Omega.m$ y mediana de 9032 $\Omega.m$. Los

espesores para la cuarta capa van desde 13.6 m hasta 104 m, con un promedio de espesores de 42.17 m y mediana de 38.25 m.

6.3.1.1 Resistividad aparente general

La tabla 6.4 muestra la estadística descriptiva obtenida de la resistividad aparente para los 16 sondeos eléctricos verticales. En general, se analizó un total de 380 datos, donde el valor medio general fue de 150 Ω .m, y se obtuvo una desviación estándar de 146.68 Ω .m, la cual señala una distribución de datos muy dispersa. El valor mínimo obtenido fue de 24.91 Ω .m, y el máximo de 800.15 Ω .m. También se observa que el valor que más se repite es de 207.8 Ω .m y la mediana de los datos es de 96 Ω .m, lo que afirma que la distribución es normal. El rango obtenido es de 775.2 Ω .m y la desviación absoluta de la mediana es de 42.5 Ω .m. Los percentiles van desde 60.6 Ω .m (percentil 25), 96 Ω .m (percentil 50) hasta 177.4 Ω .m (percentil 75).

Tabla 6.4. Estadística descriptiva para valores de resistividad aparente general.

Resistividad aparente (Ω .m)	
N total	380
Media	150.3
Desviación estándar	146.7
Mínimo	24,9
Máximo	800.2
Moda	204.8
Mediana	96.0
Rango	775.2
Desviación absoluta (mediana)	42.5
Percentil 25	60.6
Percentil 50	96
Percentil 75	177.4

En la figura 6.4 se muestra un histograma de frecuencias de las resistividades aparentes obtenidas mediante los SEV, en donde se observa que los valores más frecuentes están comprendidos entre los 0-100 Ω .m, seguido por valores entre 100 y 200 Ω .m y en menor proporción valores mayores a los 200 Ω .m. El histograma se representó en escala logarítmica y presenta una distribución normal.

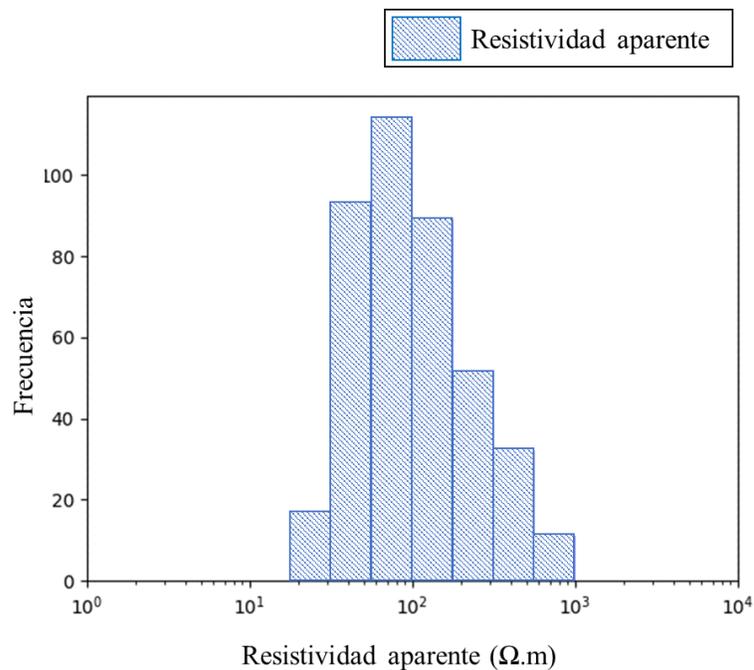


Figura 6.4. Histograma de frecuencias para resistividad aparente en general.

6.3.1.2 Resistividad verdadera general

Un resumen de la estadística descriptiva general, se muestra en la tabla 6.5, donde se observa que el valor mínimo de resistividad fue de 4.1 $\Omega.m$ y el máximo de 10312 Ω . Los promedios obtenidos fueron de 610.23 $\Omega.m$, con una mediana de 99.92 $\Omega.m$, una desviación estándar de 1585.6 $\Omega.m$ y un rango de 10307.8 $\Omega.m$, lo que evidencia que la distribución de datos es muy dispersa.

El histograma de frecuencias de resistividades verdaderas obtenidas a partir del proceso de inversión (figura 6.5) tiene una distribución normal y descendente a la derecha. Se destaca que la mayor parte de los datos se encuentran en un rango de 0 a 500 $\Omega.m$, presentándose con menor frecuencia resistividades mayores a los 500 $\Omega.m$.

Tabla 6.5 Estadística descriptiva para valores de resistividad verdadera general.

Resistividad verdaderas ($\Omega.m$)	
N total	72
Media	610.2
Desviación estándar	1585.6
Mínimo	4.1
Máximo	10312
Moda	204.8
Mediana	99.9
Rango	10307.8
Percentil 25	39
Percentil 50	99.9
Percentil 75	415
Desviación absoluta (mediana)	80.4

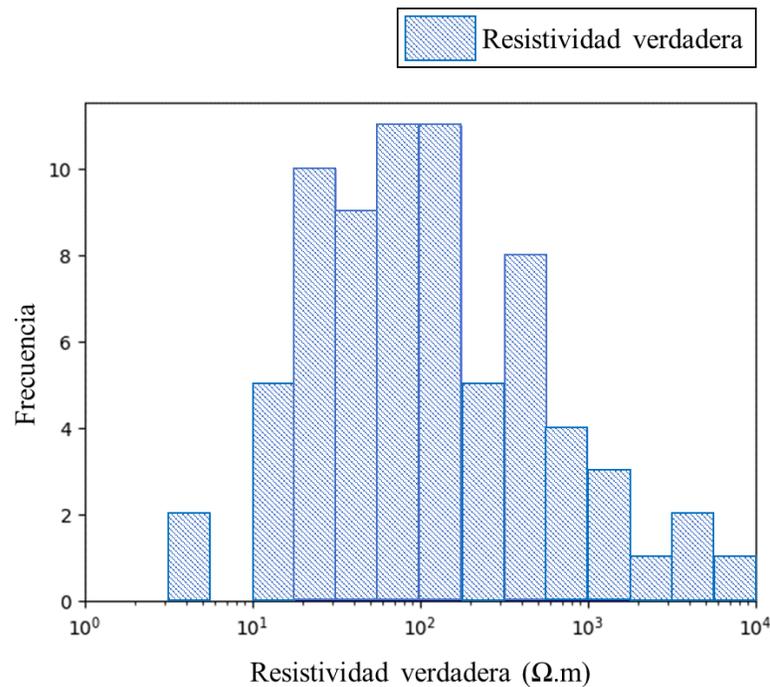


Figura 6.5 Histograma de frecuencia para resistividad de inversión en general.

6.3.2 Resistividades aparentes de los sondeos eléctricos verticales

En la figura 6.6 se muestran las curvas de resistividades aparentes obtenidas a partir de los 16 sondeos eléctricos verticales tipo Wenner realizados. La longitud de separación máxima de $AB/2$ alcanzada en los sondeos fue de 500 m. Sin embargo, no todos los sondeos realizados alcanzaron dicha longitud, debido a que, en algunas localidades, la

extensión y condiciones del terreno no lo permitía. En el gráfico se puede observar que la tendencia predominante entre sondeos, corresponde a curvas tipo “H” y tipo “K”. En la tabla C2 de la sección de apéndices C se muestran las resistividades, profundidades y espesores obtenidos a partir de los modelos de inversión de cada sondeo eléctrico vertical.

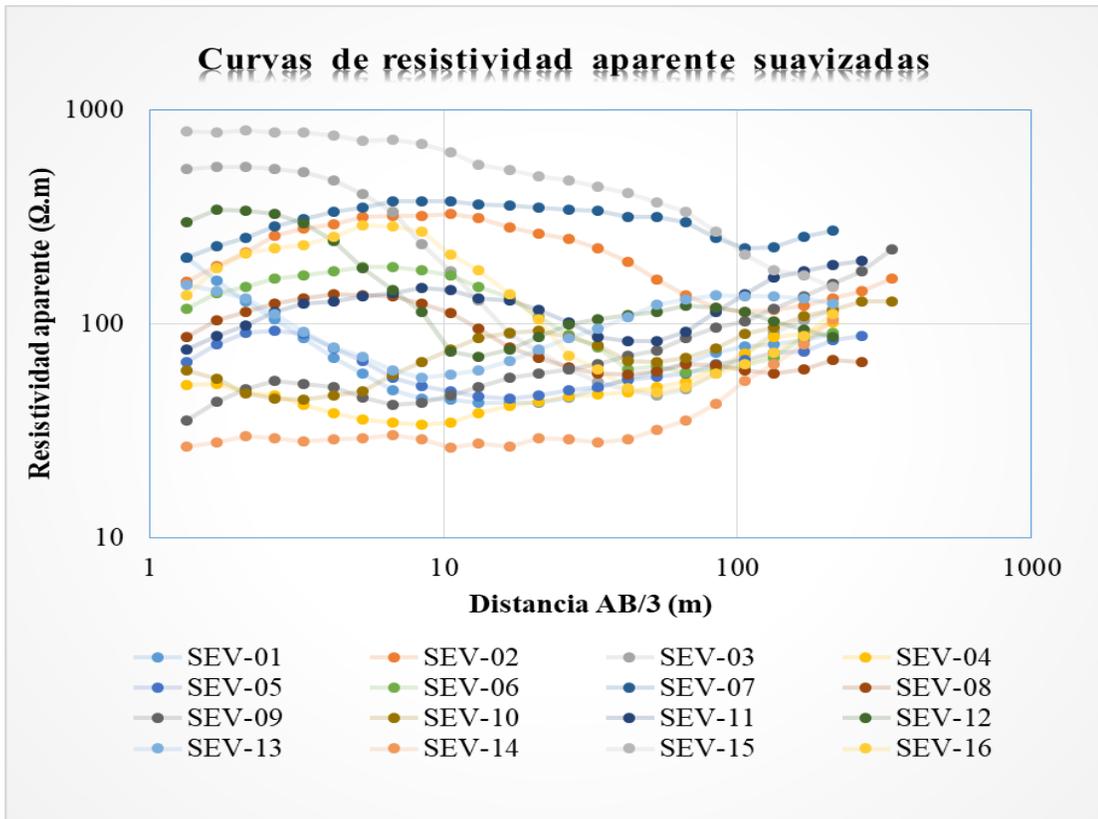


Figura 6.6 Curvas de resistividades aparentes de los sondeos eléctricos verticales.

6.3.3 Mapa de polígonos de Thiessen

Se realizó una clasificación por zonas de influencia, a partir de la inspección de las curvas de resistividad aparente de 3 y 6 capas, obtenidas para cada uno de los 16 sondeos eléctricos verticales. Como ya es conocido, las curvas de resistividad aparente son el resultado de las variaciones litológicas que presenta el subsuelo evaluado y a su vez, estos cambios producen las variaciones de la resistividad verdadera y del espesor de cada capa obtenida (Kalenov, 1957). Con base en los tipos de curvas y su ubicación

geográfica, se generó el mapa de polígonos de Thiessen presentado a continuación en la figura 6.7.

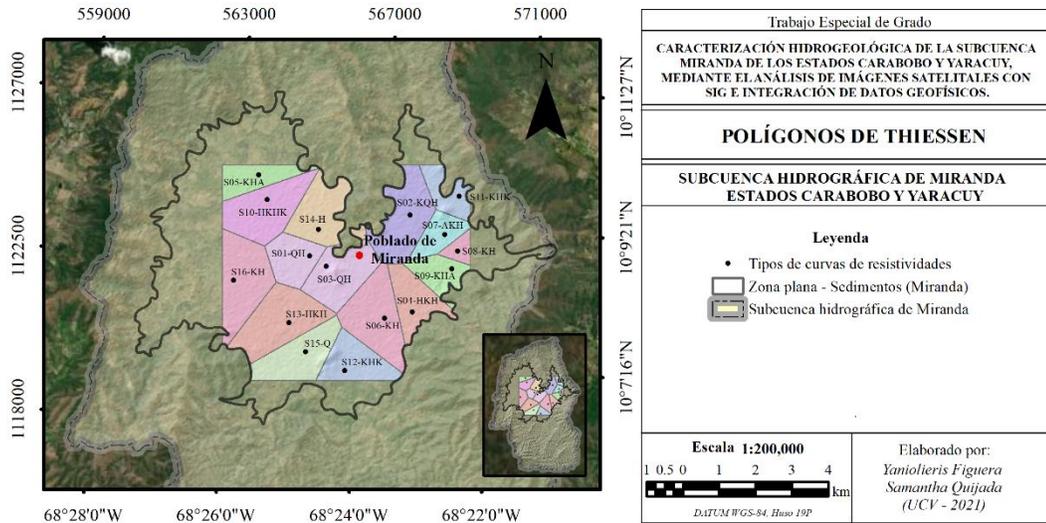


Figura 6.7 Mapa de polígonos de Thiessen de las curvas de resistividad para la subcuenca de Miranda.

Se dividió la zona de estudio según los tipos de curvas de resistividades de tres capas (K, Q, H, A), o combinación de estas, obtenidas para cada sondeo eléctrico vertical.

Es importante destacar que los SEV se realizaron en la zona aluvional de la cuenca. La mayoría de estos sondeos dieron modelos de inversión de al menos 5 capas (SEV-02, SEV-04, SEV-05, SEV-07, SEV-09, SEV-11, SEV-12 y SEV-13), en los cuales predominaron las curvas tipo KQH, KHK KHA y HKH, se tienen pocos sondeos de 3 (SEV-14 y SEV-15), 4 (SEV-01, SEV-03, SEV-06, SEV-16 y SEV-08) y 6 capas (SEV-10).

En el mapa de la figura 6.7 se observa que uno de los sondeos de 3 capas se ubica hacia la parte norte de la zona aluvional (SEV-14-H) con una profundidad de 58.4 m y otro se ubica hacia el sur (SEV-15-Q) con profundidad de 49.6 m. Para el sondeo SEV-14 se obtuvo resistividades correspondientes a contenido de arcillas o limos y arenas arcillosas o arcillas arenosas. En cambio, para el SEV-15 las resistividades se asocian con presencia de arenas o gravas no saturadas en

superficie, que se saturan a medida que aumenta la profundidad, lo que puede indicar la presencia de agua dulce según Kalenov (1957).

Los sondeos donde se obtuvieron 4 capas se encuentran en la parte central del mapa, obteniendo curvas tipo QH para los sondeos SEV-01 y SEV-03, profundidades de 28.1 m y 50.2 m, respectivamente, con resistividades asociadas a la presencia de arenas o gravas no saturadas en superficie y saturadas hacia las capas más profundas. Para el sondeo SEV-06 y SEV-08 se obtuvo una curva tipo KH. Estos sondeos sugieren contenido de arenas o gravas intercaladas entre capas de arcillas o limos (curva K) y arenas o gravas no saturadas seguidas de arenas saturadas (curva H). Para el sondeo SEV-16 se obtuvo una profundidad de 103 m aproximadamente, con resistividades correspondientes a arenas o gravas intercaladas entre capas de arcillas o limos (curva K) y seguidas de arenas o gravas no saturadas.

Por otra parte, el sondeo cuyo modelo de inversión consta de 6 capas geoelectricas se hacia el oeste (SEV-10), con una curva de resistividad tipo HKHK, presentando resistividades correspondientes a arcillas o limos, arcillas arenosas.

Los sondeos SEV-05 y SEV-09 están representados con un color verde claro en el mapa ya que poseen el mismo tipo de curva de resistividad (KHA). Normalmente, este tipo de curvas indican arenas o gravas intercaladas entre arcillas o limos para las capas más superficiales (curva K). Luego, se pueden encontrar arenas o gravas que se saturan a más profundidad. Para el SEV-05 se obtuvo una profundidad de 62.8 m y el SEV-09 alcanzó 40.9 m de profundidad.

Los sondeos SEV-04 y SEV-13 presentan curvas tipo HKH mientras que los sondeos SEV-11 y SEV-12 tienen curva tipo KHK. Ambos poseen comportamientos similares. Las resistividades corresponden, principalmente, a litologías tipo arcillas o limos, encerrando capas de arenas o gravas saturadas.

Finalmente, los sondeos SEV-02 y SEV-07 se encuentran hacia la parte noreste del mapa y representan una curva de resistividad tipo KQH y AKH

respectivamente. Estos sondeos se encuentran muy cerca del SEV-11 por lo que se podría suponer que tienen un comportamiento similar.

En general, la zona tiene resistividades que corresponde a la posible presencia de suelos que tienen la capacidad de retener el agua o almacenarla superficialmente, contribuyendo al aporte de caudales hacia la red hídrica. Además, se pueden observar las litologías óptimas (arenas o gravas) encerradas entre capas de arcillas o limos, sirviendo como una especie de sello para evitar la contaminación del agua subterránea.

6.3.4 Resistividad óptima

En la figura 6.8 se muestra el mapa de resistividades óptimas, donde se tienen dos zonas definidas: el centro y límites de la zona aluvional. Hacia la zona central los valores de resistividad oscilan entre 290 y 500 Ω .m representada en todos naranjas y amarillos, que va disminuyendo progresivamente hacia los límites de la zona aluvional con valores de resistividad entre 210 y 50 Ω .m.

Por otra parte, se relaciona la figura 6.8 con el mapa de profundidad de la resistividad óptima mostrado en la figura 6.9, donde se observa que, en las zonas noroeste y sureste, las capas geoelectricas resistivas se encuentran a 64 m de profundidad, aproximadamente. Hacia el este y noreste las resistividades óptimas se encuentran entre 8 y 16 m de profundidad. En la zona central se puede observar que la profundidad a la que se obtienen las resistividades óptimas es de 40 a 56 m

De igual forma, se observa que desde el sur hacia el centro la profundidad disminuye progresivamente desde 64 hasta 56 m. Estos mapas, complementan la información suministrada en la figura 6.21, que, en conjunto con el nivel freático, se puede establecer la profundidad a partir de la cual se encuentran saturadas las formaciones.

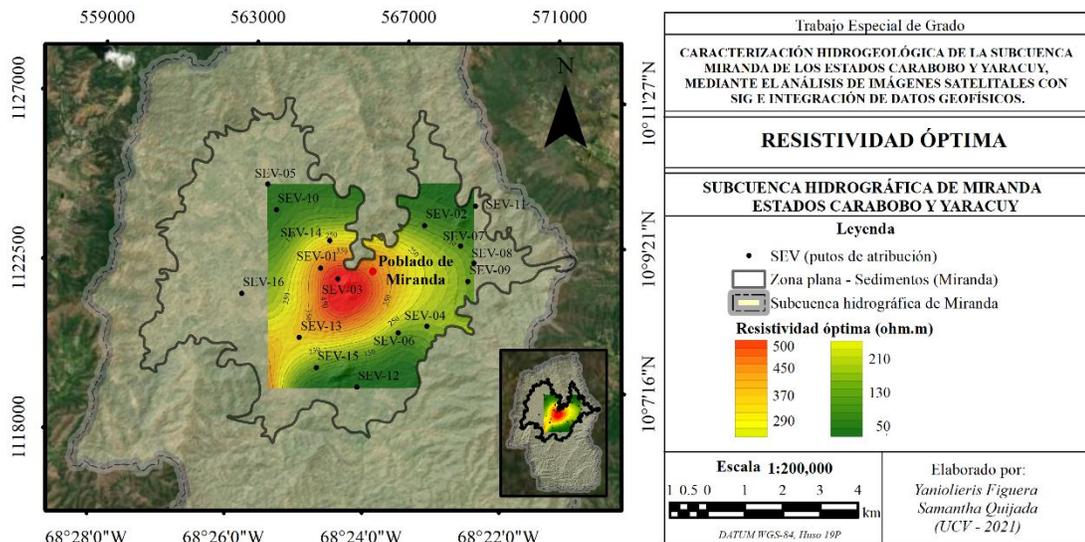


Figura 6.8 Mapa de resistividad óptima.

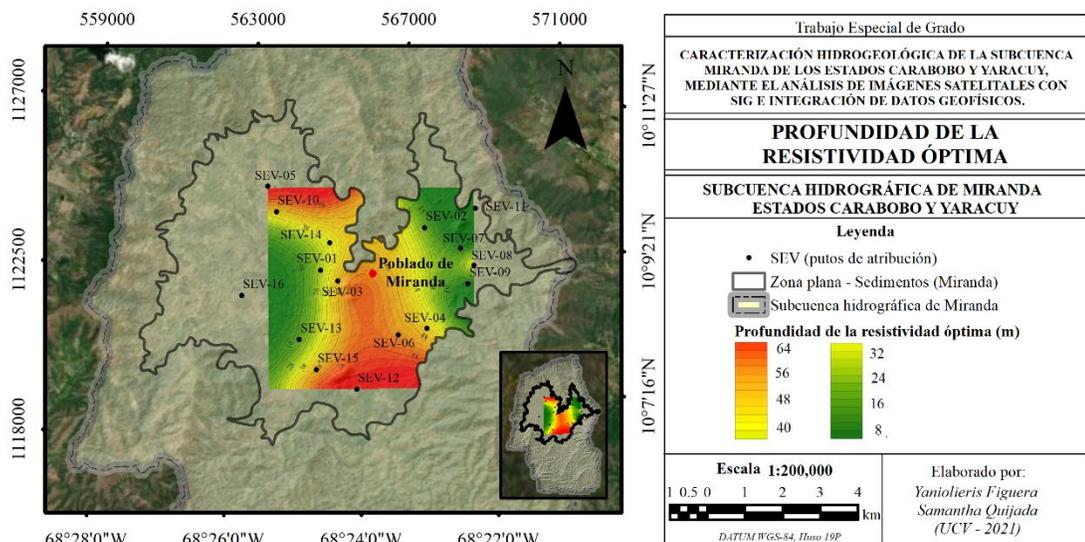


Figura 6.9 Mapa de profundidad de la capa con resistividad óptima.

6.3.5 Mapa de conductancia longitudinal

La evaluación del parámetro de conductancia longitudinal S , es un buen complemento para la identificación de capas acuíferas con posibilidad a ser prospectivas. La S de Dar Zarrouk tiene un valor máximo cuando el grosor de las capas poco resistivas suprayacentes a la formación acuífera es grande, otorgando al acuífero una alta

protección a la contaminación desde la superficie del terreno (Casas *et al.*, 2008), por lo tanto, es posible que contenga agua potable consumible para el ser humano. En la figura 6.10 se observa valores de conductancia longitudinal que van desde 0.04 a 1.76 siemens (tabla C.3). En la parte central hacia el oeste de la zona aluvional se encuentran los valores máximos de hasta 1.8 siemens, observándose también altos localizados hacia el sureste y noroeste, en rangos de 1.2 a 1.5 siemens. En cambio, hacia la zona noreste y suroeste se encuentran los mínimos, con valores desde 0.04 a 0.9 siemens. Se considera que, valores de conductancia longitudinal superiores a 0.5 siemens indican zonas en las que el sistema acuífero estará más protegido, mientras que valores de S inferiores a 0.5 siemens indican zonas con mayor riesgo a que las aguas subterráneas se vean afectadas por la contaminación, ya sea puntual o difusa (Sendrós, 2012).

Al comparar el mapa de conductancia longitudinal con la figura 6.38 (mapa de anomalía de Bouguer) se observa semejanza de los máximos valores de conductancia en relación los mínimos anómalos, lo cual es de esperarse ya que esta zona representa el depocentro aluvional, por lo que debe existir mayor protección a las formaciones acuíferas debido a que hacia el depocentro del valle aluvional se tienden a depositar el mayor contenido de arcilla, lo que garantizaría, por ende, una mayor protección.

En el mismo sentido, se comparó el mapa de conductancia longitudinal (figura 6.10) con el mapa de potencial acuífero (figura 6.2), donde se visualiza que la zona con mayor protección ante contaminantes se encuentra ubicada en una zona potencialmente acuífera.

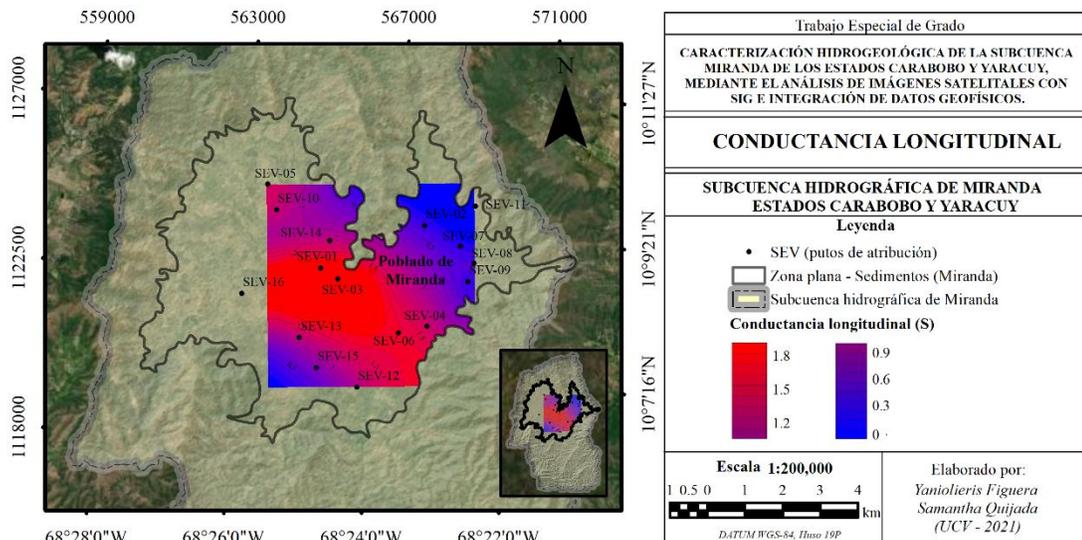


Figura 6.10 Mapa de conductancia longitudinal.

6.4 Métodos sísmicos

La aplicación de la refracción sísmica permitió caracterizar los sedimentos de acuerdo a sus propiedades elásticas, ya que, a mayor compactación de la capa, el valor de la velocidad de onda tiende a aumentar, lo que permite identificar sedimentos sueltos, compactos, saturados o secos. Con este método no se puede conocer el contenido litológico de los sedimentos, pero si se puede identificar la profundidad a la que se puede encontrar una capa saturada de agua, considerando que la velocidad de las ondas P en el agua es de 1500 m/s. El mayor aporte fue identificar el posible nivel freático de cada uno de los tendidos realizados y así, poder correlacionarlo con los resultados obtenidos por medio de los sondeos eléctricos.

Es importante destacar que al hablar de capas sísmicas (capas 1, 2, 3, 4, etc.), se refiere a una forma de clasificar, en orden descendente, los diferentes estratos que conforman el subsuelo y en un lugar determinado, de acuerdo a las velocidades a las que se propagan las ondas sísmicas en cada uno de ellos. Por lo tanto, no necesariamente existe correlación directa entre para una misma capa en diferentes sondeos.

En la figura 6.11 se muestra un ejemplo de una dromocrónica y un modelo 2D, el cual es el resultado final del procesamiento de una refracción sísmica, aquí se obtiene la

velocidad y espesor para cada sondeo. Los modelos de inversión de todas las refracciones se pueden observar en la sección de apéndices D.1.

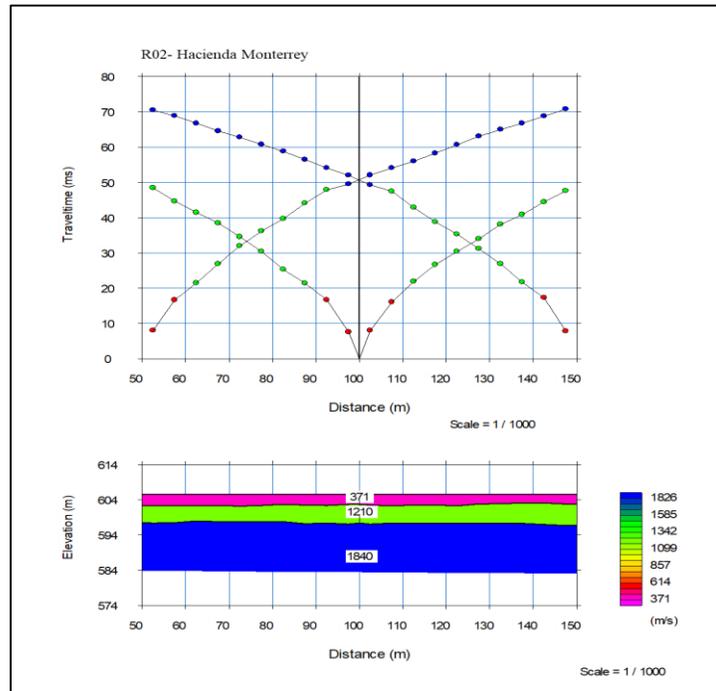


Figura 6.11 Dromocrónica y modelo 2D para el sondeo R-02.

6.4.1 Control estadístico para refracciones sísmicas

Se realizó un control estadístico para conocer las características y tendencias generales de los datos de velocidades y espesores de las capas definidas por las velocidades de onda P del subsuelo en el área de estudio, cuyos estimadores estadísticos se resumen en la tabla 6.6 (análisis estadístico de velocidades y espesor por capa).

Tabla 6.6 Análisis estadístico de velocidades y espesor por capa.

Estadística descriptiva	CAPA 1		CAPA 2		CAPA 3		CAPA 4
	Velocidad (m/s)	Espesor (m)	Velocidad (m/s)	Espesor (m)	Velocidad (m/s)	Espesor (m)	Velocidad (m/s)
N total	17	17	17	17	17	13	13
Media	500.88	3.10	1218.1	8.51	1735.2	12.95	1910
Desviación estándar	58.9	06.22	253,1	2.77	189.0	1.68	207.2
Mínimo	371	2.35	774	5.7	1352	10.5	1546
Máximo	607	4.6	1761	16.62	1993	15.7	2225
Mediana	506	3.02	1219	7.73	1791	13.4	1865
Rango (Máximo-mínimo)	236	2.25	987	10.92	641	5.2	679
Percentil 25	489	2.58	1036	7.16	1563	11,4	1763
Percentil 50	506	3.02	1219	7.73	1791	13.4	1865
Percentil 75	530	3.52	1332	8.74	1852	14.1	2058
Desviación absoluta (mediana)	24	0.5	165	0.97	155	1	150
Moda	-	2.35	1229	-	-	13.9	-

Para la primera capa se registraron velocidades entre 371 a 607 m/s, con un promedio de 500.88 m/s y una mediana de 506 m/s, mientras que los espesores registrados se encuentran entre 2.35 y 4.6 m con media de 3.1 m y mediana de 3.02 m. Debido a que esta capa presenta velocidades muy bajas, tiene poca posibilidad de estar saturada de agua. El histograma de frecuencias para V_p (figura 6.12) presenta una distribución sesgada a la izquierda con una frecuencia mayor de datos para velocidades entre 450 y 550 m/s. Por otra parte, en el diagrama de caja de la derecha se observan dos valores atípicos, uno por encima del percentil 75 y otro por debajo del percentil 25. Los espesores tienen poca variación en el histograma de frecuencia, siendo de 2.5 y 3 m y de 3.5 a 4 m los que presentan mayor frecuencia.

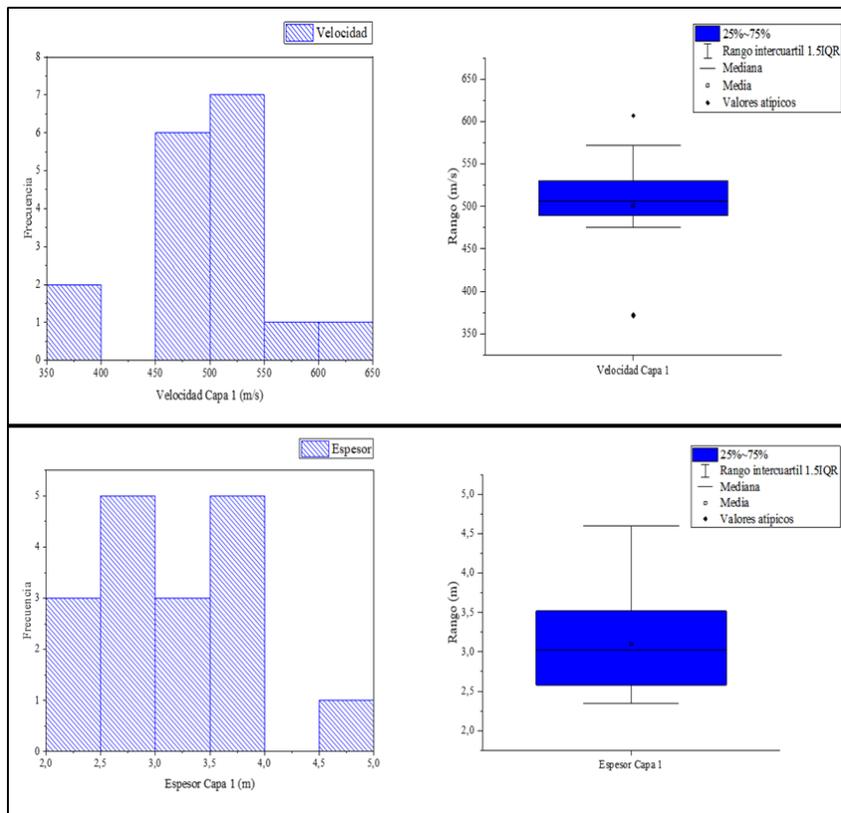


Figura 6.12 Histograma de frecuencia y diagrama de caja de velocidades y espesores de la capa 1.

Luego de aplicar el análisis estadístico para la segunda capa, se observaron velocidades máximas de 1761 m/s y mínimas de 774 m/s, con un promedio general de 1218.1 m/s y una mediana de 1219 m/s. Los espesores determinados se encuentran en un rango de 5.7 m a 16.62 m, con valor para la media de 8.51 m y mediana de 7.73 m.

En el histograma de frecuencia de datos de velocidades sísmicas que se muestra en la figura 6.13, se distingue una distribución simétrica con una frecuencia de datos mayor entre 1200 y 1400 m/s, la misma figura muestra el diagrama de caja, en el que se identifica la coincidencia de la mediana con la media y que, además, no hay presencia de valores atípicos en la distribución. Por otra parte, el histograma de los espesores (figura 6.13) tiene una distribución sesgada a la izquierda con mayor frecuencia de datos entre 6 y 10 m. Para el diagrama de caja se observan 2 valores atípicos localizados por encima del percentil 75 y una mediana desviada de la media.

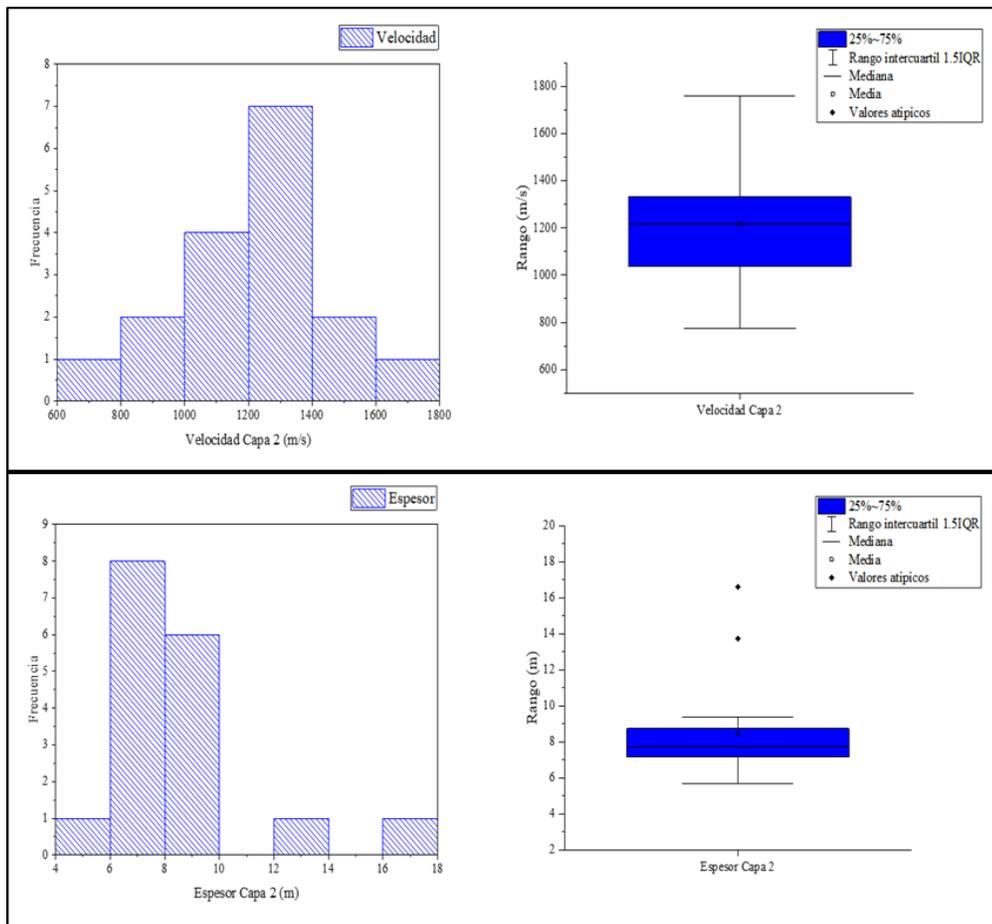


Figura 6.13 Histograma de frecuencia y diagrama de caja de velocidades y espesores de la capa 2.

Con respecto al análisis estadístico de la tercera capa, se observa que la velocidad mínima presente es de 1352 m/s, una velocidad máxima de 1993 m/s y una mediana de 1791 m/s, además se tiene una media de 1735 m/s, por lo que indica que la distribución de los datos es simétrica. Por otro lado, los espesores, varían desde 10.5 m hasta 15.7 m, con un valor medio de 12.9 m y una mediana de 13.4 m, indicando también, poca dispersión. Los histogramas y diagramas de cajas mostrados en la figura 6.14, muestran una distribución asimétrica para las velocidades y una distribución plana para los espesores, sin presencia de valores atípicos.

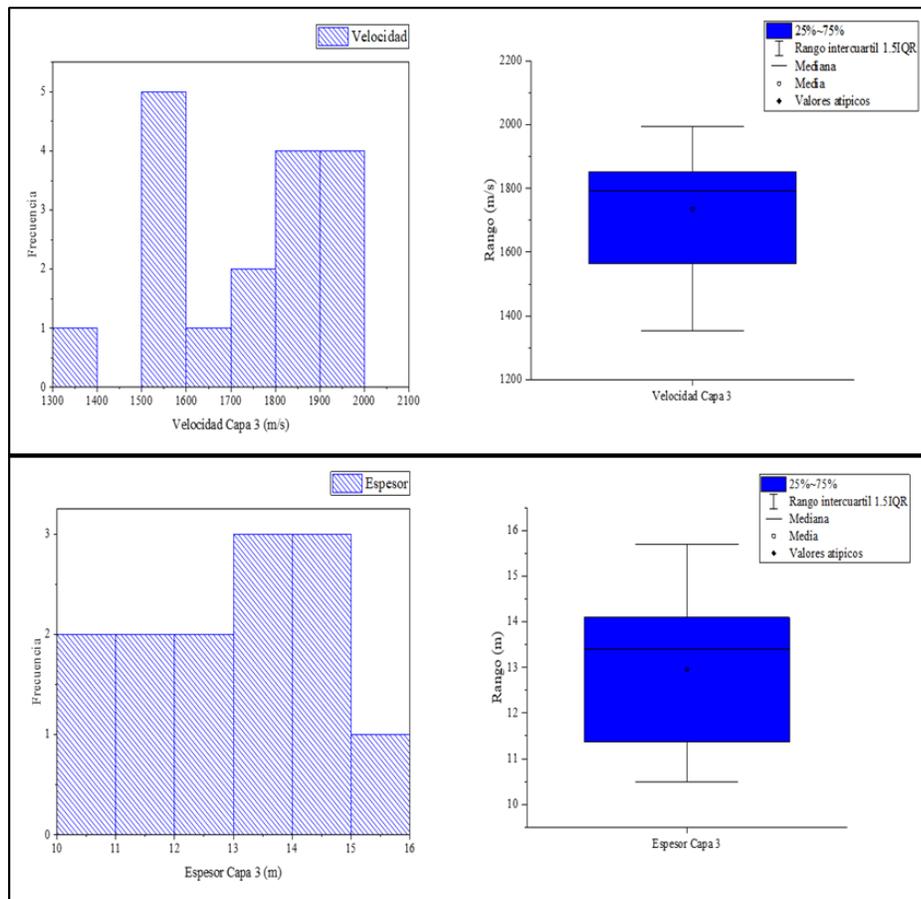


Figura 6.14 Histograma de frecuencia y diagrama de caja de velocidades para la capa 3.

Por último, para las velocidades sísmicas de la capa 4 se obtuvo un valor mínimo de 1546 m/s y un máximo de 2225 m/s, la media es de 1910 m/s y la mediana de 1865 m/s, indicando poca dispersión de los datos. En el histograma de frecuencia de la figura 6.15 se observan dos modas, una hacia la izquierda con velocidades que van desde los 1500 m/s hasta 1900 m/s, teniendo una mayor frecuencia las velocidades que se encuentran entre 1700 y 1800 m/s. Hacia la derecha, se tiene un grupo que va desde 200 m/s hasta 2300 m/s, con velocidades que presentan mayor frecuencia entre 200 y 2100 m/s, decreciendo hasta llegar a las velocidades de 2300 m/s. El diagrama de caja muestra que no existen valores atípicos y se observa una media cercana a la mediana.

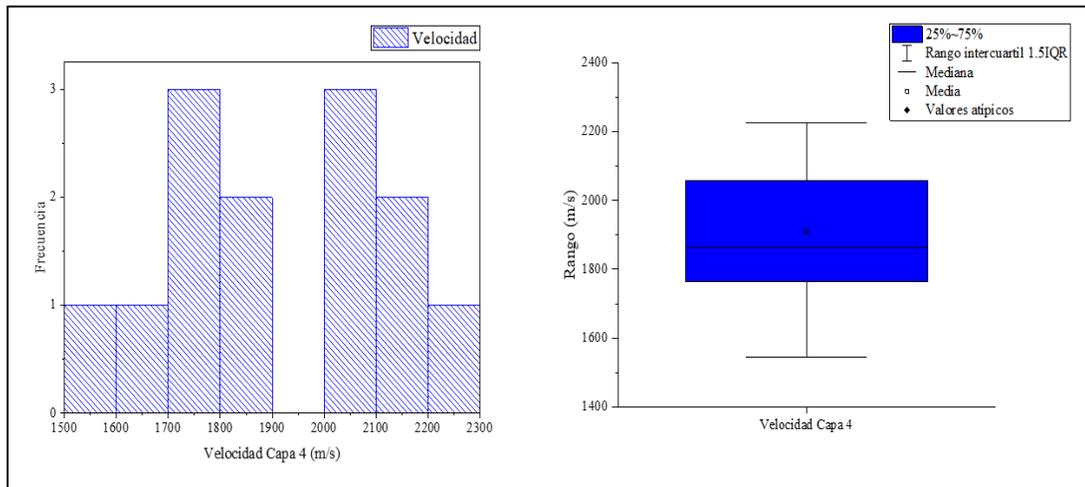


Figura 6.15 Histograma de frecuencia y diagrama de caja de velocidades para la capa 4.

6.4.1.1 Tendencia general de las velocidades sísmicas

Con la finalidad de conocer la distribución y características generales de todas las velocidades obtenidas, se realizó el diagrama de frecuencia que se muestra en la figura 6.16, donde se observa una distribución asimétrica, con una moda de velocidad que se encuentra a los 500 m/s y otra moda a los 1900 m/s. Las velocidades cuyos rangos se encuentra entre los 0 y 500 m/s, 500 y 1000 m/s y mayores a 2000 m/s no son tan frecuentes.

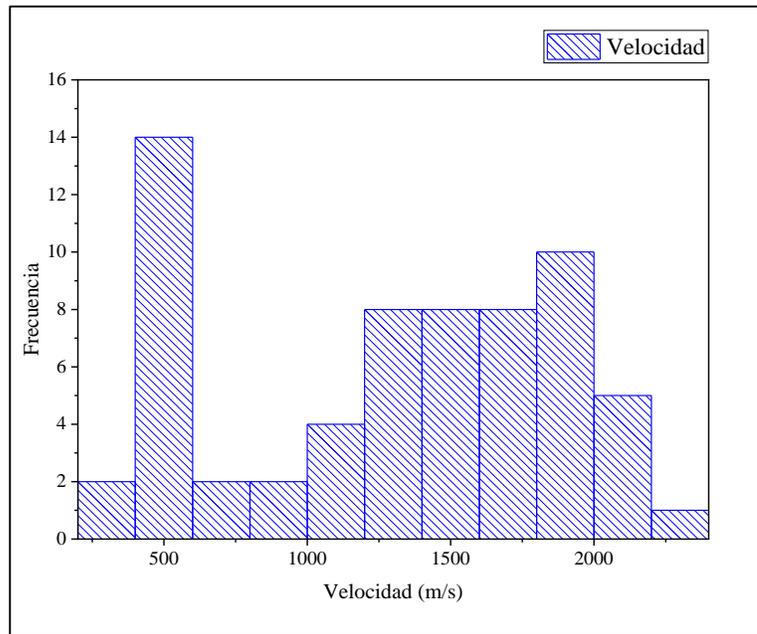


Figura 6.16 Histograma de frecuencia para todas las velocidades.

6.4.2 Inversión de datos de refracciones sísmicas

Para el procesamiento de los datos de refracción sísmica de ondas P, se realizaron modelos de inversión para cada uno de los tendidos, con la finalidad de conocer las velocidades y espesores de cada capa e identificar posibles litologías que cumplan con las características adecuadas para acumulación de aguas subterráneas. En la tabla 6.7 se observan los resultados obtenidos de los modelos de inversión para cada tendido, donde se logró alcanzar un total de 4 capas.

Tabla 6.7 Velocidades y espesores de ondas P para las capas de todos los tendidos.

SONDEO	CAPA 1		CAPA 2		CAPA 3		CAPA 4
	Velocidad (m/s)	Espesor promedio (m)	Velocidad (m/s)	Espesor promedio (m)	Velocidad (m/s)	Espesor promedio (m)	Velocidad (m/s)
R-01	495	3.62	1534	9.36	1993	-	-
R-02	371	2.87	1210	8.26	1840	-	-
R-03	607	3.52	930	7.73	1534	12.42	1692
R-04	498	4.6	1036	13.74	1990	-	-
R-05	520	3.47	1229	9.22	1852	15.7	2013
R-06	372	2.5	936	6.04	1352	10.56	1546
R-07	506	3.76	1320	16.62	1809	-	-
R-08	537	2.35	1761	6.1	1905	11	2015
R-09	538	3.02	1229	6.76	1549	11.37	1803
R-10	522	2.64	1219	7.16	1591	12.65	1753
R-11	475	2.4	1016	7.72	1514	13.9	1763
R-12	489	3.5	1112	8.3	1829	13.4	2058
R-13	572	3.52	1116	8.74	1760	14.5	2195
R-14	530	3.18	1384	8.14	1791	14.4	2106
R-15	507	2.35	1570	5.7	1680	10.5	1796
R-16	480	2.83	1332	7.68	1946	13.9	2225
R-17	496	2.58	774	7.32	1563	14.1	1865

6.4.3 Mapas de velocidad de la onda P

- Capa 1

En la figura 6.17, se muestra el mapa de velocidad V_p generado para la capa 1, en el cual se pueden observar valores de velocidad que van desde los 370 m/s hasta 610 m/s. Los valores mínimos de velocidad se extienden desde el este hacia el noroeste de la zona aluvional de la subcuenca. También, se tienen mínimos hacia el oeste, con velocidades de 370 m/s a 450 m/s. Los valores máximos de V_p se ubican en tres zonas, hacia la parte noreste de la cuenca, hacia el sureste y en la parte centro-este, con velocidades que van en rangos de 500 m/s a 610 m/s.

Debido a los bajos valores de velocidades en esta primera capa, la posibilidad de presencia de agua subterránea a tan poca profundidad es muy poca. Estas velocidades se atribuyen, en conjunto con los datos de pozos (tabla B.1), a sedimentos poco consolidados, conformados por posibles capas de limos, limos arcillosos y arenas sueltas.

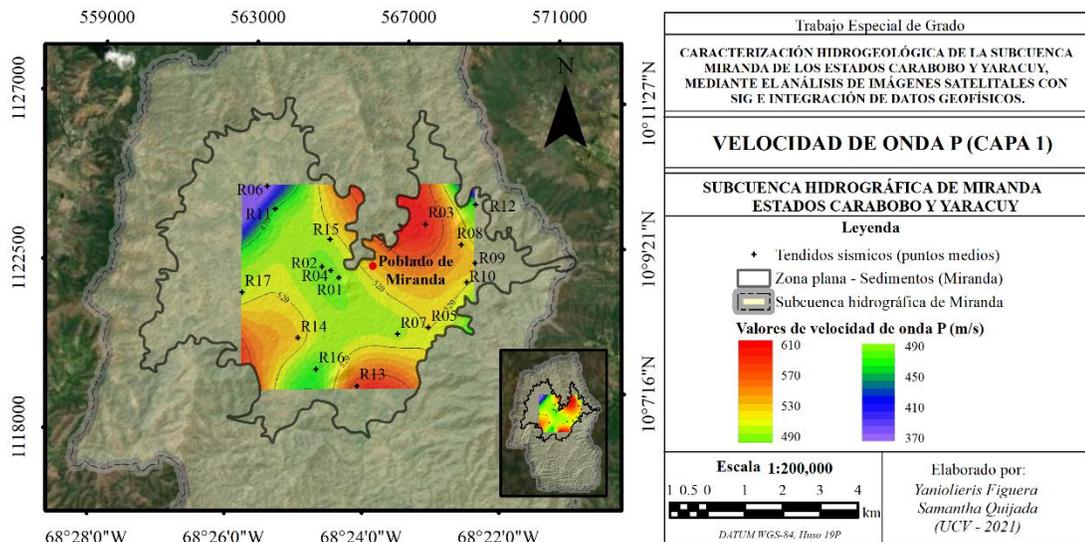


Figura 6.17 Velocidad de la onda P en la capa 1.

- Capa 2

El mapa de velocidades obtenido para la capa 2 (figura 6.18) muestra velocidades que varían en un rango de 700 m/s a 1750 m/s, mientras que los espesores se encuentran entre 5.7 m y 16.6 m. Hacia la parte este y noreste de la zona aluvional, se observan mínimos de velocidad de 700 m/s a 1050 m/s a profundidades que no superan más de 10 m. Esta respuesta parece estar asociada a la presencia de arenas secas y sueltas, con poco potencial acuífero a esa profundidad. Se observan dos máximos localizados en el mapa, hacia el noreste y hacia el noroeste, con valores que van desde 1350 m/s hasta 1750 m/s, siendo los lugares con velocidades mayores a 1500 m/s, posibles zonas con condiciones favorables acumulación de agua subterránea. En general, las velocidades más frecuentes obtenidas de cada sondeo para esta capa van desde los 1000 m/s hasta 1350 m/s. A estas profundidades se pueden encontrar arenas mezcladas con arcillas y arenas gravosas o gravas con presencia de arcillas y arenas.

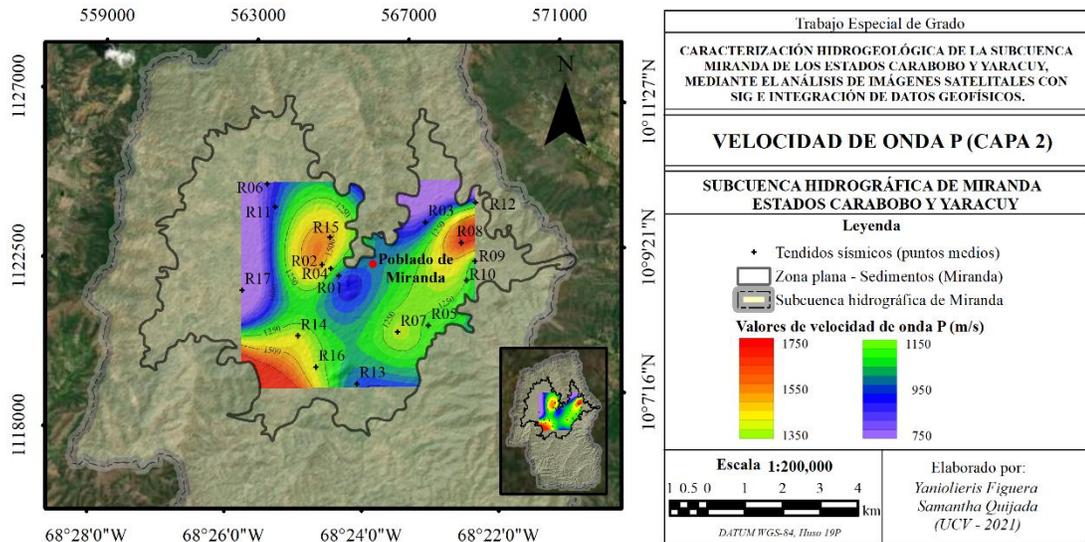


Figura 6.18 Velocidad de la onda P en la capa 2

- Capa 3

En la figura 6.19 se muestra el mapa de velocidades de ondas P para la capa 3, en el cual se observan velocidades desde 1300 m/s hasta 2050 m/s, asociados a espesores que van desde 10.5 m hasta 15.7 m y con profundidades entre 11 m y 29 m. Al igual que en el mapa de la capa 2 (figura 6.18), los valores de relativa baja velocidad, entre los 1300 m/s y 1500 m/s, se encuentran hacia el este y noreste, ocupando también una pequeña zona del noroeste y un mínimo localizado hacia el oeste, estas velocidades se asocian a sedimentos no saturados, en cambio, los valores que se encuentran en el rango de 1500 a 2000 m/s, consideradas como sedimentos saturados, se encuentran representados entre colores naranja y rojo hacia la parte central de la zona aluvional, extendiéndose con una tendencia aproximada de N45°E hacia el sur y norte de la zona sedimentaria.

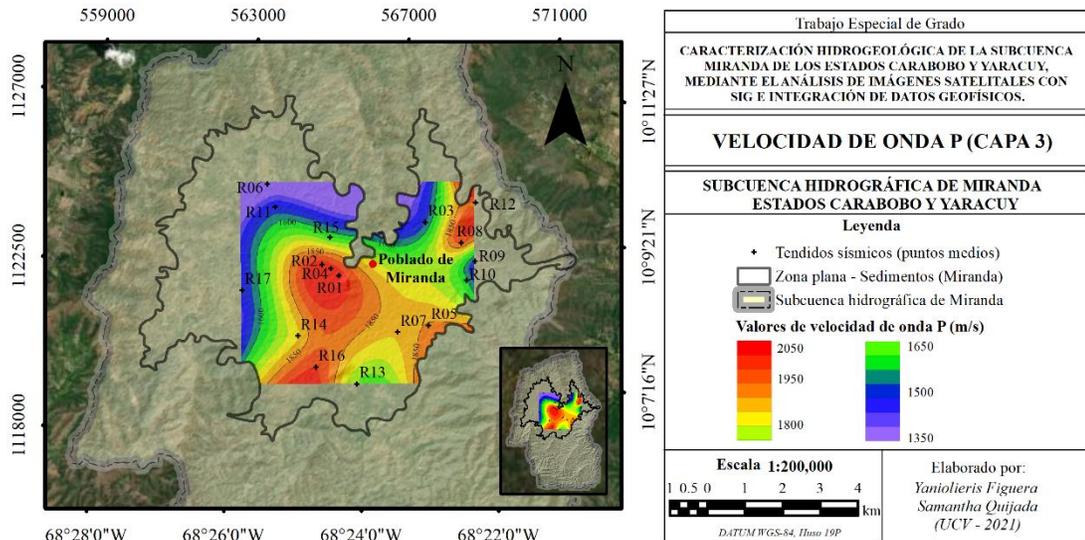


Figura 6.19. Velocidad de la onda P en la capa 3.

- Capa 4

La figura 6.20 muestra el mapa de velocidades para la capa 4, la cual se encuentra a partir de los 29 m de profundidad y cuyo espesor no puede establecerse debido a que la refracción sísmica realizada no alcanzó mayores profundidades. En esta capa se observan velocidades de ondas P que van desde 1500-2250 m/s, siendo el rango óptimo para encontrar aguas subterráneas el anteriormente mencionado. Según la litología suministrada por el control de pozos, a estas profundidades se pueden encontrar mayormente arenas, arenas arcillosas, gravas, gravas arcillosas, gravas arenosas, con posibles intercalaciones de capas muy delgadas de arcillas en algunas zonas. Al igual que los mapas de las capas 1, 2 y 3, se observa una tendencia de mínimos hacia el noroeste de la zona aluvional con valores de velocidad de onda P que oscilan desde 1500 m/s hasta 1800 m/s. Sin embargo, se observa un aumento gradual de la velocidad en dirección norte-sur, con una orientación preferencial de contornos en la parte este de N85°E y E-W hacia el sur. Hacia el noroeste los contornos tienen una dirección N10°W. Los máximos se encuentran ubicados en la parte sur de la zona aluvional, y un pequeño máximo hacia el noreste, con valores de velocidad de 2000 m/s a 2250 m/s, descartando estos valores para presencia de agua, ya que se encuentran asociados preferiblemente a arcillas, arenas y gravas no saturadas.

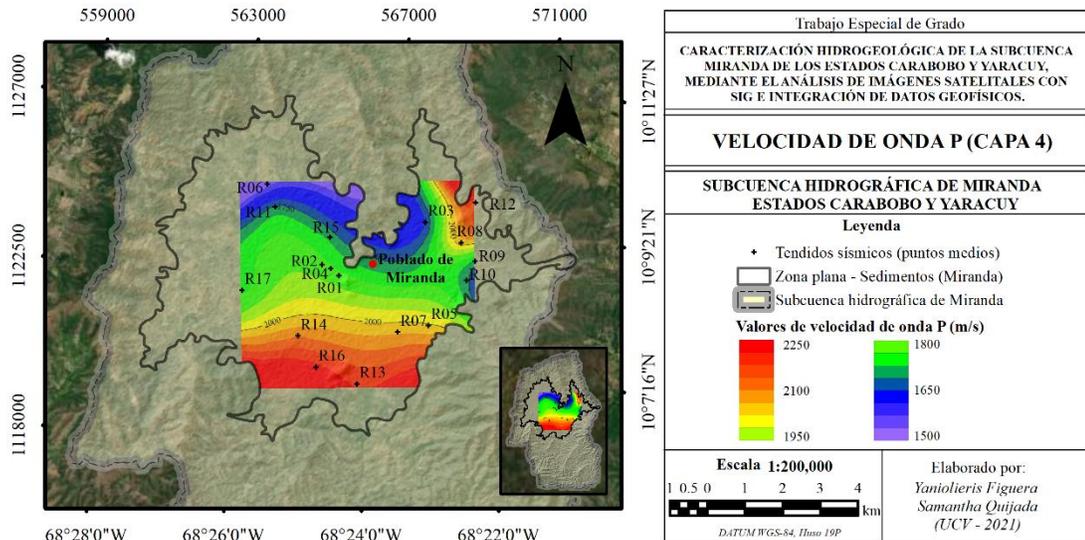


Figura 6.20. Velocidad de la onda P en la capa 4.

6.4.4 Mapa de nivel freático

Se elaboró un mapa del nivel freático de las capas saturadas con agua y a lo largo de toda la zona aluvional, el cual es mostrado en la figura 6.21. Para ello, se utilizaron datos de velocidades sísmicas, donde se seleccionaron las profundidades de las capas cuya velocidad estuviese por encima de 1500 m/s y por debajo de 2000 m/s. Tomando en cuenta este factor, se seleccionó dicha profundidad en cada sondeo.

En la figura 6.21 se puede observar que las zonas con la profundidad menor del nivel freático se encuentran hacia el noreste y noroeste, con valores que van desde 2 m hasta 11 de profundidad. En la zona central y al noroeste se encuentra un valor máximo de 20 m de profundidad y hacia el suroeste se visualizan valores desde 8 m a 14 m. Estos valores nos indica una tendencia aproximada de la profundidad a la que se puede encontrar el agua en el subsuelo.

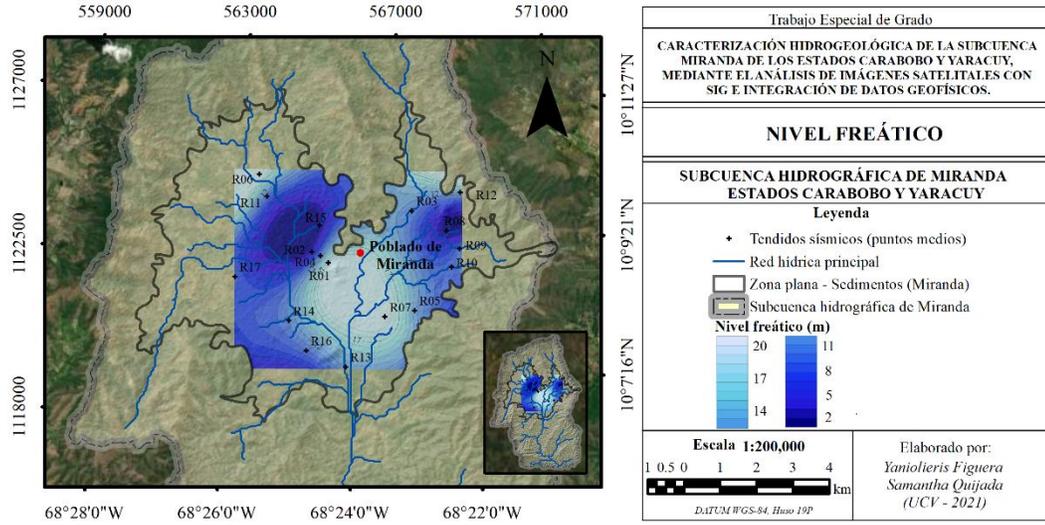


Figura 6.21 Nivel freático de la zona aluvional de la subcuenca de Miranda.

6.5 Integración de métodos eléctricos y sísmicos

La integración de métodos geofísicos ha demostrado aportar muchos beneficios para la interpretación de las técnicas individuales. Cada método es fundamental en la correcta caracterización del subsuelo, por lo que, al integrar los resultados de varios métodos se facilita la interpretación y se logra obtener un conocimiento más completo de las condiciones geológico-geotécnicas del terreno. Además, aumenta la profundidad de investigación, se mejora la resolución, se afianzan las unidades interpretadas, disminuye el grado de incertidumbre de las mismas y se evita la interpretación de resultados erróneos asociados a las limitaciones de cada método (Olona, 2014).

Se correlacionaron los sondeos geoléctricos y sísmicos que se encontraron más cercanos a los pozos, con la finalidad de disminuir la incertidumbre en la interpretación y mejorar la calidad de los resultados. Para identificar las posibles capas acuíferas se tomaron como referencia los valores de resistividad comprendidos entre 50 y 500 Ω .m mostrados en la tabla 4.1 (clasificación hidrogeológica de aguas subterráneas), mientras que los valores de velocidad de ondas P (tabla 4.12 de velocidades) en un rango de 1450 a 2000 m/s se usaron para indicar el tope de la litología saturada o nivel freático.

Los valores que se encontraron fuera del rango de resistividad mencionado entraron en otras clasificaciones (posibles acuicludos, acuitardos, acuífugos). Es importante resaltar que, al referirse a las formaciones hidrogeológicas como acuífero, acuitardo o acuicludo, no necesariamente deben estar saturadas, ya que solo indica la capacidad que tiene una formación geológica de almacenar aguas subterráneas. Las mismas se consideran saturadas a partir del nivel freático mencionado en cada sondeo. Sin embargo, en el caso de un Acuífugo, éste nunca tendrá capacidad para almacenar agua, a menos que sea una roca fracturada, cuyas fracturas se puedan saturar con agua.

- Sondeo eléctrico vertical SEV-01 y refracción sísmica R-01

El sondeo SEV-01 y la refracción R-01 se realizaron en el mismo lugar, hacia el centro-norte de la zona aluvional, específicamente en la hacienda Monterrey. Los pozos más cercanos son el P4 (Hacienda el Tanero) a 1.3 km al SE del SEV-01 y el P1 (Comunidad de Miranda) a 1.5 km al NE del SEV-01. Los valores obtenidos en cada método se observan en la tabla 6.8. Para la primera capa de resistividad se obtuvo un valor de 536 Ω .m para profundidades de hasta 0.5 m, lo que indica una posible saturación. Al ser un terreno utilizado para actividades agrícolas, se atribuye este poco espesor a una capa de cobertura vegetal con suelos arenosos y húmedos. Esta información se relaciona con los datos de pozo, ya que los más cercanos a la zona indican que el primer paquete geológico se encuentra constituido por una cobertura vegetal. Para el segundo cuerpo geológico detectado se obtuvo una resistividad de 125 Ω .m, lo cual sugiere la presencia de una formación hidrogeológica tipo acuífero semi-saturado, conformada posiblemente por presencia de arenas y gravas, entre 2.4 y 28 m de profundidad. Un tercer paquete geológico con una resistividad de 39.1 Ω .m, se asocia a un acuitardo con contenido litológico de arenas o gravas arcillosas.

Las velocidades de V_p para profundidades entre 3.6 y 13 m tienen un valor de 1534 m/s, por lo que se estima que el nivel freático se encuentre a 3.6 m aproximadamente. Sin embargo, se sugiere que el mejor cuerpo geológico potencialmente acuífero se ubica a partir de los 28 m de profundidad con resistividades de 97.9 Ω .m y con un

espesor desconocido. En la figura 6.22 se ilustra la columna de resistividades con sus formaciones hidrogeológicas sugeridas.

Al comparar la ubicación del sondeo SEV-01 con respecto al mapa de potencial acuífero (figura 6.2) se observa que éste se encuentra en una zona de alto potencial (color azul). Esto evidencia la presencia de arenas o gravas que conforma una formación acuífera. La contaminación por infiltración puede ser moderada, ya que no se tiene presencia de una formación totalmente impermeable que evite el paso de dichos contaminantes hacia los estratos inferiores, lo cual eventualmente puede permitir la infiltración de aguas contaminadas a la formación acuífera, esto se puede visualizar también en el mapa de conductancia longitudinal (figura 6.10) donde para este sondeo se obtuvo un valor de 0.673, que si bien se encuentra en el rango considerado como protegido, existe la posibilidad de contaminación a largo plazo.

Tabla 6.8 Tabla de resultados para el SEV/01 y R/01

Hacienda Monterrey								
Nº de capa	SEV-01			Caracterización hidrogeológica		R-01		
	(Ω .m)	h (m)	d (m)	Clasificación hidrogeológica propuesta	Clasificación litológica propuesta	Vp (m/s)	h (m)	d (m)
1	536	0.6	0.6	Cobertura vegetal	Cobertura vegetal	495	3.6	3.6
2	125	1.9	2.4	Acuífero	Arena o grava	1534	9.4	13.0
3	39.1	25.7	28.1	Acuitardo parcialmente saturado	Arena o grava arcillosa o limosa	1993		
4	97.9			Acuífero saturado	Arena o grava			
 Profundidad nivel freático								

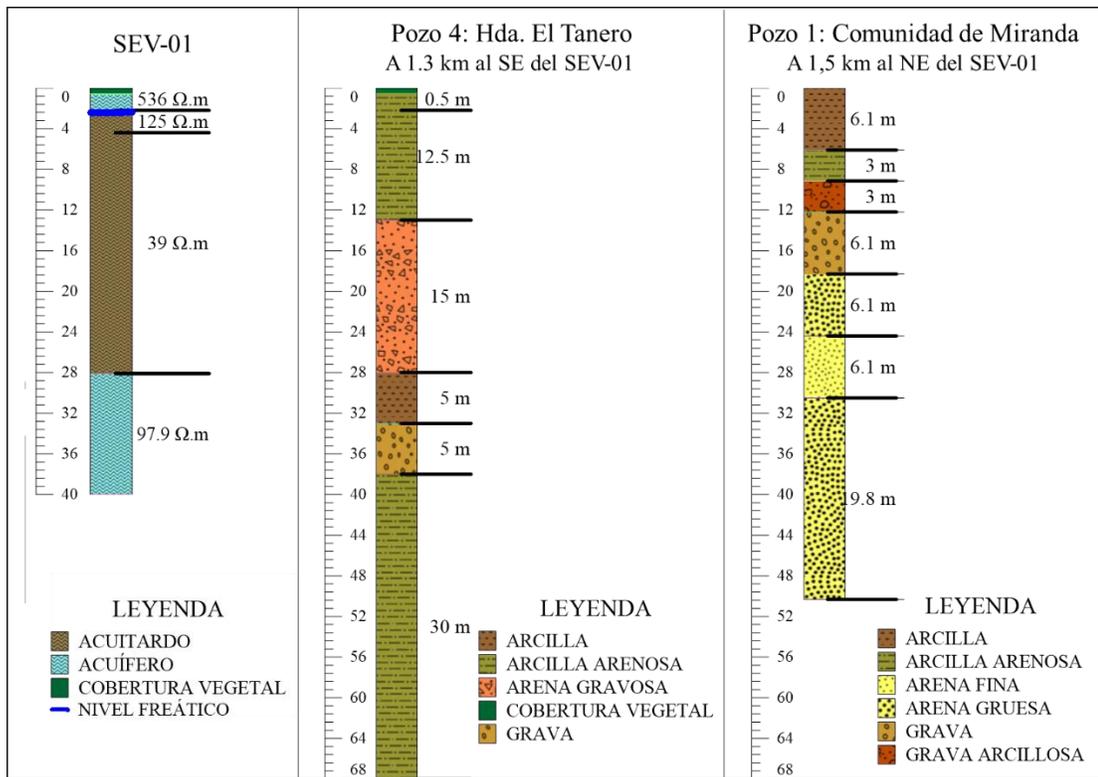


Figura 6.22 Clasificación hidrogeológica para SEV-01 e información geológica de pozos cercanos P1 y P4.

- Sondeo eléctrico vertical SEV-02 y refracción sísmica R-03

Hacia el noreste de la zona aluvional se encuentra ubicado el SEV-02 y la refracción sísmica R-03, específicamente en la agropecuaria San Miguel. Los resultados para cada método se observan en la tabla 6.9. Los pozos cercanos son el P5 (Las Clavelinas) a 1.4 km al SE de SEV-02 y el P1 (Comunidad de Miranda), a 1.5 km al SO del SEV-02.

Para la primera capa definida por las resistividades se obtuvieron valores de 65.8 a $\Omega.m$ hasta los 0.7 m de profundidad. Esta primera capa geoelectrica se relaciona con posible cobertura vegetal con elevada humedad. De 0.7 m a 1.5 m de profundidad se obtuvo una capa con un valor de 1305 $\Omega.m$. Este salto tan grande puede estar asociado a una posible presencia de litología poco porosa, la cual se clasificó como posible acuitardo. A partir de 1.7 m de profundidad se tienen valores de resistividad de 307 $\Omega.m$, se sugiere presencia de un acuífero saturado desde los 11 m hasta los 24.5 m, ya que a

partir de 11 m se tienen velocidades mayores a 1534 m/s, lo que indicaría un nivel freático a esta profundidad. A partir de 24.5 m hasta 42.5 m el valor de resistividad es de 56.7 Ω .m, la cual se estima esté asociada a una formación de acuífero saturado con contenido arcilloso. Por último, se obtuvo una resistividad de 148 Ω .m a partir de los 42.5 m de profundidad, por lo que se sugiere un posible acuífero saturado con un espesor aproximado mayor a 30 m, iniciando desde una profundidad de 11 m.

La figura 6.23 muestra la correlación del SEV-02 con la litología presente en los pozos más cercanos. Comparando el resultado obtenido con el mapa de potencial acuífero (figura 6.2) se observa que éste se encuentra en una zona de alto potencial (color azul) lo cual es lógico ya que se obtuvieron resultados óptimos con métodos eléctricos y sísmicos que señalan una posible presencia de un acuífero productor. De acuerdo a las resistividades obtenidas con métodos eléctricos, no se vio una respuesta para litologías (arcillas o limos) impermeables suprayacentes a las posibles formaciones potencialmente acuíferas, por lo se descarta la presencia de paquetes geológicos confinados, por lo que la protección contra contaminación es baja y relacionando con el mapa de conductancia longitudinal (figura 6.10), ya que se obtuvo un valor de 0.0862 siemens, siendo muy bajo para garantizar que los recursos hídricos no se encuentran contaminados por agentes superficiales.

Tabla 6.9 Tabla de resultados para el SEV-02 y R-03.

Agropecuaria San Miguel								
N° de capa	SEV-02			Caracterización hidrogeológica		R-03		
	(Ω .m)	h (m)	d base (m)	Clasificación hidrogeológica propuesta	Clasificación litológica propuesta	Vp (m/s)	h (m)	d base (m)
1	65.8	0.7	0.7	Cobertura vegetal	Capa vegetal	607	3.5	3.5
2	1305	0.8	1.5	Acuitardo	Material poroso	930	7.7	11.3
3	307	23	24.5	Acuífero parcialmente saturado	Arenas o grava	1534	12.4	23.7
4	56.7	18	42.5	Acuífero saturado	Arena o grava	1692		
5	148			Acuífero saturado	Arena o grava			
 Profundidad nivel freático								

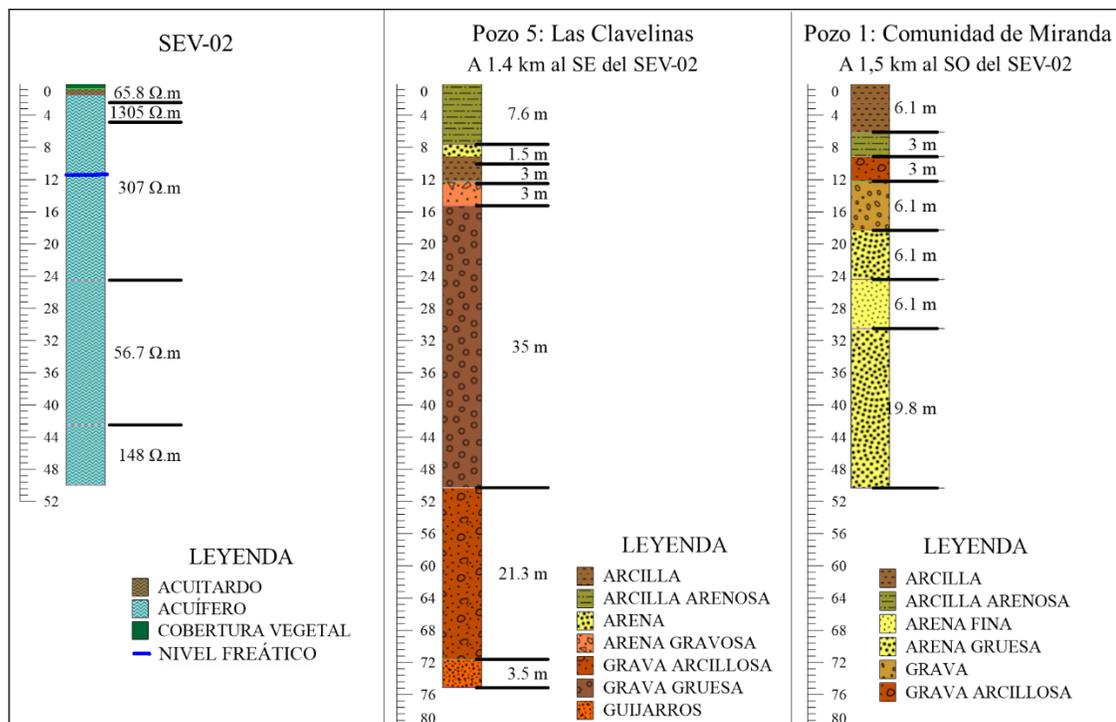


Figura 6.23 Clasificación hidrogeológica para SEV-02 e información geológica de pozos cercanos P1 y P5.

- Sondeo eléctrico vertical SEV-03 y refracción sísmica R-04

El sondeo SEV-03 se encuentra ubicado hacia la parte norte de la zona aluvial de la cuenca, muy cercano a la parte montañosa, en la urb. Diego Salazar. Los datos de pozos más cercanos, son el pozo P1 (Comunidad de Miranda) a 1 km hacia el noreste de SEV-03 y el pozo P4 (Hacienda el Tanero) a 800 m hacia el sureste de SEV-03. Los resultados obtenidos en cada método se encuentran en la tabla 6.10. Se observa una velocidad de 1990 m/s a partir de los 18.3 m, por lo que se sugiere que el nivel freático se encuentra a partir de esta profundidad. Por otra parte, se obtuvo una resistividad de 563 $\Omega.m$ para una profundidad hasta 4.9 m, asociándose con posible formación poco porosa no saturada. Seguidamente, se obtuvo un valor de 70 $\Omega.m$ para la segunda capa resistiva que va desde 4.9 m de profundidad hasta 19.95 m, perteneciendo a una formación acuífera saturada a partir de los 18 m de profundidad. Seguidamente, se encuentran resistividades de 19.7 $\Omega.m$ hasta los 50 m aproximadamente. Esta clasificación corresponde a un posible acuícludo, ya que posee

resistividades muy bajas, normalmente se relacionan con presencia de arcillas y limos, que pueden estar saturadas más no permiten la transmisión de agua. Por último, se observa un posible acuitardo saturado a partir de los 50 m con una resistividad de 534 Ω .m. En la figura 6.24 se ilustra la disposición de las capas hidrogeológicas.

El mapa de potencial acuífero (figura 6.2) señala a esta como una zona de muy bajo a un nulo potencial acuífero, concordando con los resultados obtenidos por medio de sísmicos y eléctricos, ya que no se obtuvieron capas óptimas para la prospección de agua subterránea. Esto se debe principalmente a que el sondeo fue realizado cerca de un afloramiento del Complejo Nirgua, lo que indica poco espesor y condiciones no favorables para encontrar un acuífero productor.

Tabla 6.10 Tabla de resultados para el SEV-03 y R-04.

Sector la Gripta (urb. Diego Salazar)								
N° de capa	SEV-03			Caracterización hidrogeológica		R-04		
	(Ω .m)	h (m)	d (m)	Clasificación hidrogeológica propuesta	Clasificación litológica propuesta	Vp (m/s)	h (m)	d (m)
1	563	4.9	4.9	Acuitardo	Cobertura vegetal	498	4.6	4.6
2	70	15.1	20.0	Acuífero	Arena o grava	1036	13.7	18.3
3	19.7	30.2	50.2	Acuicludo	Arcilla o limo	1990		
4	534			Acuitardo	Material no poroso y/o saturado			

 Profundidad nivel freático

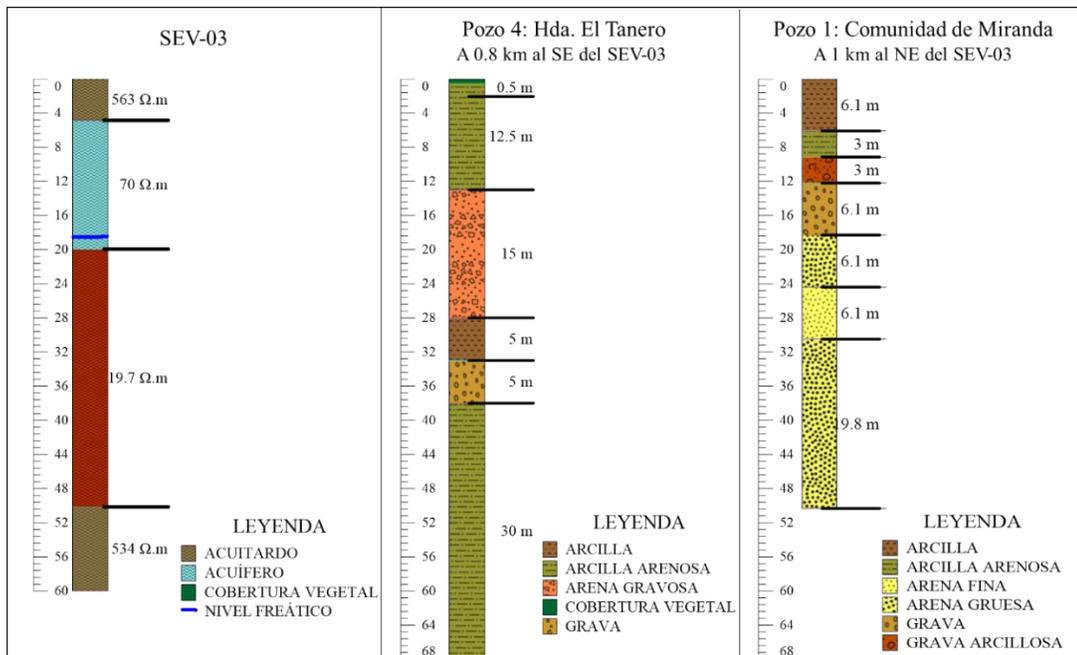


Figura 6.24 Clasificación hidrogeológica para SEV-03 e información geológica de pozos cercanos P1 y P4.

- Sondeo eléctrico vertical SEV-04 y refracción sísmica R-05

Los sondeos SEV-04 y R-05 se realizaron hacia el sureste de la zona aluvional, en la urb. San Roque, los resultados para cada método se visualizan en la tabla 6.11. El pozo más cercano al sondeo se encuentra a 1.2 km hacia el noreste (pozo P6). Con la refracción sísmica R-05 se pudo identificar presencia de nivel freático a 12.7 m de profundidad con una velocidad de 1852 m/s. Para la primera capa resistiva registrada con el SEV se obtuvo un valor de 53.9 Ω .m hasta los 2.5 m de profundidad, que corresponde a una posible formación acuífera no saturada, debido al poco espesor y a la cercanía a la superficie. Luego se tienen resistividades de 21.9 Ω .m hasta los 12.7 m de profundidad, probablemente asociado a un acuitardo, con contenido de limo y arcillas mezcladas con arenas o gravas no saturadas. A partir de los 12 m de profundidad se encontraron resistividades de 80.5 Ω .m y velocidades de 1852 m/s óptimas para formaciones potencialmente acuíferas. Se observa en un valor de resistividad de 20.4 Ω .m a profundidades de 44 m, lo cual podría deberse a una capa de arenas o gravas con un alto porcentaje de arcillas o limos correspondiendo a una

formación hidrogeológica tipo acuitardo. Posterior a los 44 m de profundidad se tienen resistividades de 172 Ω .m, la cual califica como óptima para acuíferos y debido a la profundidad, se sugiere presencia de agua en esta formación.

Al correlacionar estos resultados con los obtenidos por medio del mapa de potencial acuífero (figura 6.2) se confirma que éste se encuentra entre una zona de alto potencial (azul) y muy alto potencial (verde). Se observa respuestas asociadas a formaciones semi-impermeables hasta 44 m de profundidad, lo cual podría evitar en parte la contaminación hídrica de los estratos inferiores que se encuentren saturados. El mapa de conductancia longitudinal (figura 6.10) indica un valor de 1.607 siemens, que, le confieren una protección elevada contra contaminantes de las capas permeables que se encuentren saturadas de agua.

Tabla 6.11 Tabla de resultados para el SEV-04 y R-05.

Urbanización San Roque								
N° de capa	SEV-04			Caracterización hidrogeológica		R-05		
	(Ω .m)	h (m)	d (m)	Clasificación hidrogeológica propuesta	Clasificación litológica propuesta	Vp (m/s)	h (m)	d (m)
1	53.9	2.5	2.5	Acuífero	Cobertura vegetal	520	3.5	3.5
2	21.9	10.2	12.7	Acuitardo	Arena o grava arcillosa o limosa	1229	9.2	12.7
3	80.5	12.0	24.7	Acuífero saturado	Arena o grava	1852	15.7	28.4
4	20.4	19.3	44.0	Acuitardo saturado	Arena o grava arcillosa o limosa	2013		
5	172			Acuífero saturado	Arena o grava			

 Profundidad nivel freático

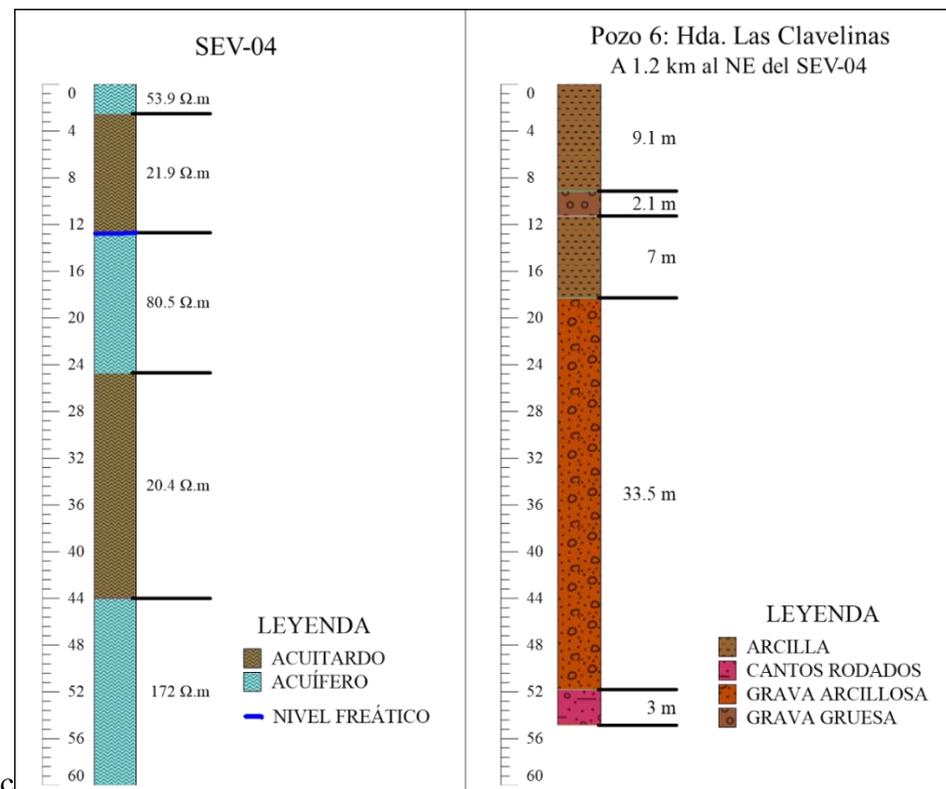


Figura 6.25 Clasificación hidrogeológica para SEV-04 e información geológica de pozos cercanos P6.

- Sondeo eléctrico vertical SEV-05 y refracción sísmica R-06

El sondeo SEV-05 se encuentra ubicado hacia la parte noroeste de la zona aluvional de la cuenca, específicamente en Sabana Arriba. Se encuentran dos pozos cercanos, con los cuales se pudo correlacionar la información litológica, el pozo P2 (Asent. La Trinidad) ubicado a 350 m al este del SEV-05 y el pozo P3 (Hato Viejo) a una distancia de 500 m al noroeste del SEV-05. Los resultados para cada método se muestran en la tabla 6.12. Se pudo identificar el nivel freático en esta zona a 19 m de profundidad debido al registro de velocidades de V_p de 1546 m/s a partir de esta profundidad. Por otra parte, se encontraron valores de resistividad de 28.4 $\Omega.m$ con un espesor de 0.5 m, correspondiendo a una posible cobertura vegetal. Luego, se obtuvo una resistividad de 365 $\Omega.m$ desde 0.5 a 1.4 m de profundidad. Este valor se puede atribuir a una posible formación acuífera no saturada conformada por arenas o gravas. Seguidamente, se obtuvo un valor de 14.9 $\Omega.m$ que corresponde probablemente a un acuífudo,

conformado principalmente por arcillas o limos, pudiendo ser una capa confinante para el posible acuífero. El sondeo presenta valores de resistividades favorables para la posible presencia de un acuífero con resistividad 54.2 Ω .m, cuya profundidad esta entre 3.71 m a 62.8 m, con una saturación a partir de 19 m. En la zona, se pueden encontrar capas de arcillas mezcladas con limos, arenas y gravas hasta 20 m de profundidad aproximadamente. Luego, se encuentran capas de arenas mezcladas con capas de arcillas. Se estima que la profundidad de sedimentos es hasta los 80 m.

En la figura 6.26 se muestran los resultados obtenidos por los sondeos eléctricos y sísmicos y su correlación con pozos cercanos. La figura 6.2 (mapa de potencial acuífero) señala esta zona con muy alto potencial acuífero, este sondeo es cercano al SEV-10, que presenta condiciones similares al SEV-05. Comparando el mapa de potencial acuífero con los resultados obtenidos en el SEV-05 se estima que si puede existir un buen acuífero productor. Además, se observa presencia de una capa de limo o arcilla que se encuentra somera a la superficie, sirviendo como un sello del acuífero a la contaminación. El mapa de conductancia longitudinal (figura 6.10) en esta zona presenta un valor de 1.266 siemens, lo que señala una alta protección de la formación a contaminantes superficiales.

Tabla 6.12 Tabla de resultados para el SEV-05 y R-06.

Sabana de Arriba - La Podenca								
N° de capa	SEV-05			Characterization hydrogeological		R-06		
	(Ω .m)	h (m)	d (m)	Clasificación hidrogeológica propuesta	Clasificación litológica propuesta	Vp (m/s)	h (m)	d (m)
1	28.4	0.5	0.5	Cobertura vegetal	Cobertura vegetal	372	2.5	2.5
2	365	0.9	1.4	Acuífero	Arena o grava	936	6	8.5
3	14.9	2.4	3.7	Acuicludo	Arcilla o limo	1352	10.6	19.1
4	54.2	59.0	62.8	Acuífero parcialmente saturado	Arena o grava	1546		
5	102			Acuífero saturado	Arena o grava			
 Profundidad nivel freático								

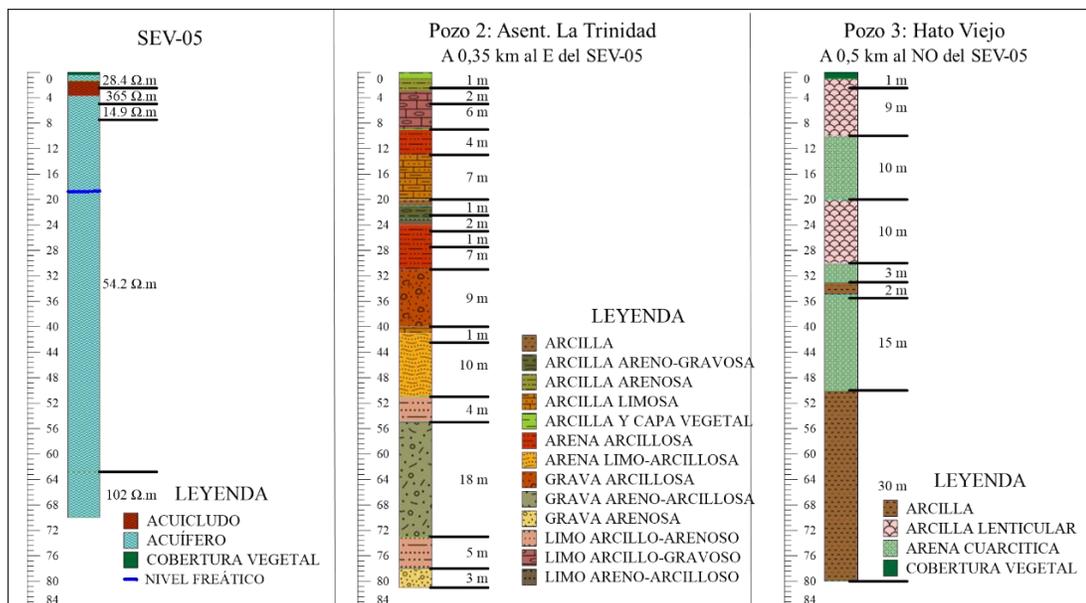


Figura 6.26 Clasificación hidrogeológica para SEV-05 e información geológica de pozos cercanos P2 y P3.

- Sondeo eléctrico vertical SEV-06 y refracción sísmica R-07

El sondeo SEV-06 se realizó en la zona de la Urb. San Roque, el cual se encuentra hacia el sureste de la zona aluvional de la subcuenca y a 800 m oeste del SEV-04. El pozo más cercano se encuentra a 1.3 km hacia el noroeste (pozo P4). En la tabla 6.13 se muestran los resultados para cada método. La primera capa captada por el sondeo eléctrico vertical tiene una resistividad de 22.5 Ω .m y un espesor de 0.3 m. Debido a las características que presenta, se puede relacionar con presencia de una cobertura vegetal. Luego, se obtuvieron valores de resistividad de 285 Ω .m que van desde 0.3 m hasta 7.7 m de profundidad. A partir de 7.7 m hasta 52.8 m se encuentran resistividades de 44 Ω .m. Por último, se observa una resistividad de 103 Ω .m, que se relaciona con presencia de posible acuífero saturado. Además, se obtuvieron valores de velocidad $V_p = 1809$ m/s a partir de 20.4 m de profundidad, que corresponden con velocidades de sedimentos saturados, por lo que se infiere que el nivel freático se encuentre esta profundidad.

Al comparar la ubicación del SEV-06 (figura 6.27) y el pozo más cercano con el mapa de potencial acuífero (figura 6.2), se observa que éste sondeo se encuentra localizado

en una zona de muy alto potencial acuífero, en la cual se determinó la presencia de formaciones hidrogeológicas con buen potencial prospectivo. Para este sondeo se determinó una conductancia longitudinal de 1.064 siemens, lo que señala una alta protección a la contaminación (figura 6.10).

Tabla 6.13 Tabla de resultados para el SEV-06 y R-07.

Urb. San Roque								
N° de capa	SEV-06			Caracterización hidrogeológica		R-07		
	(Ω .m)	h (m)	d (m)	Clasificación hidrogeológica propuesta	Clasificación litológica propuesta	Vp (m/s)	h (m)	d (m)
1	22.5	0.3	0.3	Cobertura vegetal	Cobertura vegetal	506	3.8	3.8
2	285	7.4	7.7	Acuífero	Arena o grava	1320	16.6	20.4
3	44	45.1	52.8	Acuitardo parcialmente saturado	Arena o grava arcillosa o limosa	1809		
4	103			Acuífero saturado	Arena o grava			

 Profundidad nivel freático

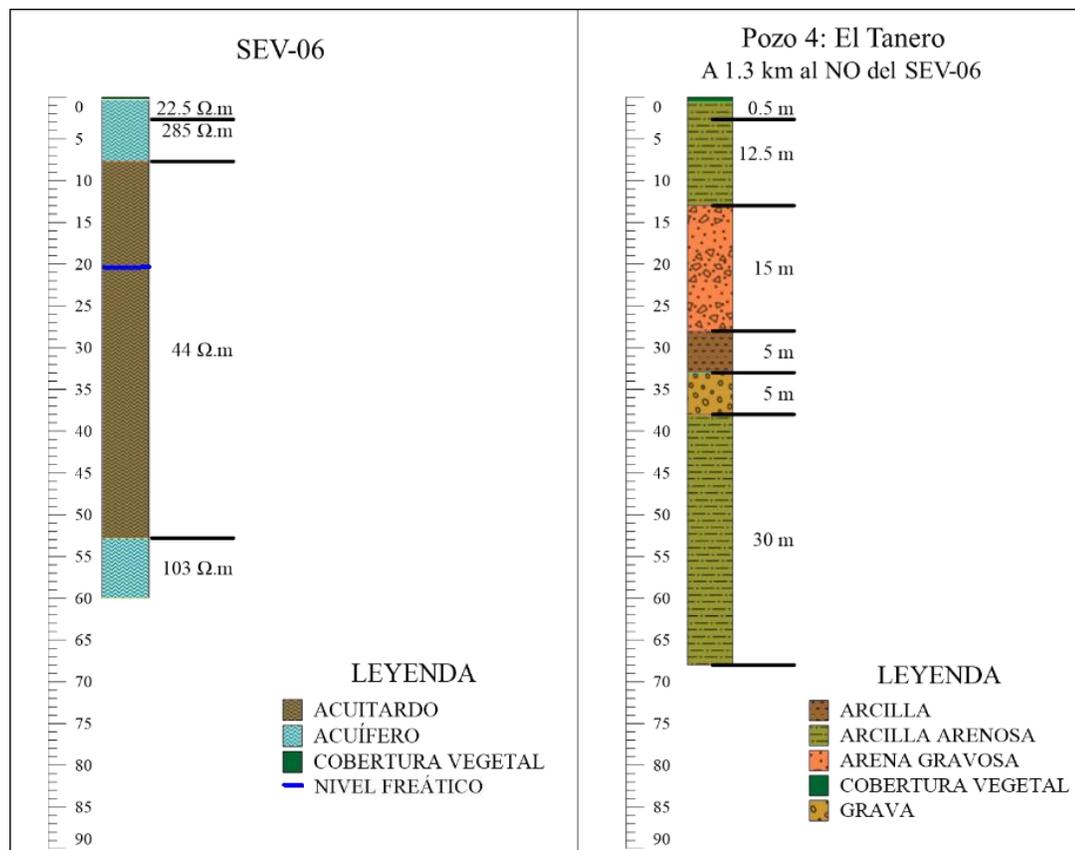


Figura 6.27 Clasificación hidrogeológica para SEV-06 e información geológica de pozos cercanos P4.

- Sondeo eléctrico vertical SEV-07 y refracción sísmica R-08

El sondeo SEV-07 se llevó a cabo en la Finca El Milagro, ubicado hacia la parte noreste de la zona aluvional de la cuenca. El pozo que abastece la finca presenta un caudal de 15 lts/s con un nivel de bombeo de 35 m de profundidad y se encuentra a 900 m al SE del SEV-07. La litología del pozo muestra presencia de grava desde los 5.5 m hasta 90 m, encontrándose basamento a partir de esta profundidad. Los valores de resistividad y velocidades obtenidos para cada método geofísico se visualizan en la tabla 6.14. Inicialmente, se obtuvieron velocidades de 1761 m/s desde 2.35 m a 8.45 m de profundidad indicando que a partir de 2.35 m de profundidad se puede encontrar el nivel freático.

Se obtuvieron valores de resistividad de 163 $\Omega.m$ a profundidades de 0 m a 1.3 m, pudiendo relacionarse con la presencia de una cobertura vegetal. Desde 1.3 m a 2.7 m

la resistividad obtenida fue de 383 Ω .m clasificándose como una formación acuífera no saturada, luego de 2.7 m hasta 14.4 m la resistividad es de 488 Ω .m, encontrándose en el rango de valores para acuíferos saturados. Luego de 14.4 m se obtuvo una resistividad de 56.7 Ω .m que corresponde a un posible acuífero saturado conformado por litologías tipo arenas y gravas con un espesor de 17.5 m. Posteriormente, se obtuvo un valor de 1217 Ω .m que puede estar asociada a la presencia de un acuitardo. En general, se observa la presencia de una formación potencialmente acuífera a partir de 2.4 m de profundidad con un espesor mayor a 29 m. La figura 6.28 ilustra los resultados obtenidos por medio de la integración de métodos eléctricos y sísmicos en conjunto con la litología de los pozos cercanos.

El mapa de potencial acuífero (figura 6.2) indica que para esta zona se puede encontrar una alta probabilidad de acumulación de agua subterránea. No se obtuvieron valores de resistividad que pudiera relacionarse a la presencia de acuícludos (arcillas, limos), tal como se observa en el mapa de conductancia longitudinal de la figura 6.10, por lo que estas aguas carecen de protección ante la infiltración de agentes contaminantes externos.

Tabla 6.14 Tabla de resultados para el SEV-07 y R-08.

Finca el Milagro (empresa Pardo Suizo)								
N° de capa	SEV-07			Caracterización hidrogeológica		R-08		
	(Ω .m)	h (m)	d (m)	Clasificación hidrogeológica propuesta	Clasificación litológica propuesta	Vp (m/s)	h (m)	d (m)
1	163	1.3	1.3	Cobertura vegetal	Cobertura vegetal	537	2.4	2.4
2	383	1.3	2.7	Acuífero	Arena o grava	1761	6.1	8.5
3	488	11.7	14.4	Acuífero parcialmente saturado	Arena o grava	1905	11	19.5
4	56.7	17.5	31.9	Acuífero saturado	Arena o grava	2015		
5	1217			Acuitardo saturado	Material poco poroso			
 Profundidad nivel freático								

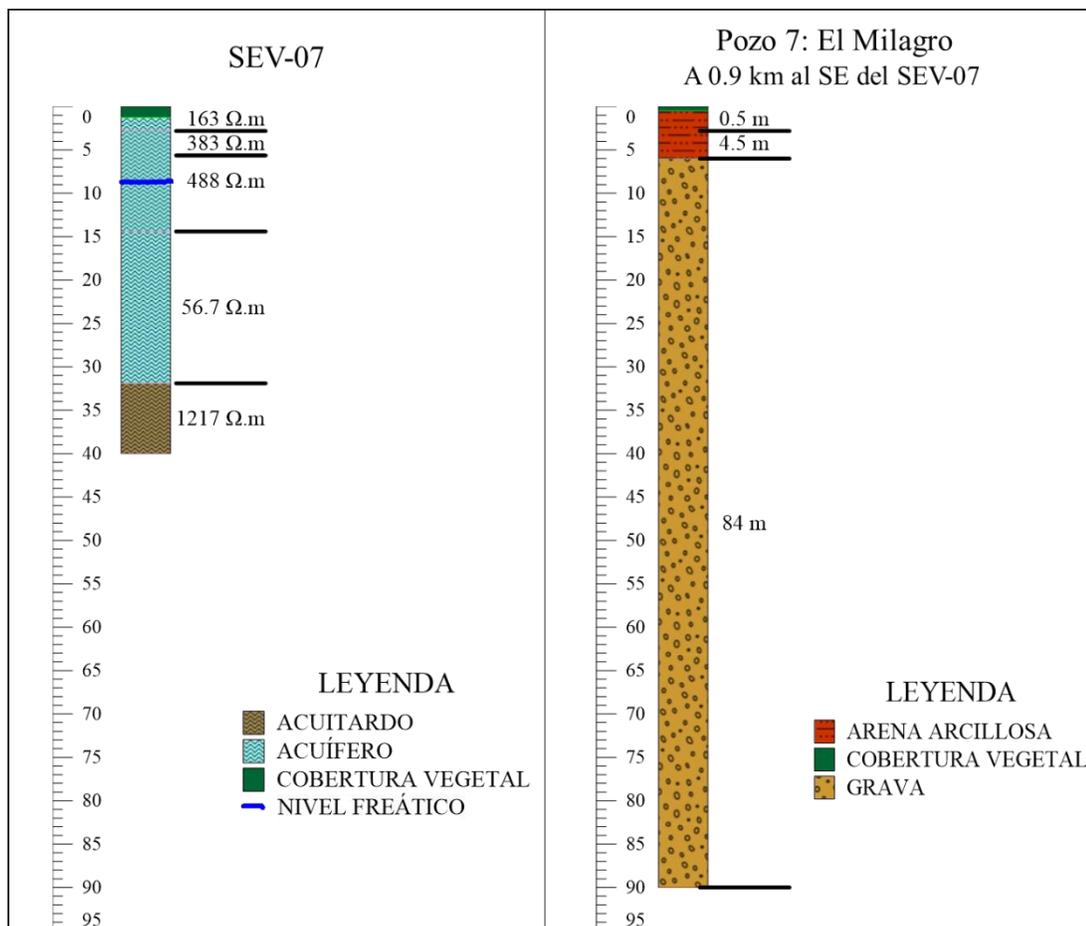


Figura 6.28 Clasificación hidrogeológica para SEV-07 e información geológica de pozos cercanos P7.

- Sondeo eléctrico vertical SEV-08 y refracción sísmica R-09

El SEV-08 se encuentra ubicado en la Finca El Milagro, a 600 m del SEV-07. La tabla 6.15 muestra los valores obtenidos de resistividad y velocidad. El pozo más cercano es el P7 a 500 m al este del SEV-08. Se obtuvo una velocidad de onda P de 1549 m/s a 9.8 m de profundidad, que se relaciona con presencia de agua a partir de este nivel. El sondeo dio como resultado una primera resistividad de 23.3 Ω .m que llega hasta una profundidad de 0.3 m. Esta capa está clasificada hidrogeológicamente como acuitardo, conformada posiblemente por una cobertura vegetal. Luego, se presentan valores de resistividad de 175 Ω .m a profundidades de 0.3 m a 6.3 m, identificándose como una posible formación acuífera no saturada. Luego, desde 6.3 m hasta 31.9 m se obtuvo un valor de 51.7 Ω .m, pudiendo catalogarse como un acuífero. Luego, a partir de una

profundidad de 31.9 m se obtuvo una resistividad de 59 Ω .m que se asocia a una posible formación potencialmente acuífera que se encuentra saturada a partir de 9.8 m y con un espesor aproximado mayor de 22 m.

Los valores para el SEV-07 y el SEV-08 son similares, debido a la cercanía de los sondeos y a que ambos comparten condiciones similares de terreno. Se puede inferir la presencia de agua subterránea a partir de los 10 m aproximadamente, ya que a partir de esta profundidad se encuentra el nivel freático. La figura 6.29 muestra los resultados obtenidos y su correlación con información litológica del pozo cercano.

El mapa de potencial acuífero (figura 6.2) indica que para esta zona existe un alto (azul) a muy alto potencial (verde), ya que se obtuvieron valores de resistividad que sugieren la acumulación de agua subterránea. Sin embargo, este posible acuífero estaría propenso a ser afectado por agentes contaminantes externos al no observarse formaciones tipo acuícludo a niveles someros que le sirvan de protección. El mapa de conductancia longitudinal (figura 6.10) refleja un valor de 0.542 para este sondeo, lo que representa una protección aceptable para la formación acuífera.

Tabla 6.15 Tabla de resultados para el SEV-08 y R-09

Finca el Milagro (empresa Pardo Suizo)								
Nº de capa	SEV-08			Caracterización hidrogeológica		R-09		
	(Ω .m)	h (m)	d (m)	Clasificación hidrogeológica propuesta	Clasificación litológica propuesta	Vp (m/s)	h (m)	d (m)
1	23.3	0.3	0.3	Acuitardo	Cobertura vegetal	538	3.0	3.0
2	175	6	6.3	Acuífero	Arena o grava	1229	6.8	9.8
3	51.7	25.6	31.9	Acuífero parcialmente saturado	Arena o grava	1549	11.4	21.2
4	59			Acuífero saturado	Arena o grava	1803		
 Profundidad nivel freático								

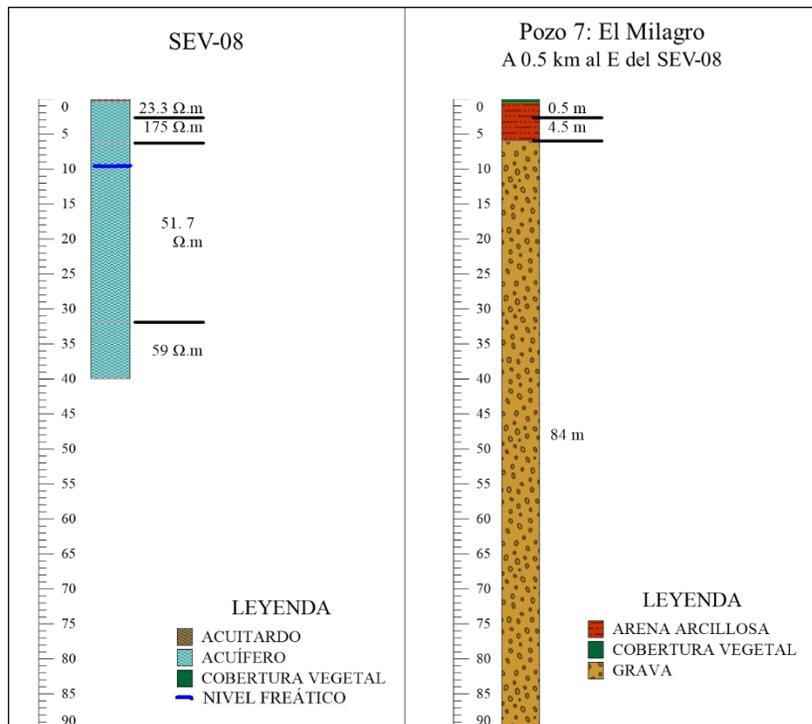


Figura 6.29 Clasificación hidrogeológica para SEV-08 e información geológica de pozos cercanos P7.

- Sondeo eléctrico vertical SEV-09 y refracción sísmica R-10

El SEV-09 se encuentra a 500 m hacia el sur del SEV-08, en los espacios de Agrícola Las Clavelinas. La cual posee dos pozos dentro de sus predios, el pozo P5 (Las Clavelinas) a 400 m hacia el NO de SEV-09 y el pozo P6 (Hda. Las Clavelinas) a 500 m al O de SEV-09. Los datos de resistividades y velocidades se muestran en la tabla 6.16 y los resultados obtenidos en conjunto con los datos de pozo se ilustran en la figura 6.30. Se obtuvieron valores de velocidad de $V_p = 1591$ m/s desde los 9.8 m hasta los 22.5 m de profundidad, lo cual indica que las formaciones pueden estar saturadas de agua a partir de 9.8 m.

De acuerdo a los datos de pozos se pueden encontrar capas de arena y grava a partir de las 9 m, alternadas con capas de arcillas. Se estima que la profundidad de sedimentos es de 90 m. La primera capa geoelectrica presenta un espesor de 0.4 m y una resistividad de $11.3 \Omega.m$, lo que podría asociarse a una fina cobertura de arcillas o limos, que se comportaría como un acuícludo. Seguidamente, se tiene una capa delgada de $300 \Omega.m$ con un espesor de 0.8 m a una profundidad de 1.2 m, lo que sugiere la

presencia de una formación tipo acuífero no saturada o una posible capa conformada por cobertura vegetal. Luego se tiene una resistividad de 4.1 Ω .m con un espesor de 0.7 m y alcanza 1.9 m de profundidad, lo que puede relacionarse con un acuicludo compuesto por arcillas o limos no saturados.

El valor de resistividad del posible acuífero es de 81.4 Ω .m, que va desde 1.9 m hasta los 40.9 m de profundidad y se encuentra saturado a partir de 10 m de profundidad. Por último, se encuentra una capa con resistividad de 850 Ω .m, asociada a material parcialmente saturado, posiblemente conformado por arenas o gravas.

De acuerdo al mapa de potencial acuífero (figura 6.2) el sondeo SEV-09 se ubica en una zona de muy alto potencial acuífero, sugiriendo posibilidad de encontrar un acuífero saturado a partir de 10 m de profundidad. Con respecto al mapa de conductancia longitudinal (figura 6.10) se observa que este sondeo presenta muy poca protección ante la posible infiltración de agentes contaminantes externos, ya que presentó un valor de 0.307 siemens, encontrándose por debajo del rango aceptable, por lo que es más susceptible a contaminarse.

Tabla 6.16 Tabla de resultados para el SEV-09 y R-10.

Agrícola Las Clavelinas								
N° de capa	SEV-09			Caracterización hidrogeológica		R-10		
	(Ω .m)	h (m)	d (m)	Clasificación hidrogeológica propuesta	Clasificación litológica propuesta	Vp (m/s)	h (m)	d (m)
1	11.3	0.4	0.4	Acuicludo	Arcilla o limo	522	2.6	2.6
2	300	0.8	1.2	Acuífero	Arena o grava	1219	7.2	9.8
3	4.1	0.7	1.9	Acuicludo	Arcilla o limo	1591	12.7	22.5
4	81.4	39	40.9	Acuífero parcialmente saturado	Arena o grava	1753		
5	850			Acuitardo saturado	Material poroso			

	Profundidad nivel freático
---	----------------------------

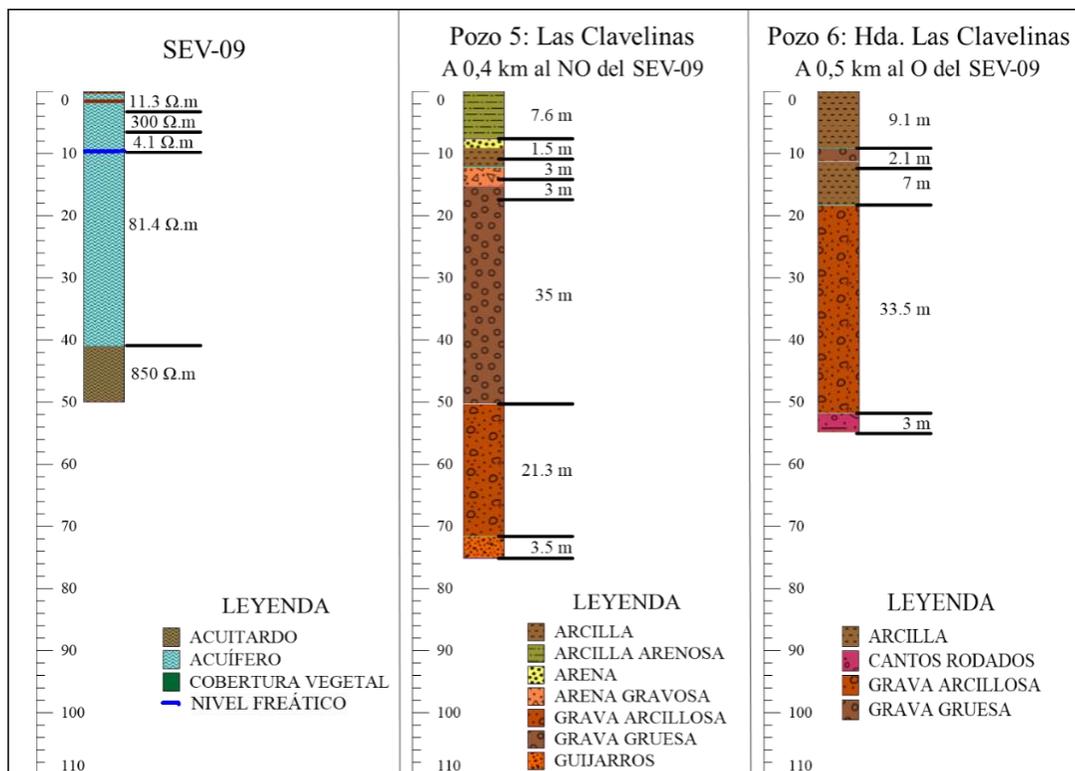


Figura 6.30 Clasificación hidrogeológica para SEV-09 e información geológica de pozos cercanos P5 y P6.

- Sondeo eléctrico vertical SEV-10 y refracción sísmica R-11

El SEV-10 se ubica en la urb. La Guaruga, hacia el noroeste de la subcuenca, y a 700 m al suroeste del SEV-05. El pozo más cercano es el P2 (Asent. La Trinidad) a 700 m hacia el noreste de SEV-10. Las velocidades obtenidas se encuentran en un rango de 1514 m/s hasta 1763 m/s desde 10 m a 24 m de profundidad, indicando un posible nivel freático a 10 m de profundidad. Los resultados obtenidos de resistividad y velocidad se muestran en la tabla 6.17.

Para la primera capa resistiva se obtuvo un valor de 72.9 Ω .m con un espesor de 1.3 m, la cual se relaciona con presencia de cobertura vegetal. De 1.3 m a 3.4 m de profundidad se obtuvo una respuesta de 19 Ω .m, que según la clasificación hidrogeológica se asocia a una formación tipo acuícludo no saturada, conformada litológicamente por arcillas o limos. Seguido de esta capa, se obtuvo una resistividad de 570 Ω .m que abarca desde 3.4 m hasta 10.3 m, siendo una posible formación tipo

acuitardo no saturada, conformada por material poco poroso. Luego, se obtuvo una resistividad de 10.8 Ω .m que corresponde a un posible acuicludo, el cual alcanza una profundidad de 23.9 m. De 23.9 m a 40.3 m se observa una capa con una alta resistividad de 2524 Ω .m, que se relaciona con una formación poco porosa.

El posible paquete geológico potencialmente acuífero saturado de agua, se encuentra a partir de una profundidad de 40 m con una resistividad de 61.1 Ω .m. En la figura 6.31 se muestra una ilustración con los resultados de la integración de datos geoelectricos y sísmicos en conjunto con la relación de pozos cercanos. Esta zona presenta según el mapa de la figura 6.2 un muy alto potencial acuífero (color verde). Este posible acuífero saturado se encuentra a profundidades mayores a 40 m, lo que implicaría una alta protección a la contaminación, como se observa en el mapa de conductancia longitudinal (figura 6.10) con un valor de 1.405 siemens.

Tabla 6.17 Tabla de resultados para el SEV-10 y R-11.

Urb. La Guaruga								
N° de capa	SEV-10			Caracterización hidrogeológica		R-11		
	(Ω .m)	h (m)	d (m)	Clasificación hidrogeológica propuesta	Clasificación litológica propuesta	Vp (m/s)	h (m)	d (m)
1	72.9	1.3	1.3	Cobertura vegetal	Cobertura vegetal	475	2.4	2.4
2	19	2.1	3.4	Acuicludo	Arcilla o limo	1016	7.7	10.1
3	570	6.9	10.3	Acuitardo	Material poroso	1514	13.9	24.0
4	10.8	13.6	23.9	Acuicludo	Arcilla o limo	1763		
5	2524	16.4	40.3	Acuitardo saturado	Material poroso			
6	61.1			Acuífero saturado	Arena o grava saturada			
 Profundidad nivel freático								

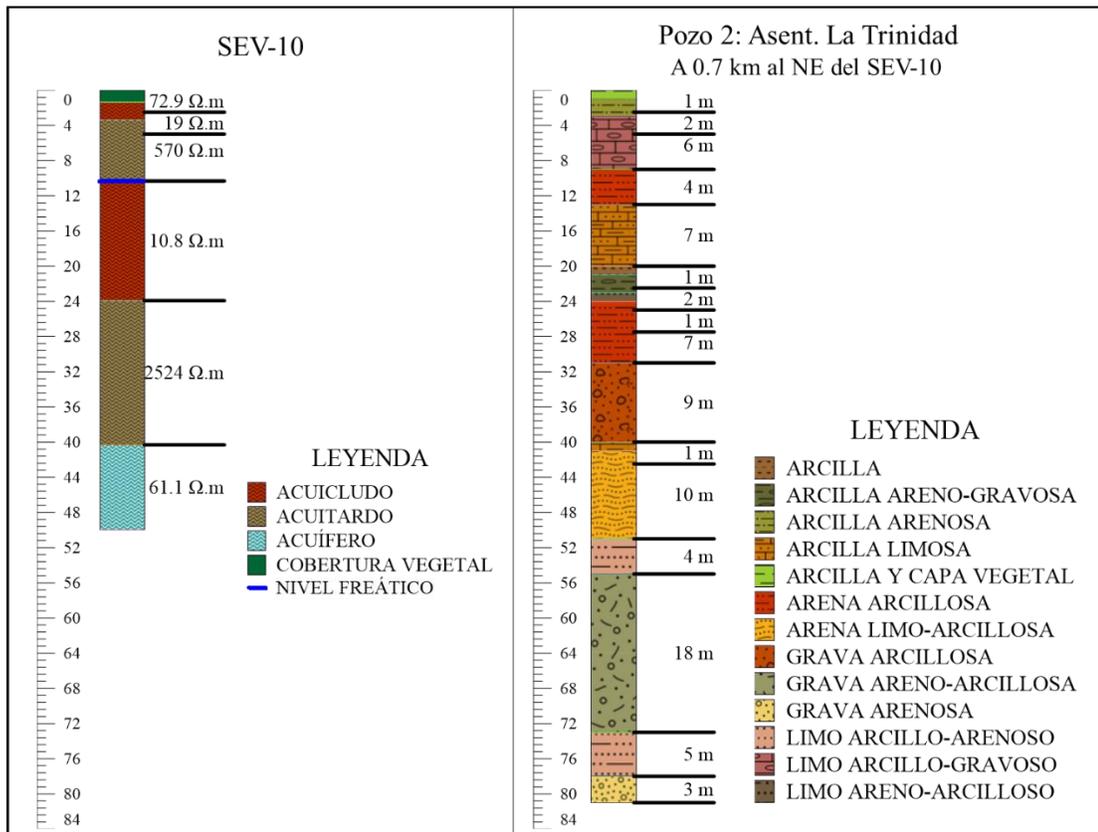


Figura 6.31 Clasificación hidrogeológica para SEV-10 e información geológica de pozos cercanos P2.

- Sondeo eléctrico vertical SEV-11 y refracción sísmica R-12

El sondeo SEV-11 y refracción R-12 se ubican en el lado noreste de la zona aluvial, en la finca el Milagro, cercano a los sondeos SEV-02 (1.4 km al suroeste) y SEV-07 y SEV-08 (1.5 km al sur, aproximadamente). La finca tiene pozo propio (P7 El Milagro), que suministra recursos hídricos con una extracción de 15 lts/s con un nivel de bombeo de 35 m de profundidad. La litología del pozo muestra presencia de grava desde los 5.5 m hasta 80 m. Este pozo se encuentra a una distancia aproximada de 1.5 km del sondeo. Para la refracción sísmica R-12 se obtuvieron velocidades de onda P de 1829 m/s a partir de 11.8 m de profundidad, indicando la presencia del nivel freático. Por otra parte, se obtuvieron resistividades de 15.2 $\Omega.m$ en los primeros 0.2 m, esta respuesta puede deberse a presencia de arcilla o limo, por lo que se le asocia a un acuicludo. Luego se obtuvieron valores de 166 $\Omega.m$ hasta 16 m de profundidad, atribuyéndose

esta respuesta a un posible acuífero con saturación a partir de los 11.8 m conformado por arenas o gravas. Seguidamente, se encuentra una formación con respuesta tipo acuicludo de 15.2 Ω .m que se asocia a arcillas o limos saturados, pero al contener este tipo de material no permite extracción de agua. Luego, se obtuvo para la cuarta capa una resistividad bastante alta de 4057 Ω .m que puede ser causada por una formación muy poco porosa, asociada a un acuitardo. Finalmente, a partir de los 54 m de profundidad se observa una de 4.1 Ω .m, asociada a un acuicludo.

Los resultados de la integración de datos geoelectrónicos y sísmicos con la información de pozos se muestran en la figura 6.32. Al correlacionar éstos con el mapa de potencial acuífero de la figura 6.2 se observa correspondencia con una zona de muy alto potencial, lo que contradice los resultados obtenidos con los sondeos eléctricos y sísmicos, ya que no se determinaron capas con características óptimas para encontrar acuíferos de calidad.

Tabla 6.18 Tabla de resultados para el SEV-11 y R-12.

Finca el Milagro (Empresa Pardo Suizo)								
Nº de capa	SEV-11			Caracterización hidrogeológica		R-12		
	(Ω .m)	h (m)	d (m)	Clasificación hidrogeológica propuesta	Clasificación litológica propuesta	Vp (m/s)	h (m)	d (m)
1	15.2	0.2	0.2	Acuicludo	Cobertura vegetal	489	3.5	3.5
2	166	15.7	15.9	Acuífero	Arena o grava	1112	8.3	11.8
3	19.3	15.2	31.1	Acuicludo	Arcilla o limo	1829	13.4	25.2
4	4057	22.9	54.0	Acuitardo	Material poco poroso	2058		
5	4.1			Acuicludo	Arcilla o limo			

	Profundidad nivel freático
---	----------------------------

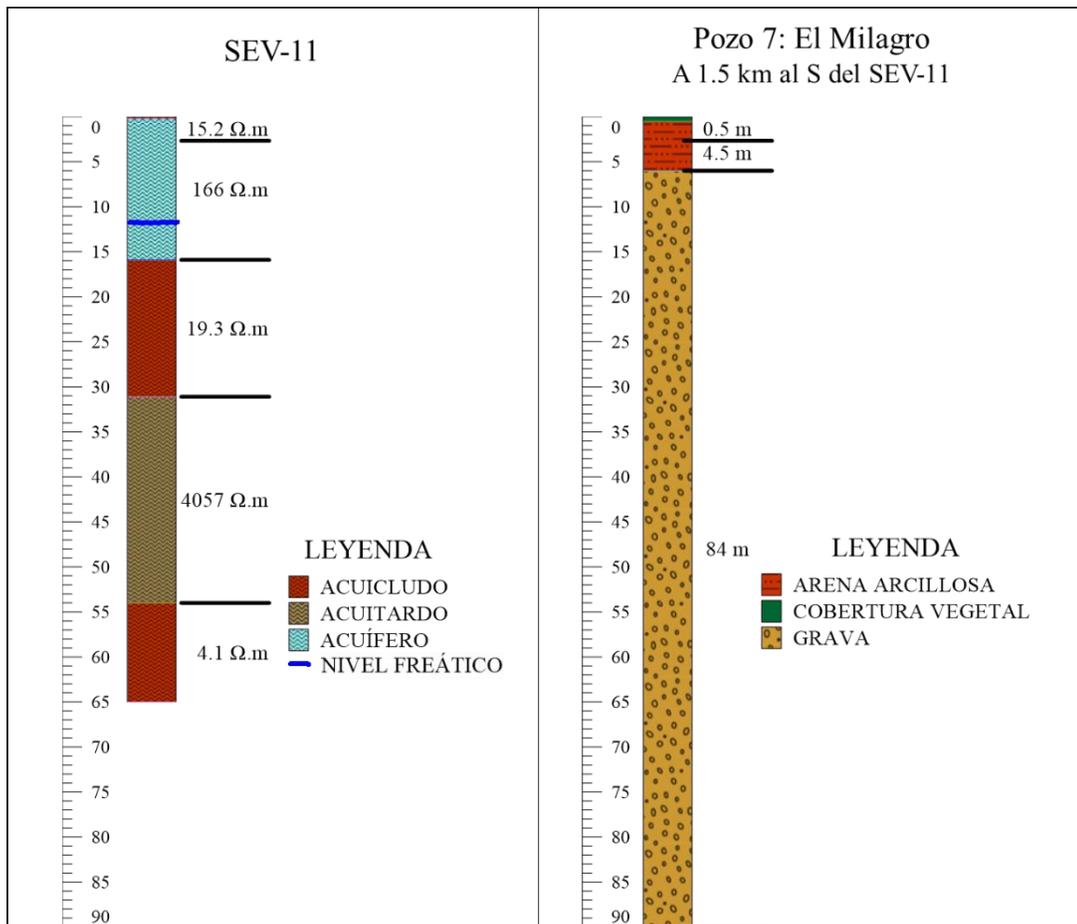


Figura 6.32 Clasificación hidrogeológica para SEV-11 e información geológica de pozos cercanos P7.

- Sondeo eléctrico vertical SEV-12 y refracción sísmica R-13

El SEV-12 es el sondeo que se encuentra más al sur, específicamente en el sector Las Parchas, ubicándose a 1.1 km al sureste del SEV-15, a 2.2 km al sureste del sondeo SEV-13 y a 4 km al sureste del SEV-16. Para esta zona es importante destacar que no se tiene información cercana de pozo, por lo que se correlacionó con la información suministrada de los sondeos SEV-13, SEV-15 y SEV-16 (figura 6.33). Los resultados de resistividades y velocidades obtenidos para el SEV-12 y R-13 se detallan en la tabla 6.19.

Para la refracción sísmica R-13 se obtuvo una velocidad de 1829 m/s a partir de 12.3 m de profundidad, indicando saturación del subsuelo a partir de este nivel. La primera

capa resistiva registrada fue de 140 Ω .m con espesor de 0.5 m. Esto puede deberse a presencia de cobertura vegetal con humedad. Seguidamente se tiene aumento abrupto de 1038 Ω .m con 1 m de espesor, lo cual se asocia a presencia de sedimentos no saturados y poco porosos que corresponde a un acuitardo. Seguidamente, se tuvo un valor de 40.8 Ω .m que van desde 1.5 m hasta 9.9 m, se le asoció a un acuitardo, conformado por arenas o gravas con porcentaje de arcillas o limos.

A partir de los 9.9 m de profundidad se observó una resistividad de 181 Ω .m, que de acuerdo con la tabla 6.19 se clasifica como formaciones permeables y porosas, saturadas de agua, dando indicio a posible presencia de acuífero. Al correlacionarla con las velocidades obtenidas, se estima la presencia del nivel freático a los 12 m de profundidad.

El mapa de potencial acuífero (figura 6.2) muestra que para esta zona el potencial obtenido es muy alto (color verde), lo cual corresponde con la clasificación hidrogeológica propuesta a partir de los sondeos eléctricos, ya que se observa una formación potencialmente acuífera saturada a partir de 9.9 m y saturada a partir de una profundidad de 12.3 m desde la superficie. Debido a que no se obtuvo respuesta relacionada con la presencia de una formación sello (acuicludo), la protección ante infiltración de contaminantes externos en esta zona es baja. El valor de conductancia longitudinal (figura 6.10) obtenido para este sondeo fue de 0.4687 siemens, considerándose un valor por debajo del establecido para poder garantizar protección contra contaminantes.

Tabla 6.19 Tabla de resultados para el SEV-12 y R-13

Sector las Parchas								
N° de capa	SEV-12			Caracterización hidrogeológica		R-13		
	(Ω .m)	h (m)	d (m)	Clasificación hidrogeológica propuesta	Clasificación litológica propuesta	Vp (m/s)	h (m)	d (m)
1	140	0.5	0.5	Cobertura vegetal	Cobertura vegetal	572	3.5	3.5
2	1038	1.0	1.5	Acuitardo	Material poco poroso	1116	8.7	12.3
3	40.1	8.4	9.9	Acuitardo	Arena o grava arcillosa	1760	14.5	26.8
4	181	46.3	56.2	Acuífero parcialmente saturado	Arena o grava	2195		
5	68.9			Acuífero saturado	Arena o grava			

 Profundidad nivel freático

- Sondeo eléctrico vertical SEV-13 y refracción sísmica R-14

El SEV-13 y la refracción R-14 se ubican en el sector la Cooperativa Dos Fronteras, en el límite entre los estados Yaracuy y Carabobo, hacia el suroeste de la zona aluvional. Los sondeos más cercanos son el SEV-15 que está a 1.1 km al SE, ubicado dentro de la misma Finca y el SEV-16 a 1.8 km al NO (figura 6.33). No se tuvo disponibilidad de datos de pozo en la zona que indique el tipo de litología presente. Sin embargo, la información suministrada por el propietario, indica que el basamento se encuentra a 90 m aproximadamente. Los resultados de la refracción sísmica indican velocidades de onda P de 1791 m/s a 11 m de profundidad, relacionándolo con el nivel freático. Los datos de resistividades y velocidades para este sondeo se muestran en la tabla 6.20. Para la primera capa geoelectrica, el valor de resistividad fue de 170.7 Ω .m hasta una profundidad de 1.8 m, la cual se clasifica como cobertura vegetal. A partir de los 2 m de profundidad hasta 17.4 m se obtuvieron resistividades de 49.1 Ω .m (capa 2), las cuales entran en el rango de acuitardos y se encuentra saturado aproximadamente a partir de 11.3 m, la capa geoelectrica 3 tiene un valor de 302.4 Ω .m, lo que clasifica como sedimentos permeables, porosos y saturados con un espesor aproximado de 44.8 m. Luego se observa una capa geoelectrica de 23.8 Ω .m sugerida como un acuitardo saturado, con un espesor de 52.6 m. Finalmente, se observa una posible formación poco

permeable a más de 114 m de profundidad con una resistividad de 4654 Ω .m, asociada con basamento del Complejo Nirgua.

El mapa de potencial acuífero indica que el sondeo SEV-13 se encuentra en una zona de muy alto potencial, lo cual concuerda con el resultado obtenido por medio del SEV, ya que se observa una formación óptima para acumulación y extracción de agua saturada a partir de 17.4 m de profundidad. Debido a que no se obtuvo resultados de una capa confinante, esto influye en la protección de contaminación del acuífero, ya que no se cuenta con una capa impermeable que evite el paso de contaminantes. El mapa de conductancia longitudinal (figura 6.10) para esta zona indica un valor de 0.3272 siemens, estando por debajo del rango aceptado para garantizar protección de la formación saturada.

Tabla 6.20 Tabla de resultados para el SEV-13 y R-14

Cooperativa Dos Fronteras								
N° de capa	SEV-13			Caracterización hidrogeológica		R-14		
	(Ω .m)	h (m)	d (m)	Clasificación hidrogeológica propuesta	Clasificación litológica propuesta	Vp (m/s)	h (m)	d (m)
1	170.7	1.8	1.8	Cobertura vegetal	Cobertura vegetal	530	3.2	3.2
2	49.1	15.6	17.4	Acuitardo parcialmente saturado	Arena o grava arcillosa	1384	8.1	11.3
3	302.4	44.8	62.2	Acuífero saturado	Arena o grava	1791	14.4	25.7
4	23.8	52.6	114.8	Acuitardo saturado	Arena o grava arcillosa	2106		
5	4654			Acuífugo	Basamento			
 Profundidad nivel freático								

- Sondeo eléctrico vertical SEV-15 y refracción sísmica R-16

El SEV-15 y la refracción R-16 se ubican entre los sondeos SEV-13 (1.1 km al NO de SEV-15) y SEV-12 (1.1 km al SO), en el suroeste de la zona aluvional. Los resultados obtenidos de resistividades y velocidades de onda P se reflejan en la tabla 6.21. La refracción R-16 muestra una velocidad a partir de 10.5 m de profundidad de 1946 m/s indicando posible presencia de sedimentos saturados, lo cual indica que el nivel freático para la zona se encuentra a 10.5 m. Con respecto a los resultados geoelectrónicos, en la

primera capa resistiva se obtuvo una resistividad de 801 Ω .m, hasta 6 m de profundidad, lo que se puede asociar a un acuitardo conformado por presencia de material poco poroso. A partir de los 6 m y hasta los 49.6 m de profundidad se obtuvieron resistividades de 465 Ω .m, indicando la presencia de sedimentos permeables saturados, asociados a un acuífero saturado a partir de 10.5 m, aproximadamente. Por último, se obtuvo una tercera capa de resistividad de 133 Ω .m, asociada al mismo acuífero saturado de la formación superior, que se estima un espesor mayor a 43 m.

El SEV-15 se localiza en una zona de muy alto potencial acuífero (color verde) según lo visualizado en el mapa de potencial acuífero (figura 6.2), y concuerda con los resultados obtenidos por medio del SEV, ya que hay una posible formación acuífera saturada a partir de 6 m de profundidad. De acuerdo a las resistividades obtenidas en la superficie no se encuentran litologías impermeables como arcillas o limos que sirvan de sello para evitar la infiltración del agua hacia los estratos subyacentes, lo cual afectaría a la protección del agua que se encuentra almacenada en las formaciones. Para el mapa de conductancia longitudinal (figura 6.10) se observa que hacia el sondeo SEV-15 la conductancia es de 0.1012, lo que puede indicar que la formación acuífera no se encuentra protegida ante la infiltración de agentes contaminantes externos.

Tabla 6.21 Tabla de resultados para el SEV-15 y R-16.

Hacienda de Andrés Olivo								
N° de capa	SEV-15			Caracterización hidrogeológica		R-16		
	(Ω .m)	h (m)	d (m)	Clasificación hidrogeológica propuesta	Clasificación litológica propuesta	Vp (m/s)	h (m)	d (m)
1	801	6.0	6.0	Acuitardo	Cobertura vegetal	480	2.8	2.8
2	465	43.6	49.6	Acuífero parcialmente saturado	Arena o grava	1332	7.7	10.5
3	133			Acuífero saturado	Arena o grava	1946	13.9	24.4
4						2225		

	Profundidad nivel freático
---	----------------------------

- Sondeo eléctrico vertical SEV-16 y refracción sísmica R-17

El SEV-16 y refracción sísmica R-17 se ubican hacia el oeste de la zona aluvional, a 1.8 km al NE del SEV-13, específicamente en la Hacienda Guayabal. La tabla 6.22 muestra las resistividades y velocidades obtenidas. Con la refracción sísmica se pudo observar velocidades de 1563 m/s a partir de los 10 m, lo que indica presencia de sedimentos saturados y un posible nivel freático a dicha profundidad. En el sondeo eléctrico se obtuvo un valor de resistividad de 39 Ω .m hasta una profundidad de 0.4 m, respuesta que se asocia a la presencia de un acuitardo. A partir de los 0.4 m hasta 5.5 m de profundidad, la resistividad fue de 488 Ω .m, valor de que puede corresponder a una formación tipo acuífero no saturado. A partir de los 5.5 m de profundidad y hasta 103 m se obtuvieron resistividades de 43.1 Ω .m, que indica la presencia de formaciones poco permeables, pero con una porosidad alta, haciendo referencia a una formación geológica tipo acuitardo con posible saturación a partir de 10 m de profundidad. Este sondeo se correlaciona con los SEV-12, SEV-13 y SEV-15 debido a su cercanía (figura 6.33).

El SEV-16, presenta un alto potencial (color verde) de acuerdo a lo visualizado en el mapa de potencial acuífero (figura 6.2), que, al correlacionarlo con los resultados obtenidos de resistividades, no presenta concordancia, ya que no se obtuvo resultados relacionados con formaciones óptimas para extracción de agua.

Tabla 6.22 Tabla de resultados para el SEV-16 y R-17.

Hacienda Guayabal								
N° de capa	SEV-16			Caracterización hidrogeológica		R-17		
	(Ω .m)	h (m)	d (m)	Clasificación hidrogeológica propuesta	Clasificación litológica propuesta	Vp (m/s)	h (m)	d (m)
1	39	0.4	0.4	Acuitardo	Cobertura vegetal	496	2.6	2.6
2	488	5.1	5.5	Acuífero	Arena o grava	774	7.3	9.9
3	43.1	97.3	103.0	Acuitardo parcialmente saturado	Arena o grava arcillosa	1563	14.1	24.0
4	558			Acuífero saturado	Arena o grava	1865		
 Profundidad nivel freático								

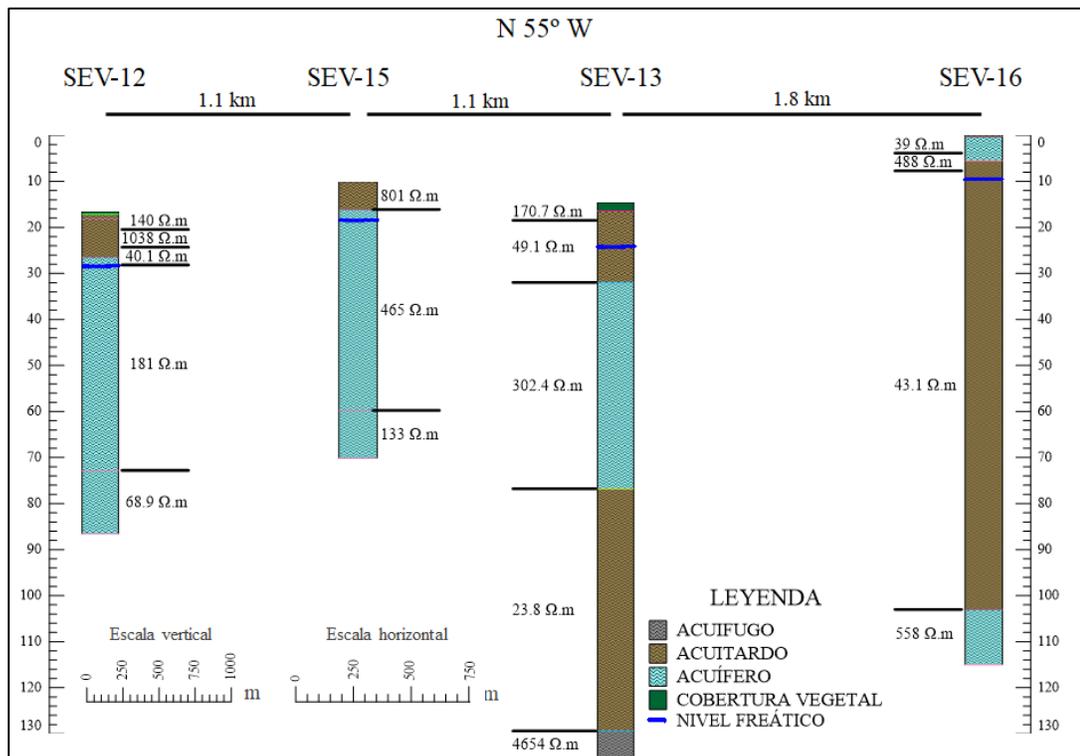


Figura 6.33 Clasificación hidrogeológica para SEV-12, SEV-13, SEV-15 y SEV-16.

La figura 6.33 muestra la correlación de los sondeos SEV-12, SEV-13, SEV-15 y SEV-16, los cuales se encuentran ubicados al suroeste de la cuenca, separados por distancias de 1.1 km a 1.8 km y direcciones paralelas entre ellos. Para poder realizar la correlación se trazó un perfil con dirección N 55° O desde el SEV-12 hasta el SEV-16, para así observar la posible relación existente en el subsuelo. La característica más evidente se encuentra desde el SEV-12 al SEV-13, donde se refleja la existencia de una posible formación potencialmente acuífera aproximadamente a partir de los 10 m de profundidad y con un espesor estimado de 50 m, con una profundidad máxima de 70 m. Se observa, además, una capa protectora de formación tipo acuitardo que supera los 6 metros de espesor sugerido para la protección del acuífero. Esta capa está posiblemente conformada por arenas y gravas con contenido de arcilla, lo que indica una capa semipermeable. El SEV-16 no presenta características relacionables con formaciones acuíferas óptimas.

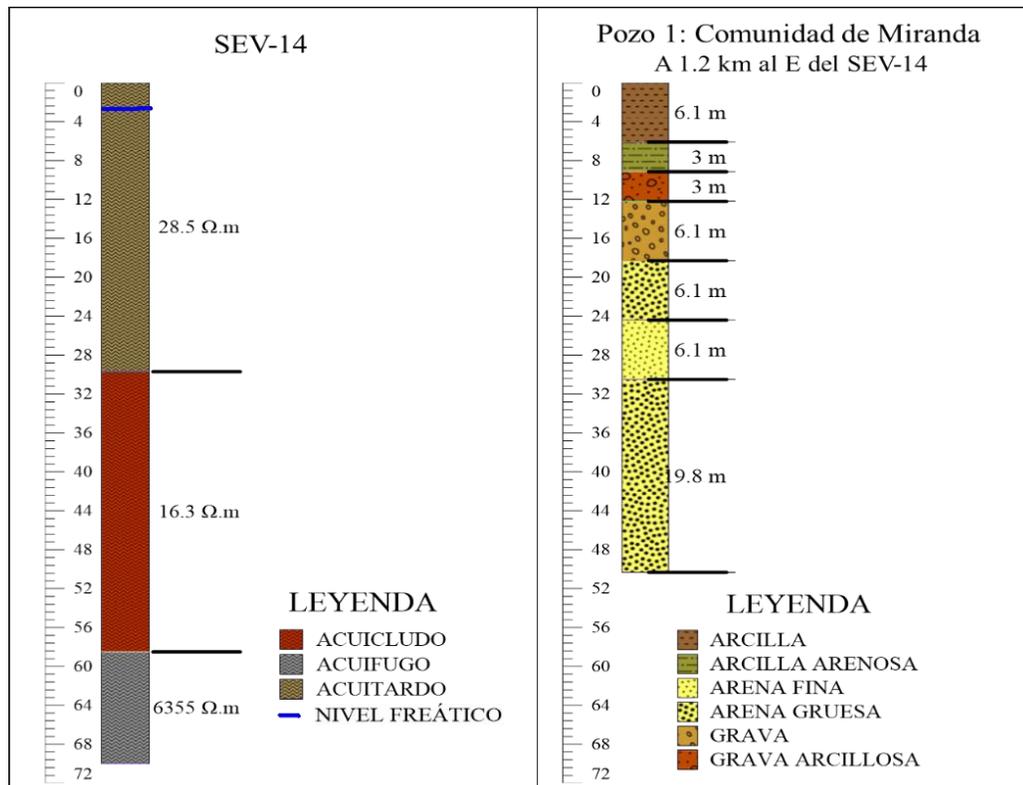


Figura 6.34 Clasificación hidrogeológica para SEV-14 e información geológica de pozos cercanos P1.

6.6 Clasificación de acuíferos propuestos según su uso

Los posibles acuíferos identificados en cada sondeo se disponen en la tabla 6.24 donde se resumen los detalles con mayor relevancia identificados en el apartado anterior. De acuerdo con los resultados obtenidos se sugiere que 12 puntos de adquisición cumplieron con las condiciones primordiales para considerarse la presencia de cuerpos geológicos potencialmente óptimos para la acumulación y extracción de agua subterránea. En varios puntos de adquisición no se conoce el espesor del acuífero propuesto ya que es la última capa identificada por el SEV, sin embargo, para poder ser registrado por el método eléctrico debe contar un espesor grande, por lo que se sugiere como una capa de gran volumen.

En este orden de ideas, se proponen 3 clasificaciones dentro de estos acuíferos, de acuerdo a sus características principales.

En primera instancia se tienen los acuíferos saturados con una protección alta a la contaminación, que corresponden con la ubicación de los puntos de adquisición S-05, S-09 y S-10. Estos sondeos cumplen con todas las características para garantizar un acuífero aprovechable para consumo humano, ya que se identificó la presencia de un acuífero suprayacente a la formación acuífera que garantiza una mayor protección ante la infiltración de contaminantes desde la superficie.

Seguidamente se tienen los puntos de adquisición S-01, S-04, S-06, S-08, S-12 que se asocian a presencia de paquetes de formaciones óptimas con una protección moderada ante la contaminación, esto se debe a que se encuentran debajo de una formación tipo acuitado y siendo una capa semi-permeable, no garantiza una protección alta ante posible infiltración de agua contaminada desde la superficie. Sin embargo, estos recursos hídricos pueden ser aprovechables para las actividades ganaderas, avícolas, agrícolas o de riego.

Luego, se tienen los acuíferos saturados vulnerables a la contaminación, que se identifican como los paquetes de formaciones potencialmente óptimas que no cuentan con una capa confinante o impermeable, por lo se ven propensos a contaminarse fácilmente por infiltración desde la superficie. Sin embargo, pueden ser aprovechables para actividades agrícolas, ganaderas, avícolas o de riego siempre y cuando se realice un análisis químico del agua para conocer si existe un alto grado de contaminación del agua. Esta clasificación corresponde con los sondeos S-02, S-07, S-13 y S-15.

Por último, se ubican los puntos de adquisición S-03, S-11, S-14 y S-16, estos no cumplen con las características deseables para proponer la presencia de paquetes geológicos potencialmente óptimos para acumulación de agua, por lo que se descartan como posibles zonas para realizar perforaciones de pozos productores de agua.

En la figura 6.35 se visualiza el mapa de potencial acuífero con la ubicación de los sondeos y la clasificación de los acuíferos propuestos según su uso.

Tabla 6.24 Resumen de la clasificación hidrogeológica propuesta por sondeo.

Sondeo	Profundidad del tope de la capa con velocidad > 1450 m/s (m)	Profundidad del tope del posible acuífero (m)	Espesor del posible acuífero (m)	Profundidad del tope de la formación confinante (m)	Espesor de la formación confinante (m)
SEV-01	3.6	28.1	indefinido	1.9	25.7
SEV-02	11.3	24.5	> 18	Sin formación confinante	
SEV-03	18.3	No se obtuvo resultados relacionados a posibles acuíferos			
SEV-04	12.7	44	indefinido	24.7	19.3
SEV-05	19.1	62.8	indefinido	1.4	2.4
SEV-06	20.4	52.8	indefinido	7.7	45.1
SEV-07	2.4	14.4	17.5	Sin formación confinante	
SEV-08	9.8	31.9	indefinido	0	0.3
SEV-09	9.8	1.9	39	1.2	0.7
SEV-10	10.1	40.3	indefinido	10.3	13.6
SEV-11	11.8	No se obtuvo resultados relacionados a posibles acuíferos			
SEV-12	12.3	56.2	indefinido	1.5	8.4
SEV-13	11.3	17.4	44.8	Sin formación confinante	
SEV-14	8.1	No se obtuvo resultados relacionados a posibles acuíferos			
SEV-15	10.5	49.6	indefinido	Sin formación confinante	
SEV-16	9.9	No se obtuvo resultados relacionados a posibles acuíferos			

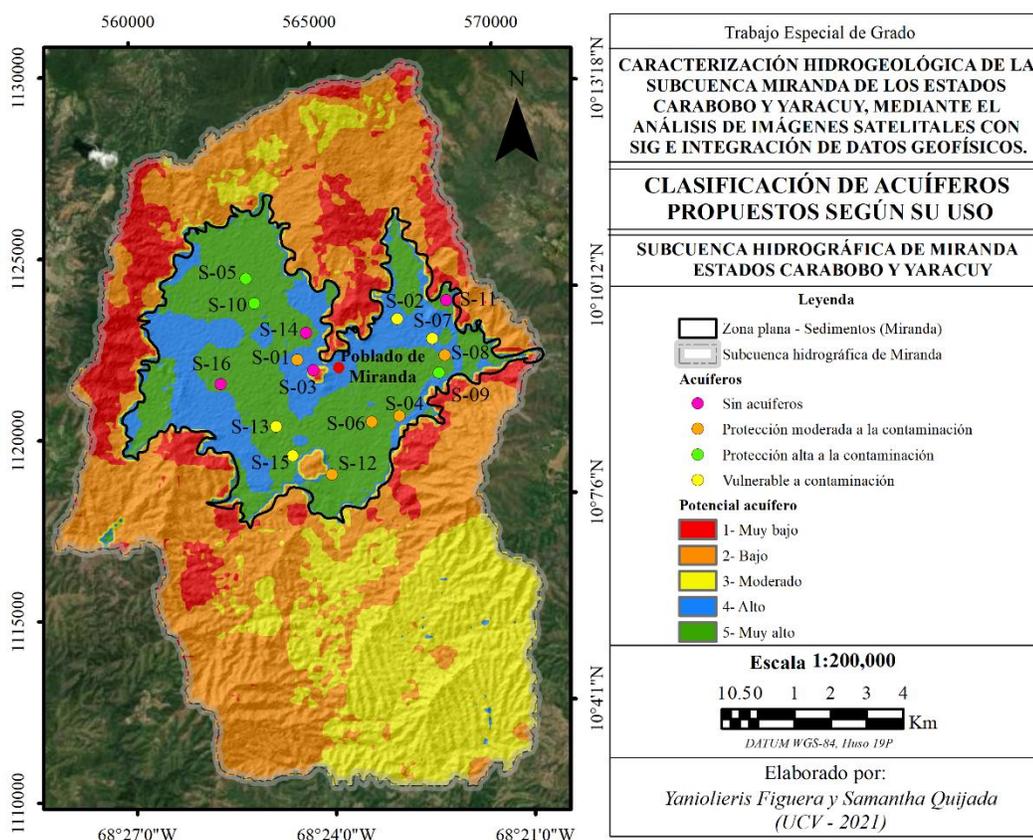


Figura 6.35 Clasificación de los acuíferos propuestos según su uso.

6.7 Métodos gravimétricos

6.7.1 Control estadístico para datos gravimétricos

El análisis estadístico descriptivo (tabla 6.25) de los valores de anomalía de Bouguer completa revela un valor mínimo de -175.67mGal y un valor máximo de -159.71 mGal, con un promedio general de anomalías de -170.17 mGal y una mediana de -170.32 mGal. El histograma de frecuencia (figura 6.36), muestra en su eje horizontal, los valores de anomalías de Bouguer representados en mGal, donde se observa un total de ocho (8) intervalos, de dos 2 mGal cada uno, distribuidos en todo el histograma de frecuencia, cuyas características presentan datos multimodales (bimodales) con distribución asimétrica. Los valores con más frecuencia de anomalía van desde -173 mGal a -171 mGal para la primera moda y magnitudes de -169 mGal a -168 mGal en la segunda moda. En el diagrama de caja y bigotes mostrado en la figura 6.36, el cuartil 25% se ubica en -172 mGal mientras que el cuartil 75% es de -168 mGal. Además, se observa un solo valor atípico por encima del cuartil 75% de -160 mGal, el cual pertenece a la estación G393 ubicada como estación de relleno en Hato viejo, hacia el noroeste de la zona aluvional.

Tabla 6.25 Estadística descriptiva de la anomalía de Bouguer

Anomalía de Bouguer (mGal)	
N total	501
Media	-170.17
Desviación estándar	2.42
Mínimo	-175.67
Máximo	-159.71
Mediana	-170.32
Rango	15.96
Percentil 25	-172.12
Percentil 50	-170.32
Percentil 75	-168.23
Desviación absoluta (mediana)	1.90981

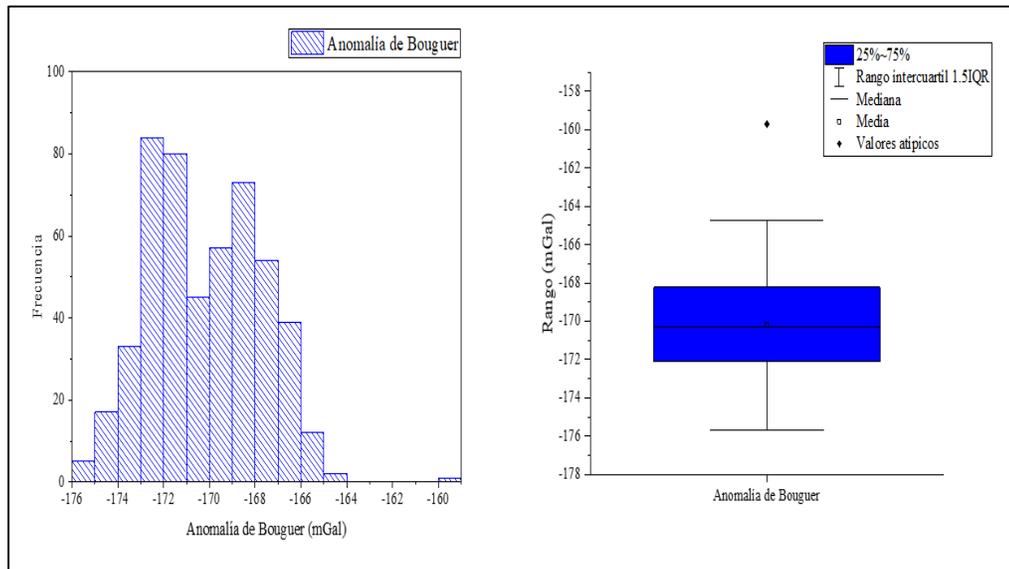


Figura 6.36 Histograma de frecuencia y diagrama de caja de anomalía de Bouguer.

6.7.2 Mapas gravimétricos

6.7.2.1 Mapa topográfico

En la figura 6.37 se observa el mapa topográfico en donde los altos topográficos se encuentran en la parte noreste (Complejo San Julián) y noroeste (Complejo Nirgua) de la zona aluvional, cuyos valores se encuentran entre 627.11 y 684.02 m de altura, aproximadamente (noroeste). Los valores medios se encuentran entre 614.75 y 6.21.08 m y los más bajos están entre 599.58 y 606.35 m correspondiendo al depocentro de la cuenca, ubicándose hacia la parte sur y noroeste del mapa. Sin embargo, en esta zona se observa una estructura alta, correspondiendo con una elevación topográfica localizada.

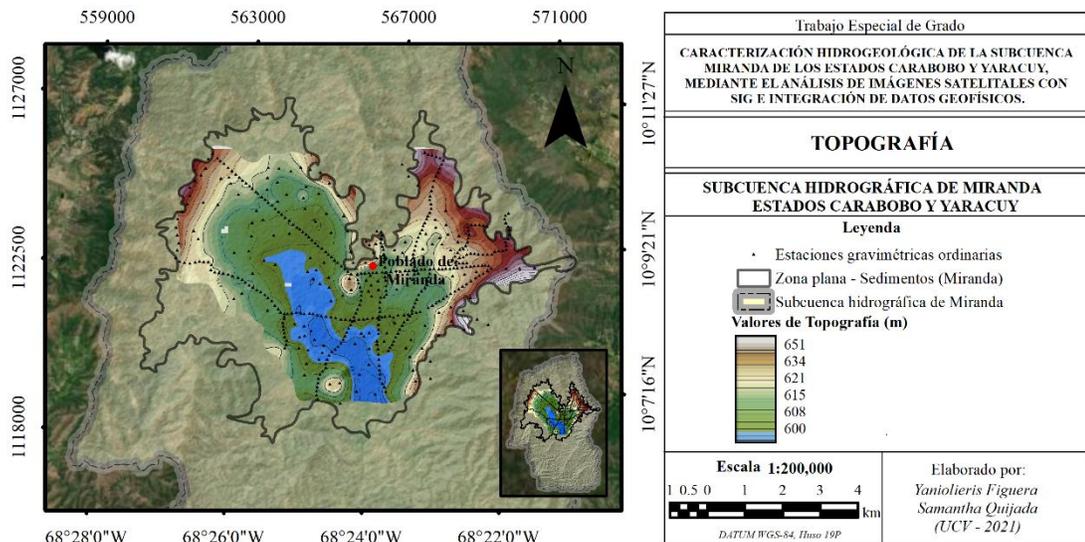


Figura 6.37 Mapa topográfico del área sedimentaria de la subcuenca de Miranda, estados Carabobo y Yaracuy.

6.7.2.2 Mapa de anomalía de aire libre

En la figura 6.38 se muestra el mapa de la Anomalía de Aire Libre en donde se observan valores entre -177.05 y -162.31 mGal. Hacia la parte noreste se encuentra una estructura con valores máximos que van desde -170.13 a -162.31 mGal, cuya tendencia preferencial de los contornos es de $N35^{\circ}W$, aproximadamente. En la parte centroeste y más al sur central, se observan los valores más bajos de anomalías de aire libre, representadas en color azul claro y oscuro, cuyos contornos tienen una dirección preferencial de $N30^{\circ}W$ y valores que van desde -177.73 a -176.12 mGal.

La correlación existente entre los máximos y mínimos de las anomalías de aire libre y la topografía (figura 6.37) es alta, lo cual corrobora la dependencia de la anomalía de aire libre a los cambios topográficos. También, la anomalía de aire libre presenta similitudes muy grandes con las anomalías de Bouguer, lo que indica que las estructuras que están presentes en la zona tienen una gran influencia en las respuestas obtenidas, especialmente a aquellas que son generadas por estructuras locales y someras.

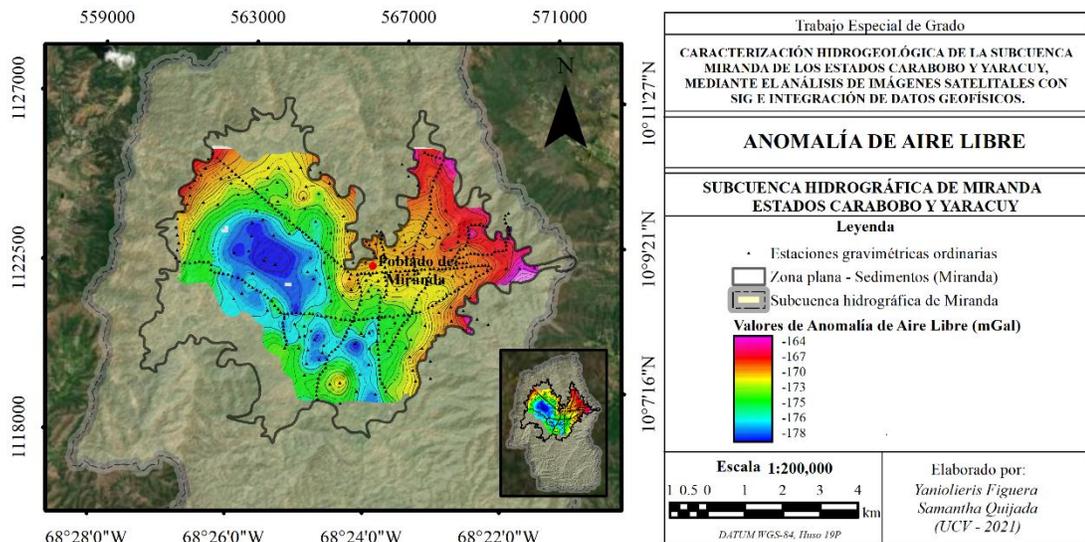


Figura 6.38 Mapa de anomalía de aire libre del área sedimentaria de la subcuenca de Miranda, estados Carabobo-Yaracuy.

6.7.2.3 Mapa de anomalía de Bouguer total

En la figura 6.39 se observa el mapa de anomalía de Bouguer Total, cuyos contornos muestran una tendencia preferencial de las líneas isoanómalas de N35°W. Los valores de anomalías de Bouguer Total abarcan desde los -165.53 hasta los -174.66 mGal. Estos valores son más pequeños que los de anomalía de aire libre. Sin embargo, las tendencias son muy similares, ya que se observan máximos anómalos en la parte noreste y noroeste de la zona plana del mapa, con una orientación de N35°W aproximadamente y respuestas de anomalía que van de -168.86 hasta -165.53 mGal. Estas zonas de máximos se corresponden con los altos topográficos de la subcuenca, asociándose a la litología presente en la zona, donde se encuentra a menor profundidad el basamento, el cual aflora progresivamente hacia el noreste, con presencia mayormente de esquistos, conformando el Complejo San Julián.

Hacia la zona centroeste de la zona aluvional, se obtuvieron anomalías cuyos contornos tienen una orientación preferencial de N25°W, con valores que van desde -174.66 hasta -173.07 mGal, correspondiendo esta zona a la elevación más baja y, además, parece representar el principal depocentro sedimentario de la subcuenca, conformado en su mayoría por arcillas, arenas, gravas y conglomerados. En la parte más sur central también se observan unos mínimos gravimétricos de -173.07 mGal, aproximadamente,

cuyos contornos tienen una orientación de N25°E. En aspectos generales, se observa como el incremento del valor de anomalía va gradualmente desde el suroeste hacia el noreste.

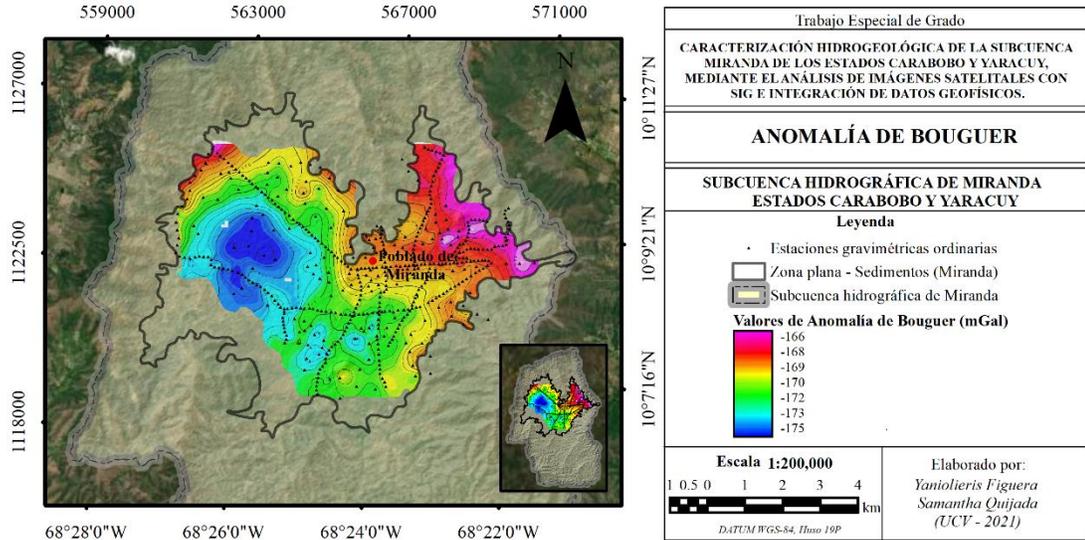


Figura 6.39 Mapa de anomalía de Bouguer total del área sedimentaria de la subcuenca de Miranda, estados Carabobo-Yaracuy (densidad 2.3 g/cm³).

6.7.2.4 Mapa de anomalía regional

El mapa de anomalía regional, fue obtenido por medio de la continuación analítica hacia arriba (CAHA) a partir de los 800 m (figura 6.40), debido a que ésta mostraba con mayor ajuste los aspectos geológicos regionales de la subcuenca.

El mapa de anomalía regional conserva las mismas tendencias generales que se observan en el mapa de Anomalías de Bouguer Total, con lo cual se podría inferir que la respuesta gravimétrica de las principales estructuras presentes en la zona de estudio, se encuentran dominadas por longitudes de onda de carácter regional, las cuales aumentan gradualmente desde el suroeste al noreste.

Se aprecia una tendencia general de los contornos de N50°W, donde anomalías máximas se encuentran ubicadas hacia la zona noreste, con valores desde -172.06 mGal hasta un máximo de -173.06 mGal. Esta parte de la subcuenca coincide con la topografía más elevada y, además, con el Complejo San Julián, conformado

principalmente por esquistos y mármoles, cuyas densidades son elevadas (2.67 g/cm^3) lo que explica la alta respuesta gravimétrica. Éstos valores van disminuyendo progresivamente hacia el suroeste, hasta encontrar su mínimo que van desde -168.50 mGal hasta -165.89 mGal . Las respuestas con menor magnitud de anomalías concuerdan con depocentro de la cuenca, donde se puede encontrar el mayor espesor de sedimentos, cuyas densidades no superan los 2.3 g/cm^3 .

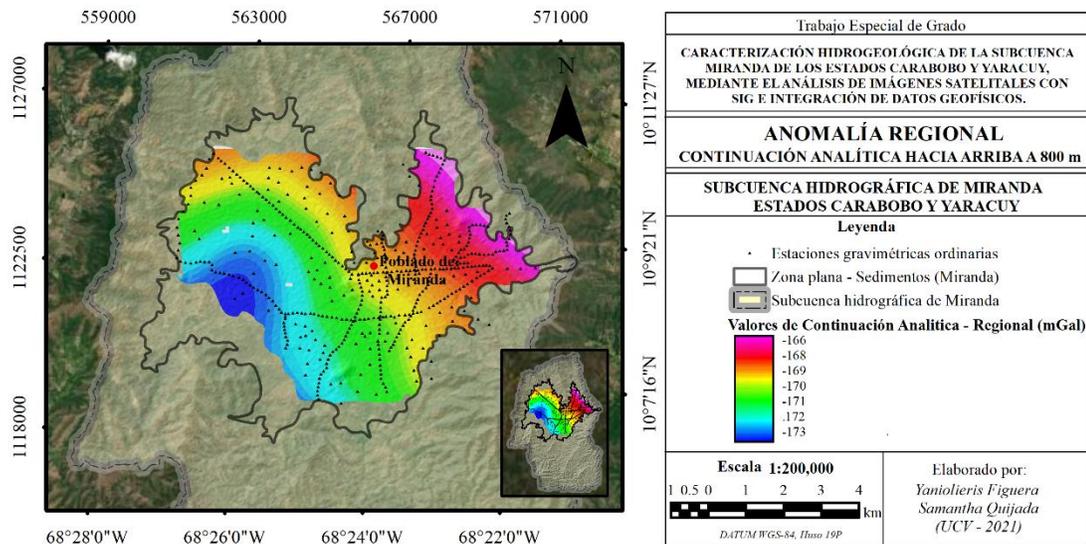


Figura 6.40 Mapa de anomalía regional por continuación analítica hacia arriba a 800 m del área sedimentaria de la subcuenca de Miranda, estados Carabobo-Yaracuy (densidad 2.3 g/cm^3).

6.7.2.5 Mapa de anomalía residual

Las anomalías residuales son debidas a masas anómalas someras, producidas por la presencia de cuerpos o estructuras relativamente pequeñas y cercanas a la superficie que generan respuestas gravimétricas con una longitud de onda corta, tal como se muestra en la figura 6.41 donde se puede apreciar cómo la mayor parte de las anomalías representadas en el mapa de la anomalía de Bouguer son de carácter local.

Hacia el noroeste, se observa una respuesta gravimétrica alta de 2 mGal , con contornos direccionados $N30^{\circ}E$ aproximadamente, atribuyéndose dicha respuesta al Complejo Nirgua, ya que la zona se encontraba muy cercana a la zona topográfica de esta formación. Seguidamente, se observa un mínimo grande localizado en forma semicircular y que se extiende lateralmente. Tal como se ha mencionado anteriormente,

la respuesta obtenida aquí se debe a la presencia del depocentro de la cuenca, sobre el cual se encuentra un máximo muy localizado que coincide con un terreno topográficamente destacado.

Seguidamente, se observa una anomalía máxima, con una tendencia preferencial de N45E, desde la parte suroeste hacia el norte. Al llegar a la zona noreste, este máximo cambia su orientación a N80°E. La orientación de esta anomalía coincide con una falla geológica que pasa exactamente por el mismo lugar (mapa geológico figura 2.7). Esta falla se encuentra cubierta por sedimentos del cuaternario y se profundiza hasta el complejo San Julián. Según Ynfante (2017), indica que puede ser una falla normal. Alrededor de esta anomalía, se observan dos mínimos, ubicados hacia la parte más noreste de la subcuenca.

Hacia el este, extendiéndose con dirección al sureste, se encuentra una respuesta de valores mínimos de anomalía, ubicado entre las longitudes 68°24'51''W y 68°22'42''W, latitudes 10°7'00''N y 10°9'00''N con una tendencia de N40°E. Al correlacionar estas respuestas con el mapa geológico, se observa la correspondencia con una falla cubierta que pasa por la misma zona, extendiéndose hasta la formación del Complejo Nirgua.

El mapa residual obtenido demuestra que las respuestas gravimétricas se ven influenciadas por cuerpos geológicos muy someros, como lo son las fallas locales de la zona y los contrastes de densidades entre formaciones litológicas.

El mapa de anomalía residual ayudó a destacar la geometría del basamento, el cual se encuentra más profundo en las zonas de mínimos locales (noroeste y sureste) y se hace más somero en donde se observan respuestas de anomalías máximas.

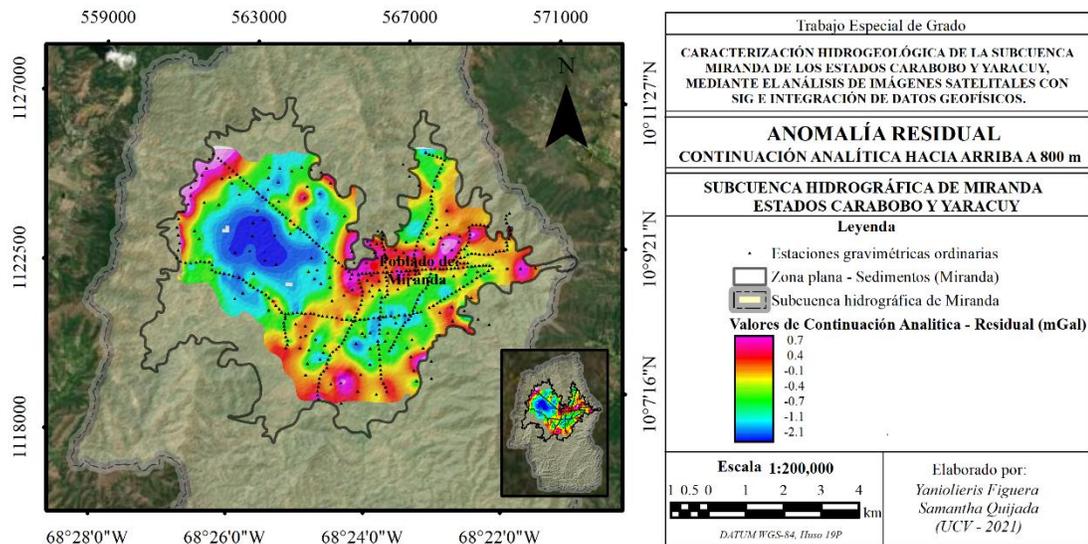


Figura 6.41 Mapa de anomalía residual por continuación analítica hacia arriba a 800 m del área sedimentaria de la subcuenca de Miranda, estados Carabobo-Yaracuy (densidad 2.3 g/cm³).

6.7.3 Análisis espectral

De acuerdo al tipo de estudio realizado se obtuvo el espectro de potencia a partir de la anomalía residual con el fin de estimar la mejor aproximación del promedio de las profundidades de los cuerpos presentes en la cuenca. Estas profundidades están asociadas a los sedimentos, el basamento y las formaciones de la zona de estudio. En la figura 6.42 se observa el gráfico del análisis espectral, en donde se observan cambios de pendiente en la curva lo cual se asocia a tres posibles fuentes (somera, intermedia y profunda).

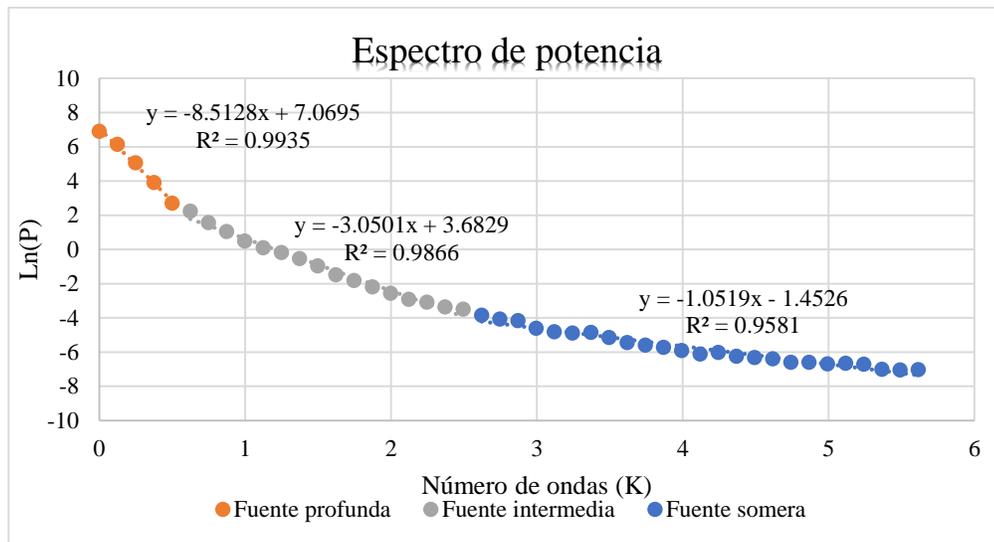


Figura 6.42 Espectro de potencia con los niveles de profundidad elaborado en Excel.

La zona de estudio es relativamente pequeña, por lo que el análisis espectral no produjo datos de profundidades tan altos. En la tabla 6.26 se observan los valores de profundidad obtenidos para cada fuente. La profundidad máxima hallada fue de -678 m, aproximadamente, la cual se obtuvo con un ajuste de curva del 99.35%, lo que genera un error del 0.65%. Dicha profundidad representa la fuente profunda y se puede asociar al contacto entre las formaciones del Complejo Nirgua y San Julián, para la fuente intermedia se obtuvo una profundidad promedio de -242.84 m, con un ajuste de curva de 98.66% y un error del 1.34%. También, se puede asociar al límite entre estas formaciones en distintas zonas. Finalmente, para la fuente somera se obtuvo una profundidad de -83.75 m, el ajuste de curva fue del 95.81%, para un error de 4.19%, la cual se relaciona con la respuesta que se obtuvo para la base de los sedimentos del Cuaternario.

Tabla 6.26 Profundidades obtenidas para las fuentes anómalas.

Fuente	Profundidad (m)
Somera	-83.75
Intermedia	-242.84
Profunda	-677.77

6.7.4 Análisis de profundidad a través de la deconvolución de Euler

La deconvolución de Euler es una herramienta de interpretación que permite estimar las profundidades de los elementos de interés que pueden generar una determinada respuesta gravimétrica y que, además, sea coherente con la geología conocida de la zona de estudio (Toledo, 2018).

En la figura 6.43 se muestra la solución de la deconvolución de Euler para un índice estructural de 1.0, una tolerancia permitida de 20% y un tamaño de ventana 8, ya que fueron los parámetros que dieron una solución con mejor ajuste a las anomalías gravimétricas presentes en el mapa y una respuesta se ajustaba coherentemente con la geología de la zona. El índice estructural seleccionado corresponde a una estructura cilíndrica, lo que indica que la forma de la cuenca se puede aproximar a una porción de la parte cóncava hacia arriba de un cilindro.

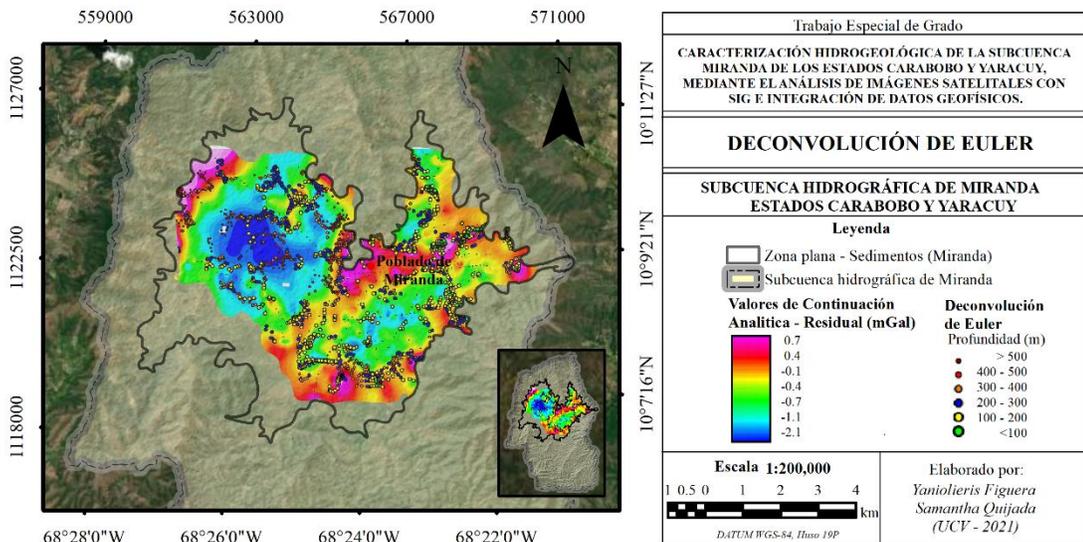


Figura 6.43 Solución obtenida para la deconvolución de Euler (I=1.0, T=20, W=8).

Se obtuvieron rangos de profundidades de 100 a 500 m, los rangos de máxima profundidad (de 400 m a 500 m o más) se encuentran distribuidos en la parte azul del mapa (mínimos de anomalía), correspondiente a la zona donde la cuenca adquiere su mayor profundidad, es decir, el depocentro. Hacia la parte sureste del mapa se observa la alineación de puntos con profundidad de 100 a 200 m, correspondiente al cambio

anómalo de valores intermedios a valores altos, lo que podría indicar la presencia de un contacto o estructura representativa.

En general, las soluciones de la deconvolución de Euler se alinean en función de la respuesta de anomalía gravimétrica, principalmente por los efectos de respuestas estructurales y en las variaciones de valores intermedios a valores altos.

6.7.5 Modelado 2D geológico

Los modelos 2D se elaboraron a partir del mapa de anomalías residuales. Se realizaron un total de 2 perfiles, el primer perfil, denominado Perfil A-A', con una dirección de N50°W y una extensión de 8.8 km y el segundo, denominado Perfil B-B', con dirección N40°E y extensión de 7.4 km, como se muestra en la figura 6.44 (mapa geológico con el mapa regional y sus perfiles). Los dos perfiles se trazaron por las zonas donde se observaban las respuestas de anomalías máximas y mínimas más relevantes, esto se hizo con el fin de conocer la influencia de la geología estructural de la zona responsable de generar estas respuestas gravimétricas.

Para la asignación de las densidades de cada formación se siguió las propuestas por Mederos (2009). Igualmente, los espesores fueron propuestos con ayuda del léxico estratigráfico de Venezuela (1999) (tabla 5.19 de densidades y espesores en metodología).

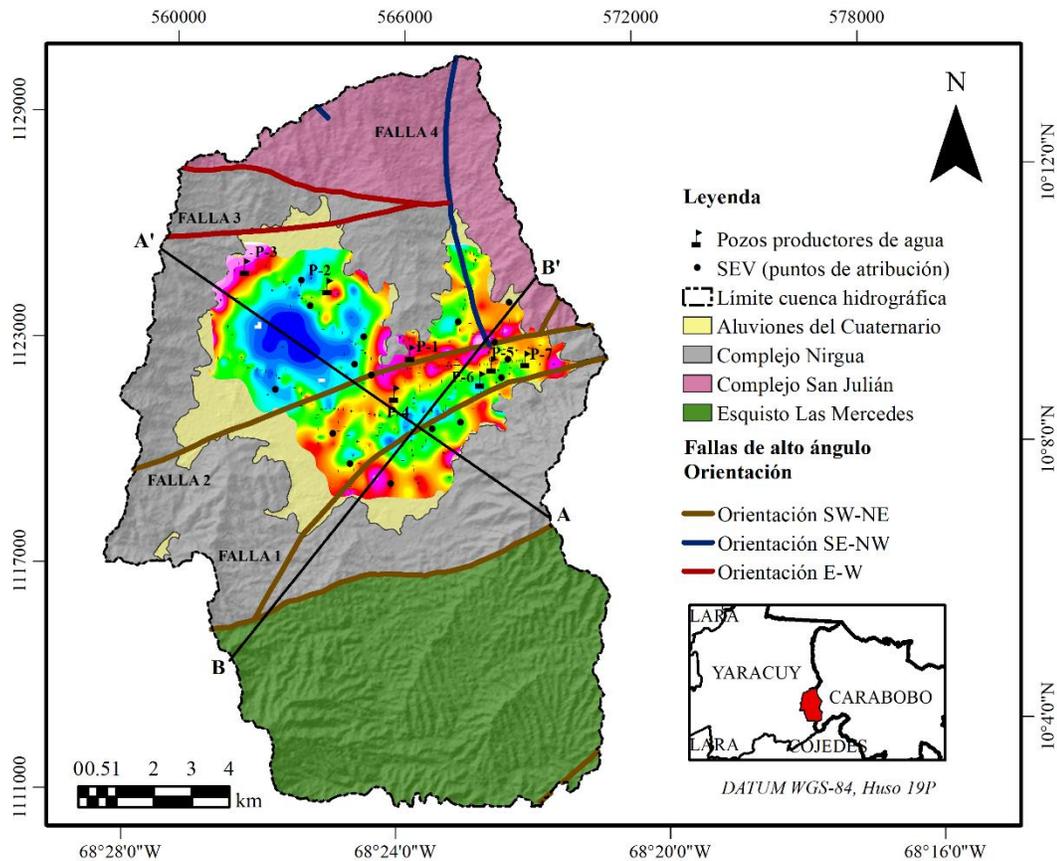


Figura 6.44 Perfiles A-A' y B-B' sobre el mapa de anomalía residual y el mapa geológico de la zona.

En los modelos realizados para ambos perfiles (figura 6.45 y 6.46) las profundidades propuestas para el manto se encuentran aproximadamente a 35 km, seguido de la corteza inferior con su tope a una profundidad de 20 km y con un espesor de 15 km, por encima de esta capa se encuentra la corteza superior, con un espesor de 11 km y su tope a una profundidad de 9.1 km. Además, se consideraron las profundidades obtenidas por medio de sondeos eléctricos verticales y profundidad de nivel freático adquiridas mediante las refracciones sísmicas. Solo se tomaron en cuenta aquellos sondeos que se encontraban más cerca del perfil, para ello se proyectaron perpendicularmente, con el fin de obtener un control general de datos y poder realizar una integración de todos los métodos geofísicos.

El modelo A-A' (figura 6.45) se ajusta con un error de 0.079 mGal, viéndolo estructuralmente de sur a norte, el Complejo Nirgua aflora a una cota de 620 m con un buzamiento estimado de S40°W, coincidiendo con la primera respuesta de anomalía

máxima que se visualiza al inicio del trazado del perfil, luego se presenta un fracturamiento. Debido a una falla (F1) denominada por Ynfante (2017) como una falla de alto ángulo con orientación SO-NE, que se encuentra cubierta por sedimentos del Cuaternario. Debido a la perspectiva del perfil trazado con respecto a la falla, su representación en el modelo se deforma hasta verse vertical. Sin embargo, se estima un ángulo de buzamiento mayor a 45°, esta falla ocasiona que el bloque A2 se deprima levemente con respecto al bloque A1.

El bloque A2 presenta su zona más profunda hacia el SE que se hace más somera al NW. Para el control de profundidad de esta zona se proyectó el pozo P4 (a 300 m hacia el NE del perfil), donde se tiene un espesor máximo de sedimentos de 75 m. Seguidamente, se encuentra la falla F2 que presenta las mismas características de la falla F1. Luego de esta fractura que afecta estructuralmente el basamento, se puede observar el bloque A3 del Complejo Nirgua como la zona más profunda de la cuenca, ubicada hacia el NO, la cual se encuentra deprimida levemente con respecto al bloque A2. En esta zona se obtuvieron los valores de anomalías más bajos, donde se observa claramente el depocentro. Se sugieren espesores de sedimentos para esta zona de 100 m, el dato de pozo más cercano que se tiene se encuentra ubicado hacia el límite de la zona de sedimentos, con un espesor máximo de 80 m (P3), hasta adelgazarse más al encontrarse con el límite de los sedimentos y el afloramiento del Complejo Nirgua. De igual forma, se consideraron los datos de los sondeos SEV-01, SEV-03 y SEV-06.

Analizando desde el SE, primeramente, se muestra el sondeo SEV-06 con una profundidad máxima de prospección de 52.8 m, y cuya capa con resistividades óptimas se encuentra a partir de 7.7 m de profundidad. Sin embargo, con métodos sísmicos se determinó un nivel freático a partir de 20.4 m, por lo que se sugiere saturación de esta formación óptima a partir de esa profundidad. Luego se visualiza el sondeo SEV-03, con el cual se obtuvo una profundidad máxima de prospección de 50.2 m.

La capa resistiva óptima se encuentra a partir de 20 m y el nivel freático determinado para este punto está a una profundidad de 18.3 m, por lo que se identifica una posible formación acuífera saturada a partir de 20 m de profundidad. Por último, se tiene el

sondeo SEV-01, donde se alcanzó una prospección vertical máxima de 28.1 m, la capa de resistividad óptima se ubica a partir de 2.4 m de profundidad, con un nivel freático sugerido de 3.6 m, con lo cual se establece una posible saturación a partir de esta profundidad.

Como se puede ver, los sondeos SEV-06 y SEV-03 tienen similitud de profundidades del nivel freático, por lo que se puede sugerir un posible acuífero para esta zona. En cambio, el sondeo SEV-01 contiene un nivel freático muy somero, lo que puede indicar presencia de otra formación hidrogeológica o una saturación parcial de las primeras capas que ocasiona dicha respuesta a tan poca profundidad.

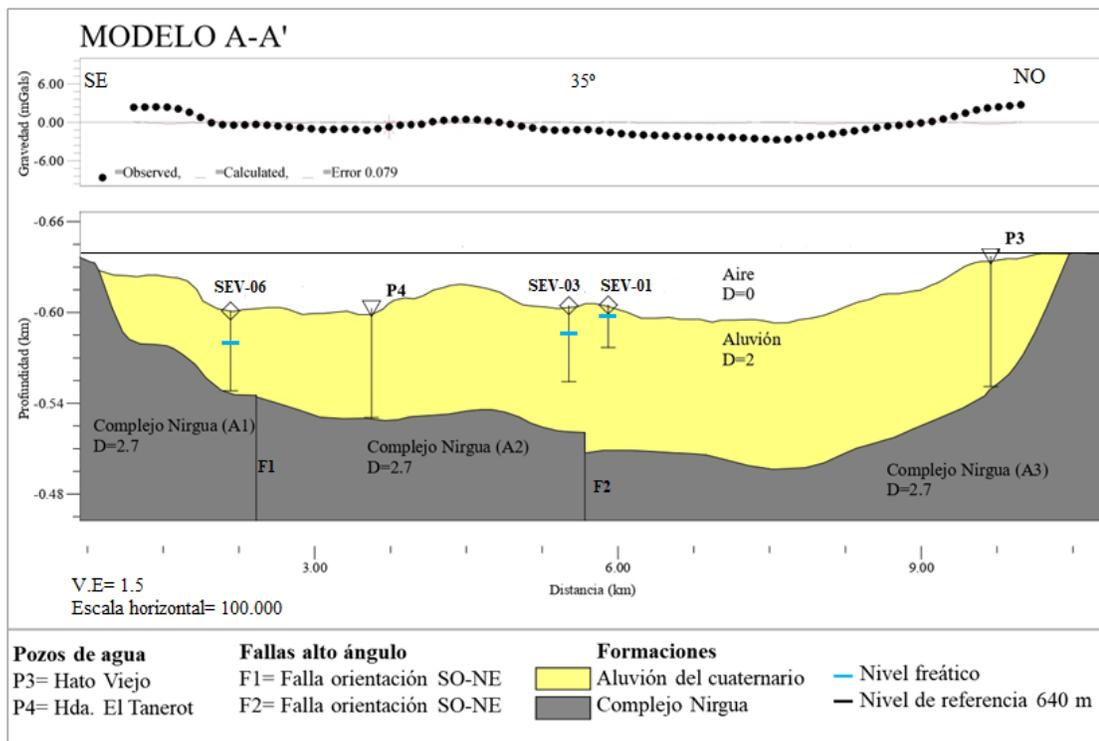


Figura 6.45 Modelo geológico del perfil gravimétrico A-A'.

Por otro lado, el modelo B-B' (figura 6.46) se ajustó a un error de 0.286 mGal, trazado desde el suroeste al noreste. Al inicio del trazado del perfil se observa el Complejo Nirgua que como se mencionó antes, aflora a partir de los 620 m, luego se observan aluviones del Cuaternario (sedimentos no consolidados), dando paso nuevamente al

afloramiento del Complejo Nirgua, lo cual coincide con una respuesta de anomalía máxima. Seguidamente se evidencia la presencia de un desplazamiento entre los bloques A1 y A2 del Complejo Nirgua, asociado a una falla de alto ángulo (F1), por la vista del trazado del perfil. Se observa que esta falla hace que el bloque A2 suba levemente con respecto al bloque A1 y adicionalmente coincide con la respuesta de anomalía mínima. La profundidad del bloque A2 es constante, lo cual se controló a través de la proyección de los pozos P5 y P6, ambos a 600 m hacia el NE del perfil, los cuales tienen 54 y 70 m de espesor, respectivamente. Esto podría evidenciar la presencia de un pequeño depocentro de la cuenca, con un espesor de sedimentos cercano a los 100 m, luego se observan dos bloques más del Complejo Nirgua (A3 y A4), los cuales se desplazan uno con respecto a otro, producto de las fallas F2 y F4. Esta última es una falla de alto ángulo (Ynfante, 2017) con dirección SW-NE. El encuentro de estas fallas genera el segundo máximo de anomalía y hace que el bloque A3 se deprima con respecto a los bloques A2 y A4. El bloque A4 es la zona más somera del Complejo Nirgua, cubierto de una capa muy delgada de Aluviones. Al final del trazado del perfil se evidencia un pequeño afloramiento del Complejo San Julián.

Para el modelo generado con el perfil B-B' se proyectaron los sondeos SEV-06, SEV-07 y SEV-11. Iniciando desde el SW se tiene el sondeo SEV-06, que se encuentra a 273 m del perfil, para este sondeo se obtuvo una profundidad máxima de prospección de 52.8 m, donde se encuentra una formación tipo acuitardo a partir de 7.7 m de profundidad, el nivel freático para este punto se ubica a 20.4 m, por lo que se sugiere saturación a partir de esta profundidad. Seguidamente se tiene el sondeo SEV-07 (a 308 m del perfil), la profundidad máxima de prospección es de 31.9 m, con una posible capa prospectiva a partir de 2.7 m. Con métodos sísmicos se obtuvo un posible nivel freático a partir de 8.5 m de profundidad, por lo que se sugiere un acuífero saturado desde este punto. Por último, se observa que mediante el sondeo SEV-11 se alcanzó una profundidad máxima de 54 m. Aquí se obtuvo una capa con características óptimas para acumulación de agua a partir de 0.2 m de profundidad hasta 15.9 m. Sin embargo,

el nivel freático señalado con métodos sísmicos se encuentra a 11.8 m de profundidad, por lo que esta zona no se considera con potencial para prospección de acuíferos.

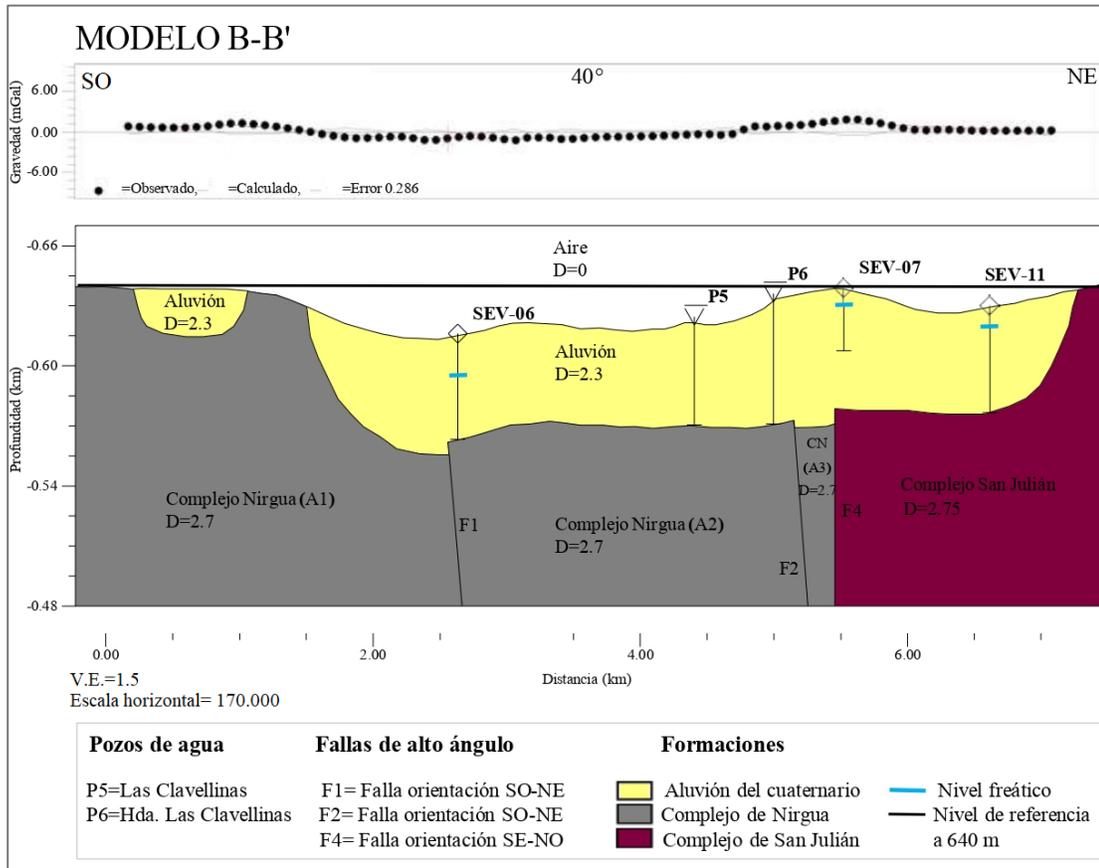


Figura 6.46 Modelo geológico del perfil gravimétrico B-B'.

Debido al detalle de la adquisición gravimétrica, todas las respuestas anómalas observadas son muy someras, por lo que, para efectos de este estudio, no se consideran respuestas más profundas, ya que solo se deseaba conocer la geometría aproximada de la cuenca y cómo varían los espesores de los aluviones en toda la extensión de ésta.

6.7.6 Modelado topográfico 3D con integración de datos de pozo y nivel freático

Se realizó un modelado 3D donde se integraron los datos adquiridos del nivel freático y los datos de espesores de gravas y arenas con el fin de obtener una mejor visualización y comparación de los resultados. Las figuras 6.47 y 6.48 muestran en diferentes vistas

el modelo 3D, en la parte superior derecha de cada imagen, se observa una miniatura de la vista por encima de la superficie topográfica. Es importante resaltar que estos resultados son orientativos, por lo que la interpretación final no es exacta debido a la poca cobertura de datos.

La superficie que se encuentra en la parte superior representa la topografía de la zona aluvional y engloba una pequeña porción montañosa que rodea a la subcuenca. De igual forma, esta misma capa está proyectada por debajo del modelo. Es importante mencionar que no representa la geometría ni la profundidad máxima de los aluviones, solamente es una proyección para obtener una mejor visualización de la ubicación de los pozos y el nivel freático en la cuenca.

La superficie azul representa la profundidad aproximada en la que se puede conseguir el nivel freático en la cuenca. Es una vista 3D del mapa presentado en la sección 6.4.4. Este nivel no indica el tope de un solo acuífero en toda la cuenca, por lo que no debe tomarse estrictamente ligado a una sola formación hidrogeológica, ya que pueden existir distintos tipos de formaciones que se encuentren saturadas de agua. A partir de este nivel, se consideran que las formaciones que se encuentren por debajo de él estarán saturadas, más no implica que contengan la mejor litología para su extracción, por lo que se pueden encontrar acuíferos, acuitados o acuíclados saturados.

Los cubos rojos simbolizan la profundidad de los espesores de las capas de arenas y gravas que se encuentran en los pozos, siendo la mejor litología para almacenar y extraer agua subterránea, por lo que en estas zonas hay más posibilidad de encontrar acuíferos con buena producción.

Del lado izquierdo del modelo se observa primeramente el pozo 3, que se encuentra ubicado hacia el noroeste de la zona aluvional. La primera capa de arena y grava se encuentra a una profundidad de 9 m hasta 49 m con un espesor total de 40 m aproximadamente, el nivel freático en ese punto se encuentra a 18 m considerándose entonces que a partir de esta profundidad se pueden conseguir arenas o gravas saturadas de agua.

Luego está el pozo P2, ubicado también en la zona noroeste de la subcuenca, cuyo nivel freático en este punto se puede encontrar a una profundidad estimada de 10 m. Sin embargo, este pozo tiene un espesor de 6 m de arenas y gravas a partir de 87 m desde la superficie, por lo que se puede encontrar formaciones saturadas a partir de 10 m de profundidad, pero no necesariamente conformada por la litología óptima.

El pozo P4 se ubica hacia el centro norte de los aluviones, su primera capa de arena y grava tiene una profundidad de 18 m y un espesor de 15 m y luego a 35 m desde la superficie se tiene otra capa delgada de unos 5 m de espesor. Para esta zona el nivel freático se puede encontrar a 20 m de profundidad, lo que indica una buena zona para extracción de agua subterránea a partir de 20 m.

Luego se tiene el pozo P1 que se encuentra en la zona noreste, muy cercano a la zona montañosa y encontrándose en el poblado de Miranda. Tiene su primera capa de arena y grava a 25 m de profundidad y con un espesor de 38 m. El nivel freático para esta zona está a 8 m de profundidad, por lo que se considera la presencia de un buen acuífero productor a partir de 25 m desde la superficie.

Por último, se tiene el pozo P5 que se ubica hacia el noreste, muy cercano a la montaña, cuyo nivel freático en esta zona es a 10 m de profundidad. La capa más somera de grava y arena es a 19 m de profundidad, con un espesor de 1.5 m. Luego, a una profundidad de 24 m desde la superficie se encuentra una capa de 35 m de espesor, siendo la óptima, ya que se encuentra saturada y posee un espesor grande.

En aspectos generales, se observa que el nivel freático es más profundo hacia la zona noroeste y central, y se hace más somero hacia el noreste. Las profundidades óptimas para encontrar acuíferos se encuentran en un rango de 18-25 m de profundidad, a excepción del pozo P2 que se encuentran a 87 m. Sin embargo, esto no implica se encuentren acuíferos a una profundidad más somera, ya que puede haber capas saturadas a poca profundidad, pero que la formación que las contenga no sea la óptima, como lo es en el caso de los acuitardos y acuicludos, que pudiendo contener agua, la permeabilidad y transmisividad que tienen es muy poca, lo que dificulta su extracción.

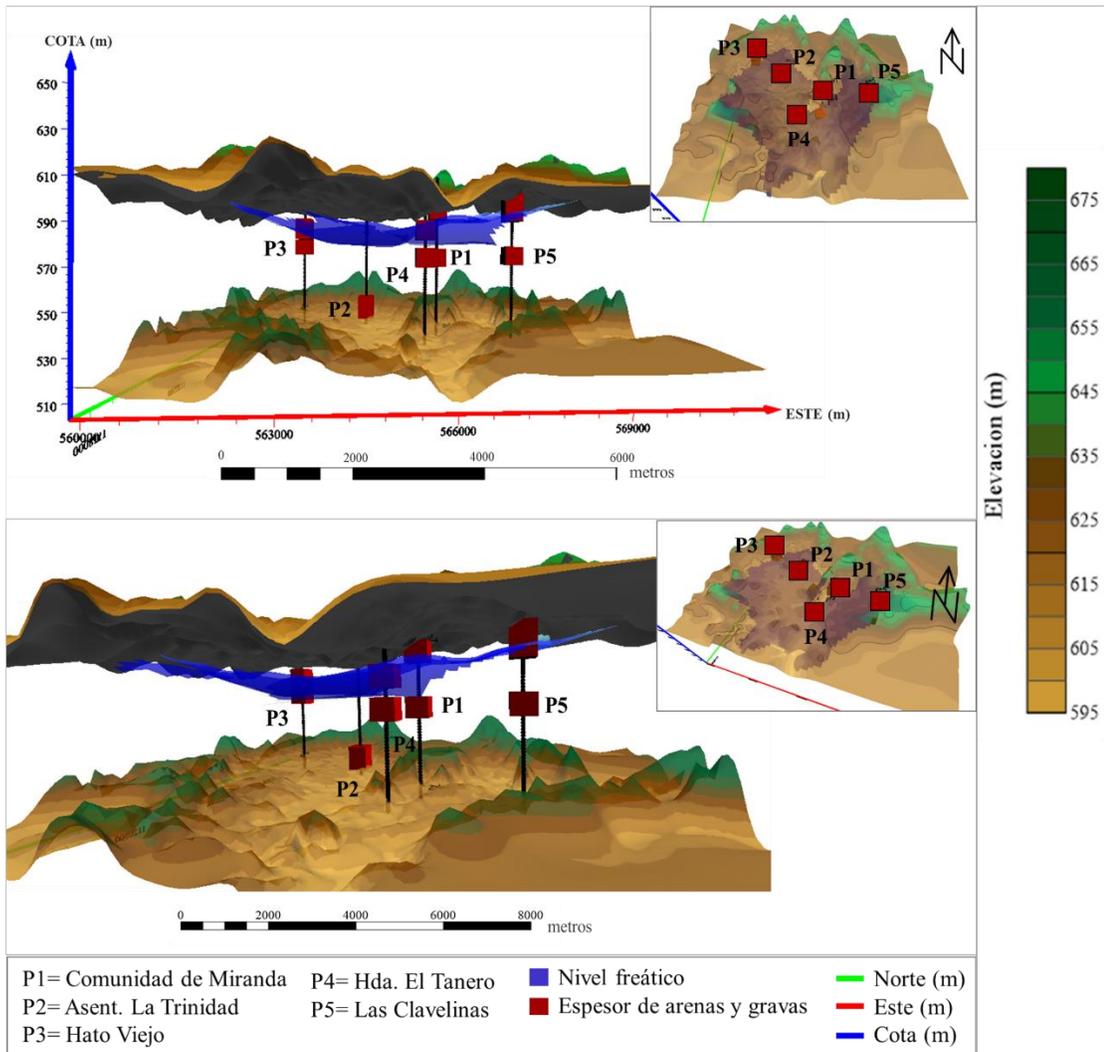


Figura 6.47 Modelado topográfico 3D con integración de datos de pozo y nivel freático (vista A).

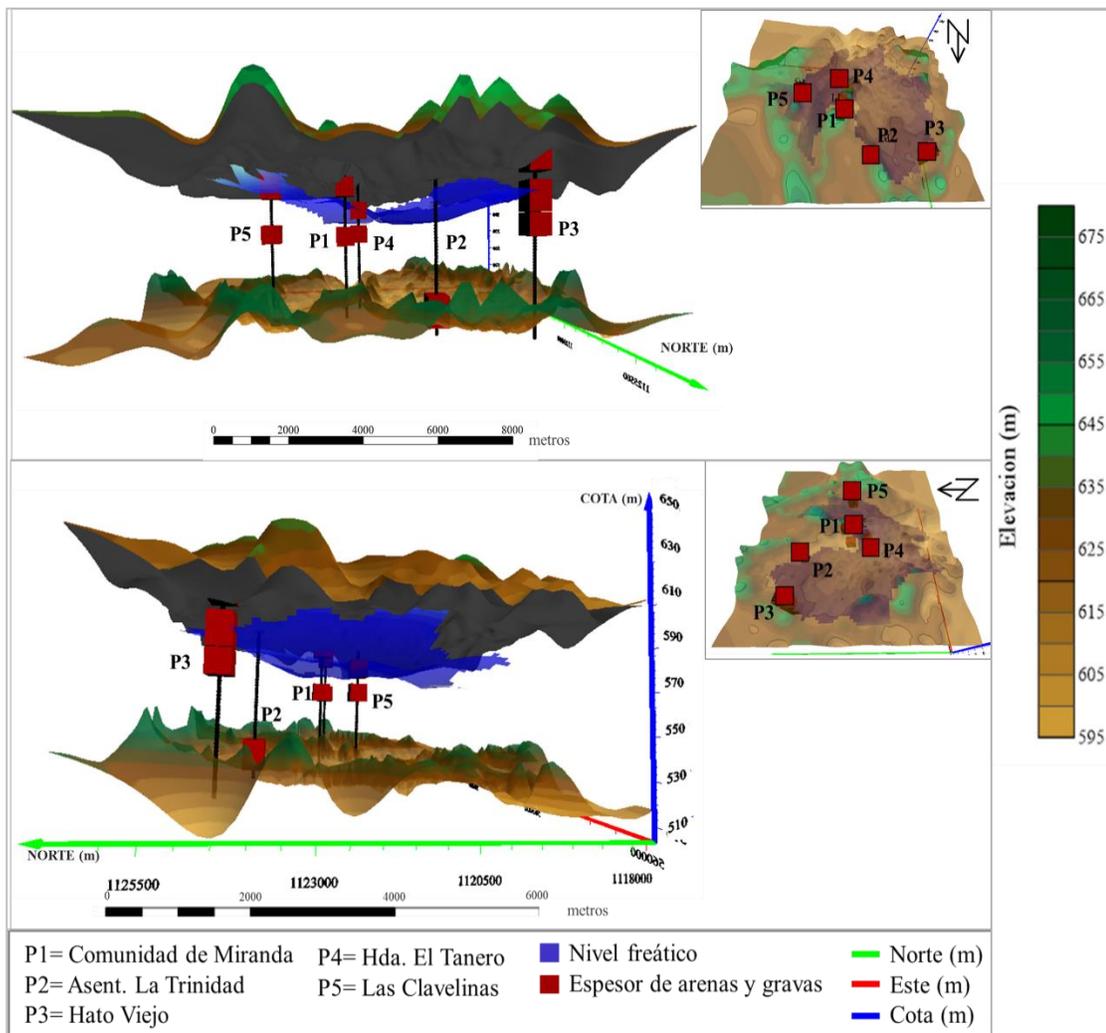


Figura 6.48 Modelado topográfico 3D con integración de datos de pozo y nivel freático (vista B).

6.8 Base de datos geoespacial

Finalmente, se recopiló toda la información procesada a través del SIG y los resultados obtenidos con los métodos geofísicos en una base de datos geoespacial, con el fin de suministrar una herramienta de acceso público y de uso libre para así ofrecer alternativas económicas en la gestión eficiente de los recursos hídricos. Esta base de datos se encuentra disponible en el formato del software *Arcmap 10.5*, en ella se evidencian las generalidades de la zona de estudio (delimitación hidrográfica de la subcuenca de Miranda, relieve, pozos de agua disponibles, ubicación de la zona aluvional), la geología local que conforma a la subcuenca, el potencial acuífero,

densidad de drenajes, permeabilidad de las formaciones, precipitación, índice de vegetación y distribución de las pendientes. Dicha base de datos se complementó con los resultados de los métodos eléctricos, sísmicos y gravimétricos obtenidos. Además, la base de datos contiene las tablas de datos sin procesar y procesados, con el fin de facilitar estudios posteriores.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Mediante el uso de SIG y la aplicación del método ADMC (Análisis de Decisiones Multi-Criterio), combinado con el PAJ (Proceso de Análisis Jerárquico), se pudo determinar que las zonas con mayor potencial acuífero se encuentran ubicadas en la zona de baja pendiente o zona aluvional, específicamente hacia el centro de la subcuenca, las cuales ocupan un 36% del área total; mientras que las zonas con un potencial moderado se encuentran ubicadas hacia las zonas sureste y norte, encontrándose en el área montañosa de la subcuenca y ocupando un 25% del área total. El potencial bajo y muy bajo se ubica hacia las zonas montañosas, lo que se asocia directamente con la litología de estas formaciones, compuesta principalmente por esquistos, mármol, gneis y anfibolitas. Sin embargo, estas zonas representan las posibles áreas de recarga debido a que se encuentran mayor cantidad de lineamientos.

Por otro lado, la subcuenca hidrográfica de Miranda es una cuenca sedimentaria que se encuentra en su fase de vejez, donde alcanzó la mayor parte del aporte erosivo y se encuentra en equilibrio sedimentario. La misma presenta una geometría semi alargada con una forma oval-redonda, tiene una superficie plana y con pequeñas porciones accidentadas. Además, al poseer una suave pendiente en su parte central ($P_m=4.8\%$ y $S_c=0.05\%$) y una baja densidad de drenajes, presenta una limitada respuesta para descargar las aguas que se pudieran concentrar en la superficie, debido a la ocurrencia de intensas precipitaciones.

A partir del análisis de los SEV (Sondeos Eléctricos Verticales) y las mediciones de sísmica de refracción realizadas en la zona aluvional, se determinó que existe una correlación con el mapa de potencial acuífero, ya que los resultados obtenidos de resistividad y velocidad reflejan características relacionadas a la presencia de paquetes de formaciones hidrogeológicas potencialmente acuíferas a diferentes profundidades.

En las zonas noroeste y sureste, las capas geoelectricas resistivas óptimas se encuentran a 64 m de profundidad. Hacia el este se encuentran entre 8 y 16 m de profundidad. En la zona central se puede observar que la profundidad a la que se obtienen las resistividades óptimas es de 40 a 56 m. Los valores de resistividad de las capas óptimas (entre 50-500 Ω .m) fueron asociados con respuestas de litologías areno-gravosas. Además, los datos de pozos también señalan presencia de estas litologías a las profundidades ya mencionadas.

Se determinó que la profundidad de saturación de las formaciones óptimas, estimada mediante los valores de velocidades de ondas P, varía desde 2 m hasta 11 m hacia el noreste y noroeste, de 9 a 12 m hacia el suroeste y hasta 20 m de profundidad hacia la zona central de los aluviones.

La mayoría de los sondeos mostraron valores bajos de resistividad en las capas geoelectricas más superficiales, asociados a la presencia de capas limo-arcillosas, lo cual indica poca permeabilidad a nivel superficial, proporcionando protección a las aguas subterráneas ante la posible infiltración de agentes contaminantes externos. Esto se corrobora con el mapa de conductancia longitudinal, en el cual se observa que las zonas que cuentan con mayor protección se encuentran ubicadas hacia las áreas central y sureste de la zona aluvional.

Los resultados obtenidos mediante los sondeos eléctricos y refracciones sísmicas señalan que los acuíferos óptimos para perforar pozos con destino a consumo humano se ubican hacia el noroeste y este de la zona aluvional, ya que poseen alta protección a contaminantes externos. Hacia la zona noreste y sureste se encuentran posibles acuíferos para perforar pozos destinados a riego, ganadería y agricultura, debido a que poseen las características esenciales para encontrar acuíferos con buena producción. Sin embargo, no se identificó un alto grado de protección contra contaminantes, por lo que no se garantiza que estos recursos hídricos sean adecuados para el consumo humano. Por último, los sondeos que no arrojaron resultados relacionados a la presencia de acuíferos se ubican hacia el centro-norte de la cuenca, al noreste en el límite de la zona aluvional y hacia el oeste, por lo que hay menos probabilidad de

encontrar aguas subterráneas al perforar en estas zonas, ya que no se dispone de información suficiente para corroborarlo.

Se pudo inferir la geometría de la subcuenca hidrogeológica de Miranda, mediante la correlación y el análisis integrado de la información geológica, datos de pozos disponibles, datos gravimétricos, geoelectrónicos y sísmicos adquiridos en la zona de estudio.

Los máximos de la anomalía de Bouguer se ubican al noreste y noroeste de la zona aluvional, correspondiendo con los altos topográficos de la subcuenca y donde se encuentra a menor profundidad el basamento, el cual aflora progresivamente hacia el noreste, con presencia mayormente de esquistos, los cuales conforman el Complejo San Julián. Los mínimos gravimétricos se ubican hacia el centro-oeste de la zona aluvional, representando el principal depocentro sedimentario de la subcuenca.

El mapa de anomalía gravimétrica regional muestra una tendencia general de los contornos en una dirección de N35°W, con valores de la anomalía de Bouguer que varían desde -165.53 hasta los -174.66 mGal, que sugiere un aumento de las anomalías, desde el suroeste hacia al noreste de la zona aluvional, motivado a la distribución en profundidad de estructuras regionales y las principales formaciones que se encuentran en la zona de estudio, tales como: el Complejo San Julián, el Complejo Nirgua y Formación Las Mercedes.

Por otra parte, el mapa de las anomalías de Bouguer residuales obtenido, permitió inferir la geometría del basamento de la Subcuenca Hidrográfica de Miranda en la zona aluvional, la cual es más profunda en aquellas áreas donde se observan anomalías con mínimos locales (noroeste y sureste) y más somera en donde se observan anomalías máximas. Se infiere que las respuestas gravimétricas locales se ven influenciadas por cuerpos geológicos muy someros, como lo son las fallas presentes en la zona, los contrastes de densidades entre formaciones litológicas y las irregularidades y geometría que presenta el basamento de la cuenca.

El espectro de frecuencia señala una fuente somera a 83.75 m de profundidad, la cual se asocia al límite entre aluviones y basamento rocoso (Complejo San Julián y Complejo Nirgua), coincidiendo con las profundidades promedios de los datos de pozo. Para la fuente intermedia se obtuvo una profundidad promedio de 242.8 m y para la fuente profunda la respuesta se ubicaba a 677.7 m de profundidad, estas dos últimas se relacionan a contactos entre las formaciones geológicas.

Los perfiles de modelos gravimétricos 2D, A-A' y B-B', permitieron describir la geometría de la subcuenca, además de identificar y corroborar que el depocentro de la zona aluvional se ubica hacia el centro-oeste y oeste, con un espesor máximo de 120 m. Por otra parte, se observó un adelgazamiento del espesor aluvional hacia el noreste, con una profundidad de basamento rocoso de 50 m, aproximadamente. Las fallas estructurales que se encuentran en la zona son fallas de alto ángulo cubiertas por los sedimentos. Los SEV y datos de pozos permitieron realizar un control de la profundidad del basamento. El análisis de velocidades y espesores obtenidos de las refracciones sísmicas permitió estimar la profundidad del nivel freático con respecto al espesor de los aluviones.

Finalmente, la base de datos geoespacial que reúne la información obtenida a través del procesamiento con el SIG y que se complementa con los resultados de los métodos geofísicos (eléctricos, sísmicos y gravimétricos) es de gran utilidad para la búsqueda de recursos hídricos en la región, ya que proporciona una herramienta eficiente y de libre acceso para la gestión integral de los recursos hídricos. Además, proporciona información relevante para las instituciones encargadas de proteger y promover planes para el correcto manejo de las aguas subterráneas.

Para obtener mayor detalle en la delimitación de los sistemas acuíferos presentes en la zona, se recomienda la continuación del estudio mediante la aplicación métodos geofísicos prospectivos que incluyan la realización de calicatas y tomografías de resistividades eléctricas, con una longitud de tendido mínima de 600 m, con el fin de alcanzar profundidades de prospección mayores a los 100 m. Las mismas deberían tener una separación entre tendidos no mayor a 1 km, para garantizar un mejor control

y resolución en los datos: De igual forma, se sugiere realizar SEV y refracciones sísmicas con un espaciado entre tendidos no mayor a 500 m. De igual forma, se sugiere levantar más estaciones gravimétricas a lo largo de la zona aluvional en las zonas que no fueron cubiertas en este estudio, con la finalidad de complementar la información existente y alcanzar más detalle de las estructuras y geometría de la cuenca.

Se recomienda, además, realizar un estudio de cobertura vegetal, tipos y uso de suelos para plantear un mapa de zonas potenciales para recarga acuífera, mediante SIG con la aplicación del método ADMC, combinado con el PAJ.

En el mismo orden de ideas, se recomienda llevar a cabo un estudio de análisis de riesgo ambiental, en el cual se delimiten las zonas propensas a deslizamientos, deslaves e inundaciones ante la ocurrencia de fuertes precipitaciones, con la finalidad de que el mismo sirva como herramienta para la toma de decisiones y garantizar el bienestar y seguridad de los habitantes de la región.

Se debe crear consciencia en el cuidado y reforestación de los bosques, especialmente en las zonas más altas de la cuenca, para evitar la pérdida de cobertura vegetal, ya que esto incide directamente en la recarga eficiente de los acuíferos. Además, de hacer un uso consciente y racional de estos recursos para poder garantizar el suministro permanente de agua potable para agricultores, ganaderos y habitantes de esta región.

Se recomienda que las perforaciones para pozos se realicen hasta la base de los paquetes geológicos en las zonas indicadas como potencialmente acuíferas para garantizar el aprovechamiento máximo de los recursos y evitar la pérdida de los pozos a mediano y largo plazo. De igual forma, se recomienda realizar un análisis químico de aguas subterráneas para determinar la calidad de las mismas y destinar correctamente su uso.

Finalmente, se recomienda utilizar la base de datos geoespacial generada en este estudio, como un complemento para próximos estudios que se lleven a cabo en la región. De igual forma, se sugiere realizar prospecciones geofísicas para identificar las posibles zonas acuíferas y complementarlas con el uso de SIG, ya que ambas

herramientas en conjunto aseguran una mejor evaluación. Sin embargo, no se recomienda utilizar únicamente una evaluación preliminar por SIG como resultado determinante de un estudio, ya que este tipo de recurso sólo evalúa factores superficiales y no toma en cuenta la influencia de las características del subsuelo que son de gran importancia para estudios de agua subterránea.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACFIMAN-SACC (2018). Primer reporte académico de cambio climático 2018. Villamizar, A., Buroz E., Lairet R., y Gómez J. (Eds.). Ediciones ACFIMAN – CITECI, Caracas. 43 p.
- Alonso, D. (2006). Firma espectral. Geograf. Consultado 25 de febrero de 2020. Recuperado de: https://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node70_ct.html
- Alonso, D. (2015). Formación que impulsa tu perfil GIS. España: Mapping Gis. Consultado 24 de marzo de 2020. Recuperado de: <https://mappinggis.com/2015/06/ndvi-que-es-y-como-calcularlo-con-saga-desde-qgis/>.
- Alonso, D. (2019). Formación que impulsa tu perfil SIG. España: Mapping Gis. Consultado 24 de marzo de 2020. Recuperado de: <https://mappinggis.com/2019/05/combinaciones-de-bandas-en-imagenes-de-satelite-landsat-y-sentinel/>
- Alvarado, J., Fuentes P. y Julio M. (1982). Diagnóstico hidrogeológico de la región de Barlovento. MARNR, Dirección de Hidrogeología. Caracas. Informe técnico DGSIIA / IT / 116. 93 p.
- Álvarez, M., Arquero, A. y Martínez, E. (2000). Empleo del AHP (Proceso Analítico Jerárquico) incorporado en SIG para definir el emplazamiento óptimo de equipamientos universitarios. Aplicación a una biblioteca. Facultad de Informática (U.P.M.). 18 p.
- Álvarez, O. y Gutiérrez, G. (2008). Revisión geológica utilizando Sistemas de Información Geográfica entre la Sierra de los Motilones y Juan Manuel De Aguas Claras, zona sur de la Sierra de Perijá. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Caracas, Venezuela. 169 p.
- Alzate, B. (2001). Imágenes Espaciales de la superficie terrestre. Procesamiento digital, análisis y extracción de información temática. Universidad Nacional de Colombia, facultad de Ciencias Humanas, Departamento de Geografía. Santa Fe de Bogotá.
- Amante, C. y Eakins, B. (2009). ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data sources and Analysis. National Geophysical Data Center. Marine Geology and Geophysics Division. Colorado. 25 p.

- Angelone, S. (2006). Permeabilidad de suelos. Universidad Nacional de Rosario. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Departamento de Geología. 39 p.
- Apus del agua (2014). Partes del acuífero. Consultado 26 febrero 2020. Recuperado de: <http://apusdelagua.blogspot.com/2014/11/importancia-de-las-aguas-subterranas.html>.
- ArcGeek (2018). Delimitación de zonas de prospección de aguas subterráneas utilizando el Análisis de Criterios Múltiples. Consultado 25 de febrero de 2020. Recuperado de: <https://acolita.com/delimitacion-de-zonas-de-prospeccion-de-aguas-subterranas-utilizando-el-analisis-de-criterios-multiples-mca/>.
- Arias, D., Echeverri O. y Hoyos F. (2012). Relaciones geoelectricas en la exploración geotécnica. Boletín de Ciencias de la Tierra, (31), 39-50 p.
- Arocha R. (1980). Abastecimiento de agua (teoría y diseño). Editorial Vegas. Caracas, Venezuela. 284 p.
- Astier, J. (1975). Geofísica aplicada a la hidrogeología. España, Editorial. 344 p.
- ASTM D5777 (2018). Standard guide for using the seismic refraction method for subsurface investigation, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania. 14 p.
- Audemard, F., Machette, N., Cox, W., Dart, R. y Halle, M. (2000). Map and database of Quaternary faults in Venezuela and its offshore regions. Open-file report 00-018 (paper edition) of Geological Survey editorial.
- Auge, M. (2008). Métodos geoelectricos para la prospección de agua subterránea. Universidad de Buenos Aires, Argentina. 30 p.
- Avé-Lallemant, H. y Sisson, V. (1996). High-pressure (~2000 MPa) Kyanite – and Glaucofane – bearing Pelitic Schist and Eclogite from Cordillera de la Costa Belt, Venezuela. Geol. Soc. of America Special Paper. 38 (1). 66-83 p.
- Ayazi, M., Pirasteh, S., Pili, A., Biswajeet, P., Nikouravan, B. y Mansor, S. (2010). Disasters and risk reduction in groundwater: Zagros mountain southwest Iran using geoinformatics techniques. Disaster Advances, 3(1), 51-57.
- Baquero M. (2015). Evolución geodinámica del noroccidente de Venezuela, basado en nuevos datos de geocronología, geoquímica e isotópicos. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado Para optar al Título de Doctor en Ciencias Geológicas, 294 p.
- Beck C. (1986). Geologie de la chaine Caraïbe su meridien de Caracas (Venezuela). Soc. Geol. de Nord, Villeneuve s'Ascq, Francia, Public. no. 14, 462 p.

- Bellizzia, A. (1972). Sistema Montañoso del Caribe, borde sur de la Placa Caribe. ¿Es una cordillera alóctona? Memorias 1972 de la VI Conferencia Geológica del Caribe. Editor: Cecily Petzall, Caracas. 247 p.
- Bellizzia, A. y Rodríguez G. (1967). Guía de la excursión a la región de Duaca - Barquisimeto - Bobare. Bol. Geol., Caracas, 8(16), 289-309 p.
- Bertoni, J. y Lombardi, F. (2008) Soil Conservation. (7ma edición). Editoraícone, Sao Paulo.355 p.
- Bhattacharai, K. (1983). Mineral Exploration by Remote Sensing Techniques in Nepal. Department of Mines and Geology, Lainchaur, Kathmandu, Nepal. Adv. Space Res., 3 (2), 49-54 p.
- Birch, F. (1966). Compressibility, elastic constants, in Clark, S.P., ed., Handbook of physical constants: Geological Society of America Memoir 97, p. 97–173.
- Calixto, L. (2017). Métodos geofísicos para la búsqueda de aguas subterráneas y prediseño de un pozo de extracción para la empresa Transavella, en la ciudad de Sogamoso, Boyaca. Trabajo Especial de Grado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Escuela de Ingeniería Geológica. 67 p.
- Campbell, J. y Wynne, R. (2011). Introduction to REMOTE SENSING. (5° Ed). The Guilford Press, New York, USA, 683 p.
- Campos, D. (1992). Procesos del Ciclo Hidrológico. 2da edición. San Luis de Potosí: Editorial Universitaria Potosina. cap. 4. 99 p.
- Cañizales, A., Peñuela, D., Díaz-Martín, M., Febres, O., Caldera, L., Valderrama y Mujica, E. (2006). Gestión integrada de los recursos hídricos en Venezuela. Informe del Proyecto de Gestión Integrada de Hídricos. Vitales. Caracas. 60 p.
- Casas, A., Himi, M., Díaz Y., Pinto, V., Font, X. y Tapias, J. (2008). Assesing aquifer vulnerability to pollutants by electrical resistivity tomography (ERT) at a nitrate vulnerable zone in NE Spain. Environ. Geol., 54, 515-520 p.
- Castany, G. (1972). Tratado Práctico de las Aguas Subterráneas.Ed. Omega. Barcelo, España. 347-348 p.
- Castaño, F. (2001). Aplicaciones de la Teledetección y SIG al control y cuantificación de las extracciones de agua subterránea. Centro Regional de Estudios del Agua. Instituto de Desarrollo Regiona. Castilla-La Mancha España. 141 p.
- Cavada, J. (2019). Guía de Geofísica de Campo 2019. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Copernicus (2019). Satélite Sentinel-2. Consultado 26 de febrero 2020. Recuperado de: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>

- Custodio, E. y Llamas, M. (1983). Hidrología Subterránea I y II. Ediciones Omega, S.A. Casanova, Barcelona. 220 p.
- Daza, F. (2012). Métodos geoelectrónicos aplicados a la exploración de aguas subterráneas y termales. Trabajo Especial de Grado. Universidad de Concepción, Chile. 256 p.
- Delgado, J. y Godoy, R. (2009). Elaboración de cartografía física elemental. Escala 1:20.000. OCW Universidad de Málaga, España.
- Dobrin, M. (1961). Introducción a la prospección geofísica. Ediciones Omega S.A. Barcelona, España. 483 p.
- Dobrin, M. (1988). Introducción a la Prospección Geofísica. 2da edición. Ediciones Omega S.A., Barcelona. 483 p.
- Durán, A., y Bravo de Guenni, L. (2010). Estimación probabilística del cambio climático en Venezuela mediante un enfoque bayesiano. Revista Colombiana de Estadística, 33 (2): 191–218 p.
- Encinas, G. (2016). Método de refracción sísmica. Georys Ingenieros S.A.C. Consultado 26 febrero 2020. Recuperado de: <http://www.georys.com/wp-content/uploads/2016/04/Presentacion-Refraccion.pdf>.
- Erdas Field Guide (2002).
- ESRI (2020). Sistemas de Información Geográfica. Consultado 24 febrero 2020. Recuperado de: <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n0000000t000000.htm>.
- Estrada, L. (2012). Prospección Geoelectrónica. Cátedra de Geofísica. Departamento de Geodesia y Topografía. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Universidad Nacional de Tucumán, Argentina. 20 p.
- Ewing, M., y Worzel, J. (1948). "Long-range sound transmission," Geol. Soc. Am. Mem. 27, 1-35 p.
- Fairfield, J y Leymarie, P. (1991). Drainage networks from grid digital elevation models. Water Resources Research, 27 (5), 709-717 p.
- Fernández, J. y Aranguren, A. (2016). Occurrence of the Groove-billed Toucanet, *Aulacorhynchus sulcatus*, and the Collared Aracari, *Pteroglossus torquatus nuchalis* (Aves: Ramphastidae), Cojedes, Venezuela. 17. 184-191 p.
- Figuerola, J. (1974). Tratado de geofísica aplicada (2da. Edición). Litoprint, Madrid. 520 p.

- Fofonoff, N. y Millard Jr, R. (1983). Algorithms for the computation of fundamental properties of seawater. Paris, France. UNESCO. UNESCO Technical Papers in Marine Sciences. (44) 53 p.
- Fortunecity (2010). Hidrogeología. Consultado 26 febrero 2020. Recuperado de: <http://www.fortunecity.com/campus/chemistry/195/hidro/hidro.htm>.
- FUNVISIS (2002). La investigación sismológica en Venezuela. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas. Caracas, Venezuela. Consultado 16 febrero 2020. Recuperado de: http://www.funvisis.gob.ve/archivos/pdf/libros/funvisis_1_18.pdf.
- Gabrecht, J y Martz, L. (1993). Network and subwatershed parameters extracted from digital elevation models: the bills creek experience. *Journal of the American Water Association*, 29 (6), 909-916 p.
- Gaspari F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, M., y Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la Cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. AUGMDOMUS. Asociación de Universidades Grupo Montevideo ISSN:1852-2181, 4, 143-158 p.
- Gavotti, R. (1973). Estudio preliminar sobre condiciones de aguas subterráneas en la "Región Bejuma-Montalbán" Edo. Carabobo. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Caracas, Venezuela. 71 p.
- Geosoft Inc. (2007). Montaj MAGMAP Filtering: 2D frequency domain processing of potential field data extension for Oasis montaj v.4. Tutorial. Canada. 82 p.
- González De Vallejo, L. (2002). Ingeniería Geológica. Madrid, España Prentice Hall. 715 p.
- Guartatanga, G. (2013). Sistema de información geográfica aplicado a la integración de Georeportes y Geoestadísticas de las empresas eléctricas de distribución del país integrando la información espacial con web services. Trabajo especial de grado. Universidad San Francisco de Quito. Ecuador. 98 p.
- Guenni, L., Degryze, E. y Alvarado, K. (2008). Análisis de la tendencia y la estacionalidad de la precipitación mensual en Venezuela. *Revista Colombiana de Estadística*, 31 (1): 41–65 p.
- Guevara, E. y Cartaya, H. (1991). Hidrología. Una introducción a la Ciencia Hidrológica Aplicada (1era edición). Gueca ediciones. Valencia, Venezuela, 358 p.
- Henaos, J. (1988). Introducción al manejo de cuencas hidrográficas. Bogotá, Colombia: Universidad Santo Tomás, Centro de enseñanza desescolarizada. 396 p.

- Heras, R. (1972). Métodos prácticos para el estudio de aguas superficiales y subterráneas. Publicación No. 85, Secretaría General Técnica, Ministerio de Obras Públicas, Madrid, España. 124, (3144): 277-290 p.
- Hernández, A. (2017). Métodos geofísicos para la determinación de características de acuíferos para su recarga artificial mediante lagunas de infiltración. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, ciudad de México. 71 p.
- Hernández, R. (2015). Uso de un Sistema de Información Geográfica como herramienta de apoyo para elaboración de georepresentación aplicado a un caso ambiental. Universidad Autónoma de Chiapas. México. p 179.
- Hidrografía Nurr (2014). Hidrografía en Venezuela. Consultado 26 febrero 2020. Recuperado de: <http://hidrografianurr.blogspot.com/p/hidrografia-de-venezuela.html>.
- Hinze, W., Aiken C., Brozena J., Coakley B., Dater D., Flanagan G., Forsberg R., Hildenbrand T., Randy G., Kellogg J., Kucks R., Li X., Mainville A., Morin R., Pilkington M., Plouff D., Ravat D., Roman D., Urrutia- Fucugauchi J., Véronneau M., Webring M. y Winester D. (2005). New standards for reducing gravity data: The North American gravity database. *Geophysics* 70(4): 25-32 p.
- Hispagua (2020). Tipos de acuíferos y otros conceptos. Consultado 26 febrero 2020. Recuperado de: <https://hispagua.cedex.es/datos/hidrogeologia#2>.
- Horton R. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions American Geophysical Union*. Washington, USA: 13: 350-361 p.
- IGVSB (2014). Red Gravimétrica Venezolana, benchmark San Blas, edo. Carabobo.
- INAMEH (sf). Base de datos de precipitaciones mensuales del estado Carabobo y Yaracuy. Caracas, Venezuela.
- Ingeniería Topográfica (2020). Satélite ALOS PALSAR. Consultado 27 febrero 2020. Recuperado de: <https://ingenieriatopografica.fandom.com/es/wiki/ALOS>.
- Instituto Nacional de Estadística (2011). Informe Geoambiental del estado Carabobo.
- Jaiswal R., Mukherjee S., Krishnamurthy J. y Saxena R. (2003). Role of remote sensing and GIS techniques for generation of groundwater prospect zones towards rural development--an approach, *International Journal of Remote Sensing*, 24:5, 993-1008 p.
- Jardí, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, 19, 41-68 p.

- Jha, M., Chowdary, V. y Chowdhury, A. (2010). Groundwater assessment in Salboni Block, West Bengal (India) using remote sensing, geographical information system and multi-criteria decision analysis techniques. *Hydrogeology Journal*, 18(7), 1713-1728 p.
- Julio, M. (1981). Prospección geolétrica de aguas subterráneas en la región de Barlovento. MARNR. Caracas, Venezuela. 19 p.
- Kalenov, E. (1957). Interpretación de curvas de sondeos eléctricos verticales. *Tecnologías carreteras Mopu*. (1era edición). Editor: Dirección general de carreteras, del Ministerio de Obras Publicas y Urbanismo. Versión en español, 429 p.
- Kearey, P., Brooks, M. y Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration* (3era edición). Oxford: Blackwell Science. 262 p.
- La Rosa, I. (2014). Los fundamentos de la percepción remota satelital. Consultado 27 febrero 2020. Recuperado de: <https://slideplayer.es/slide/3382500/>.
- Léxico Estratigráfico de Venezuela (L.E.V). (1999). *Petróleos de Venezuela, S.A. (PDVSA)*.
- Lombardo F. y Rojas M. (2000). Aplicaciones de imágenes Radarsat en los estudios geomorfológicos, caso de estudio: Cuenca del Río Bocono-Masparro. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas. 112 p.
- Lowrie, W. (2007). *Gravity, the figure of the earth y geodynamics Fundamentals of Geophysics* (2da edición). New York, Estados Unidos: Cambridge University Press. 373 p.
- Lyon, J. (2003). *GIS for Water Resources and Watershed Management*. (1era edición). Taylor & Francis e-Library, New York, United States. 274 p.
- Macas, V. y López, K. (2018). Potential areas for groundwater exploration in the Puyango Catamayo Hydrographic Demarcation, Ecuador, using an analytic hierarchy process based on GIS and remote sensing. *Revista de Teledetección*, 51:135-145 p. Recuperado de: <https://doi.org/10.4995/raet.2018.7592>.
- Madrucci, V., Taioli, F. y De Araújo, C. (2008). Groundwater favorability map using GIS multicriteria data analysis on crystalline terrain, São Paulo State, Brazil. *Journal of Hydrology*, 357(3-4), 153-173 p.
- Maillet, R. (1947). The fundamental equation of electrical prospecting. *Geophysics*, 12, 529–556 p.
- Martelo, M. (2003). *La precipitación en Venezuela y su relación con el sistema climático*. Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales, República Bolivariana de Venezuela. 40 p.

- Martelo, M. (2004). Consecuencias ambientales generales del cambio climático en Venezuela. Trabajo de Ascenso. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía. Maracay, Estado Aragua. 108 p.
- Martínez, M. (2008). Modelación gravimétrica de la porción oriental de la cuenca La Poza, asociando superficies geodésicas en el sistema global de referencias, municipio de Hermosillo, Sonora, México. Departamento de Geología. Universidad de Sonora. 126 p.
- Martínez, Z. (2011). Situación de los Recursos Hídricos en Venezuela. Asociación Venezolana para el Agua (AveAgua). (2da edición). Eds. Zoyla Martinez & Diego Díaz Martin. Caracas. 21 p.
- MasterGis (2019). Características del Sentinel. Consultado 26 febrero 2020. Recuperado de: <https://www.mastergis.com/caracteristicas-sentinel/>.
- Mederos, I. (2009). Modelaje geofísico de la región Farriar-Morón estados Yaracuy y Carabobo. Trabajo especial de grado. Departamento de Geofísica. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela, Caracas. 112 p.
- Menéndez A. (1966). Tectónica de la parte central de las montañas occidentales del Caribe, Venezuela. Boletín Geológico 8(15):154-155 p.
- Menéndez, V. (1965). Geología del área de El Tinaco, centro norte del estado Cojedes, Venezuela. Bol. Geol., Caracas. 6(12): 417-543 p.
- Mironov, V. (1977). Curso de prospección gravimétrica. Manual de estudio. (1era edición). Moscú: Editorial Reverte. 525 p.
- Moore I., Grayson, R. y Ladson A. (1991). Digital terrain modelling review of hydrological, geomorphological and biological applications. Hydrological Processes, 5:3-30 p.
- Morgan, A. (1967). Geology of the Valencia area, Carabobo, Venezuela (tesis de Ph.D.). Princeton, New Jersey, Princeton University. 220 p.
- Morgan, A. (1969). Geología de la región de Valencia, Carabobo, Venezuela. Bol. Geol., Caracas, 10(20): 3-136 p.
- Moritz, H. (1980). Geodetic Reference System 1980. Journal of Geodesy, 54, 395-405 p.
- Mosquera, L., y Parravano, V. (2005). Evaluación de la disponibilidad del recurso agua subterránea en el acuífero de la mesa de Guanipa, Estado Anzoátegui. Trabajo Especial de Grado. Universidad de los Andes, Mérida. 255 p.

- Musa, K., Akhir J. y Abdullah I. (2009). Groundwater prediction potential zone in langat basin using the integration of remote sensing and GIS. Recuperado de: <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2000/ps3/ps318.shtml>.
- Nampak, H., Pradhan, B. y Manap, M. (2014). Application of GIS based data driven evidential belief function model to predict groundwater potential zonation. *Journal of Hydrology*, 513, 283300. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.053>.
- NASA (2018). Satélite ALOS PALSAR Consultado 26 febrero 2020. Recuperado de: <https://trmm.gsfc.nasa.gov/>.
- Nuñez, G. (2015). Geología de la región Tinaquillo-Cachinche. Chaparrote, estados Cojedes, Carabobo y Guárico. UCV-G, 198 p.
- Nuñez J. y Pi J. (2021). Caracterización hidrogeológica de la subcuenca Bejuma del estado Carabobo, mediante el análisis de imágenes satelitales con sig e integración de datos geofísicos. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. 293 p.
- Olivar, M. y Pedrique R. (2006). Evaluación hidrogeológica del valle del río Tucutunemo, municipio Zamora, Estado Aragua. Trabajo Especial de Grado, UCV. 116 p.
- Olivares, B., Hernández, R., Coelho, R., Molina J., y Pereira, Y. (2017). Análisis espacial del índice hídrico: avances en la adopción de decisiones sostenibles en territorios agrícolas de Carabobo, Venezuela. *Revista Geográfica*. ISSN: 1011-484X, (60), 227-299 p.
- Olona, J. (2014). Integración de metodologías geofísicas para la caracterización geológico-geotécnica del terreno. Trabajo Especial de Grado. Universidad de Oviedo, España. 365 p.
- Omaña (2002). Integración de la geología de la zona de Morón –Valencia – Ocumare de la Costa Estados Carabobo y Aragua. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas. 322 p.
- Ordoñez, J. (2011). Ciclo hidrológico. Cartilla técnica de Perú. Lima, Perú. 41 p.
- Orellana, E. (1982). Prospección geoelectrica en corriente continua (2da edición). Paraninfo, Madrid – España. Volumen 1. 578 p.
- Organización de las Naciones Unidas (2018). Recursos de agua para la Agricultura. Consultado 26 febrero 2020. Recuperado de: <https://onu.org.ve/reutilizacion-de-aguas-residuales-urbanas-puede-favorecer-a-la-agricultura-y-disminuir-presion-sobre-los-recursos-naturales/>.

- FAO (2015). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, perfil de Venezuela. Consultado 26 febrero 2020. Recuperado de: <http://www.fao.org/aquastat/es/countries-and-basins/country-profiles/country/VENcastaño>.
- Osorio J. y Orejuela J. (2008). El proceso De Análisis Jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. *Scientia Et Technica*, vol. XIV, núm. 39, pp. 247-252 p.
- Osorio, A. y Morales, A. (2015). Informe preliminar sobre la delimitación de la Cuenca Alta del Río Cojedes Utilizando SIG y MED: Variaciones con los decretos 105 (1974) y 2.647 (1978). Instituto Venezolano Alemán de Ciencias Ecológicas Aplicadas (IVACEA). Aguirre, Edo. Carabobo.
- Ostos M. (1985). Evolución Tectónica del margen Sur-Central del Caribe basado en datos Geoquímicos. *Geos*, 30[1990]: 1-294 p.
- Pardo, E. (1998). Comparison of geostatistical methods for estimating the areal average climatological rainfall mean using data on precipitation and topography. *International Journal of Climatology*, 1031-1047 p.
- Pérez O., Bilham R., Bendick R., Hernández J., Hoyer R., Velandia J., Moncayo C. y Kosuch M. (2001). Velocidad relativa entre las placas del Caribe y Sudamérica a partir de observaciones dentro del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) en el norte de Venezuela. *Interciencia* 26: 69-74 p.
- Pérez, D. (2007). Introducción a los sensores remotos-Aplicaciones en geología. Dpto. Cs, Geológicas, F.C.E.N., U.B.A. 43 p.
- Podobnikar, T. (2016). Relevant Quality of Digital Elevation Models in Earth and Environmental Studies. *Int J Earth Environ Sci* 1: 106 p. doi: <https://doi.org/10.15344/2456-351X/2016/106>.
- Racca, J. (2007). Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno. *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología*, 77(1-2), 31-38 p.
- Rahmati, O., Nazari-Samani, A., Mahdavi, M., Pourghasemi, H., y Zeinivand, H. (2015). Groundwater potential mapping at Kurdistan region of Iran using analytic hierarchy process and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(9), 7059- 7071 p.
- Ramalingam, M. y Santhakumar A. R. (1999). Case study on artificial recharge using remote sensing and GIS. Recuperado de: <http://www.gisdevelopment.net/application/nrm/water/ground/watg0002.htm>.
- Rao B., Chaudhary B., Mothi K., Saroha G., Manoj Y., Ajeet Si., Sharma M., Pandey A. y Singh P. (2000). Integrated

Groundwater Resources Mapping in Gurgaon District, India using Remote Sensing and GIS Techniques. Recuperado de: <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2000/ts2/water0002.shtm>.

- Razandi, Y., Pourghasemi, H., Neisani, N. y Rahmati, O. (2015). Application of analytical hierarchy process, frequency ratio, and certainty factor models for groundwater potential mapping using GIS. *Earth Science Informatics*, 8(4), 867883. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/s12145-015-0220-8>.
- Rebollo, L. (2015). Clasificación hidrogeológica de las formaciones rocosas. Departamento de Geología, Universidad de Alcalá.
- Reid, A., Allsop, L., Granser, H., Millet, A., and Somerton, I. (1990). Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, 55: 80-91 p.
- Reyes, J. (2020). Caracterización hidrogeológica de la subcuenca Montalbán mediante el análisis multicriterio de imágenes satelitales y la interpretación de datos geoelectricos. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, 11(2), 162-183 p.
- Reyes, R. y Rodriguez, E. (2013). Geofísica aplicada a la búsqueda de agua subterránea en depósitos aluviales. Caso de estudio arenas algaba. V Congreso cubano de geofísica. *Geociencias 2013. Memorias*. La Habana, Cuba.
- Reynolds, J. (1997). An introduction to applied and environmental Geophysics. Willey. 234-236 p.
- Rod, E. (1956). Strike-slip faults of northern Venezuela. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 40: 457-476 p.
- Rodrigo, G., Rinaldi, V. y Taborda, R. (2004). Tomografía geoelectrica: desarrollo y potenciales aplicaciones en geotecnia. Facultad de Ciencias Exactas Física y Naturales, Universidad Nacional de Cordoba, Argentina. 20 p.
- Saaty, T. (1980). *The Analytical Hierarchy Process*. USA, Mc Graw Hill.
- Salas, V. y Castillo, R. (2012). Venezuela: Gestión integrada de cuencas en el Estado Carabobo. Caso de estudio para la Toolbox de Global Water Partnership Sudamérica. 13 p.
- Sanders, L. (1998). *A manual of field hydrogeology*. Prentice-Hall, 381 p.
- Schubert, C. (1980). Basin formation along the Boconó-Morón-El Pilar fault system, Venezuela. *Jour. of Geophysical Research*. B. 89(7): 5711-5718 p.
- Schuck, A. y Lange, G. (2007). *Environmental Geology Handbook of Field Methods and Case Studies*. Geophysics, Chapter 4.6: Seismic Methods. Berlin. 66 p.

- Seiders, V. (1965). Geología de Miranda central, Venezuela. Bol. Geol., Caracas, 6(12): 289-416 p.
- Sendrós, A. (2012). Aplicación de parámetros geoelectricos en el estudio de las aguas subterráneas (cuenca de Valls, Tarragona). Trabajo de investigación. Universidad de Barcelona. 65 p.
- Shahid, S., Nath, K. y Roy J. (2000). Groundwater potential modelling in a soft rock area using a GIS. International Journal of Remote Sensing. 21:9, 1919-1924 p.
- Shiklomanov, I. (1997). "Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world". Informe E/CN. 17/1997/9. Publicado por la Organización Meteorológica Mundial. 88 p.
- Significados (2020). Representación ciclo hidrológico. Consultado 26 febrero 2020. Recuperado de: <https://www.significados.com/ciclo-del-agua/>.
- Silva, A. (2015). Adquisición y procesamiento de datos gravimétricos en la región Noroccidental de Venezuela (tesis de pregrado). Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. 111 p.
- Spector, A., y Grant, F. (1970). Statistical Models for Interpreting Aeromagnetic Data. Geophysics, 35 (2), 293-302 p.
- Stanley, D. (1971). Hidrogeología. (2da Edición). Ed. Ariel. Barcelona, España. 563 p.
- Tahal Ingenieros de Venezuela, S. (1970). Estudio para el desarrollo de los recursos de aguas subterráneas en las regiones de Valencia, Barquisimeto, Coro, Pedregal, Maracaibo, Región de Valencia. Vol. II, INOS.
- Talwani, M., Worzel J. y Landisman M. (1959). Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. J. Geophys. Res., 64, 49-61 p.
- Tapia, S., Oyarzún, R., Núñez, J. y Oyarzún, J. (2015). Identificación de zonas potenciales de recarga de aguas subterráneas en el sector de la mina Brillador. En: XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena, Chile, 4-8 Agosto. 622-625 p.
- Tapiquen, (2020). Capas temáticas de Venezuela. Consultado 05 de abril 2020. Recuperado de: <https://tapiquen-sig.jimdofree.com/descargas-gratuitas/venezuela/capas-tem%C3%A1ticas/>.
- Teeuw, R. (1995). Groundwater exploration using remote sensing and a low-cost geographical information system. Hydrogeology Journal, 3(3). Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/s100400050057>.

- Telford, W., Geldart, L., y Sheriff, R. (1990). *Applied geophysics* (2da edición): Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press. 748 p.
- Telford, W., Geldart L. y Sheriff R. (2004). *Gravity Methods Applied Geophysics* (2da edición). New York, Estados Unidos: Cambridge University Press. 748 p.
- Thokala, P. (2012). Multiple Criteria Decision Analysis for Health Technology Assessment. *Value in Health*. 15(8):1172-81 p.
- Thomas K. y Lowe M. (2007). Áreas de recarga y descarga para el acuífero principal de relleno de cuencas, el área de Beryl-Enterprise, los condados de Iron, Washington y Beaver, Utah. *Estudio Geológico de Utah, división del departamento de recursos naturales*. 14 p.
- Thompson, D. (1982). "EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data". *Geophysics*, 47 (1): 31-37 p.
- Toledo, J. (2018). *Procesamiento e interpretación de datos gravimétricos de la Región de Parguaza, Estado Carabobo. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela*. 82 p.
- Toskano, G. (2005). *El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la Selección de Proveedores. Trabajo Especial de Grado. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ciencias Matemáticas, Lima Perú*. 90 p.
- Tucci, C. (2004). *Hidrologia: ciência e aplicação*. 3.ed. Porto Alegre, ABRH: 943-47 p.
- U.S. Army Corps of Engineers. (1995). *Geophysical exploration for engineering and environmental investigations. Manual No. 1110-1-1802*. Washington, DC. 10 p.
- Urbani, F. y Ostos, M. (1989). *El Complejo Ávila, Cordillera de La Costa, Venezuela. Geos, UCV, Caracas*, 29: 205-217 p.
- Urbani, F. (2012). *Conversaciones sobre la geología de la Cordillera de la Costa- ¿Donde y cuando se formaron las distintas unidades que conforman la Cordillera? Geos, UCV, Caracas, Venezuela*.
- Urbani, F. (2015). *Geología de la región septentrional de los estados Lara y Yaracuy. Ediciones electrónicas Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat, Caracas*. Recuperado de: http://www.acading.org.ve/info/comunicacion/criterio_opinion/sillon.
- Urbani, F. y Rodríguez, J. (2004). *Atlas geológico de la Cordillera de la Costa, Venezuela. Caracas: Fundación Geos-UCV and Funvisis, xii + 146 mapas a escala 1:25.000*.

- Venemia (2020). Clima de Venezuela. Consultado 27 febrero 2020. Recuperado de:
<http://www.venemia.com/Vzla/VzlaClima/VeneClima1.php>
- Vila, M. (1965). Aspectos Geográficos del Estado Guárico. Corporación Venezolana de Fomento, División de Estudios Generales, Venezuela 235 p.
- Wehrmann, M. (1972). Geología de la región de Guatire - Colonia Tovar. Bol. Geol., Caracas, Public. esp. 5, 4: 2093-2119 p.
- Werner, J. (1996). Introducción a la Hidrología. (1era edición). Universidad Autónoma de Nuevo León, México. 168 p.
- Ynfante, M. (2017). Integración geológica de la región comprendida entre Palmasola, Morón y Valencia, Estados Yaracuy y Carabobo. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 169 p.
- Yoris, F., y Ostos, M. (1997). Geología de Venezuela: Geología general y cuencas petrolíferas. Texas: Jolley Printing. 24-44 p.
- Zozaya, N., Moreno J. y Hidalgo A. (2019). La utilidad y alcance del análisis de decisión multi-criteio en el ámbito sanitario. Departamento de Economía de la Salud. Weber. Universidad de Castilla La Mancha. 4(2),356-367 p.

APÉNDICE A

Imágenes y tablas que complementan el capítulo II, correspondiente al marco geológico.

➤ **A.1 Mapas geológicos de la zona.**

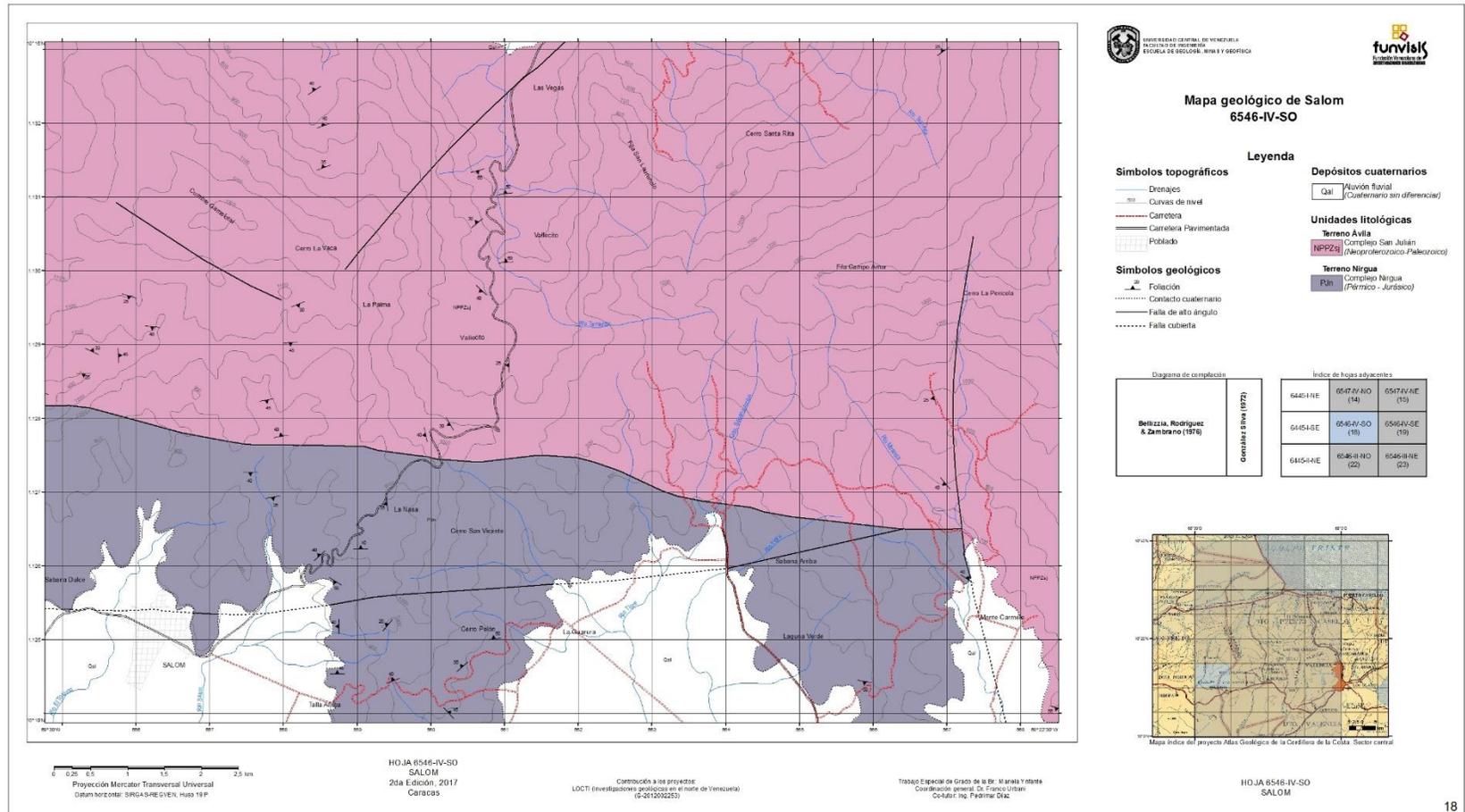


Figura A.1 Mapa geológico de Salom (tomado de Ynfante, 2017).

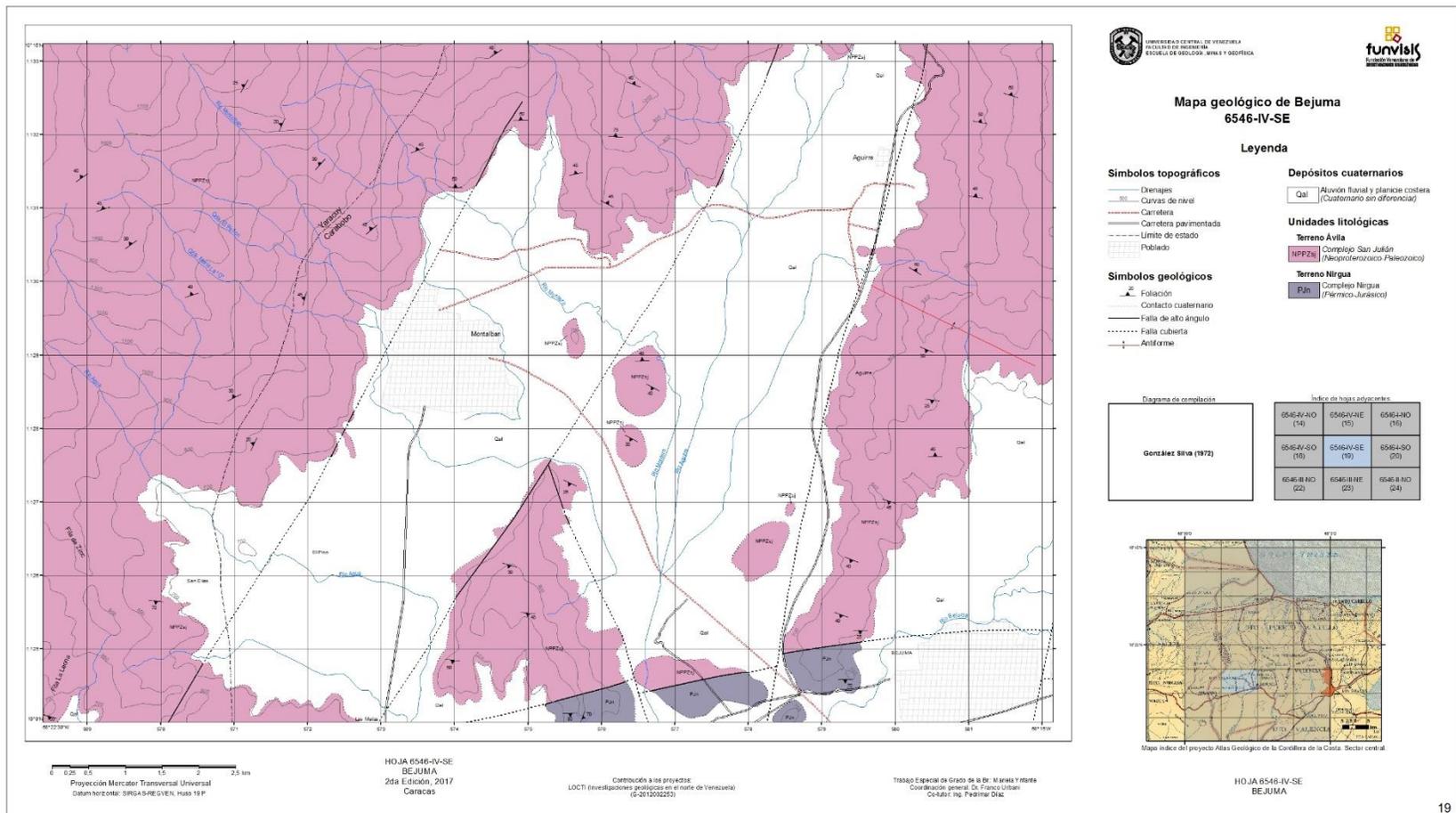


Figura A.2 Mapa geológico de Bejuma (tomado de Ynafante, 2017).

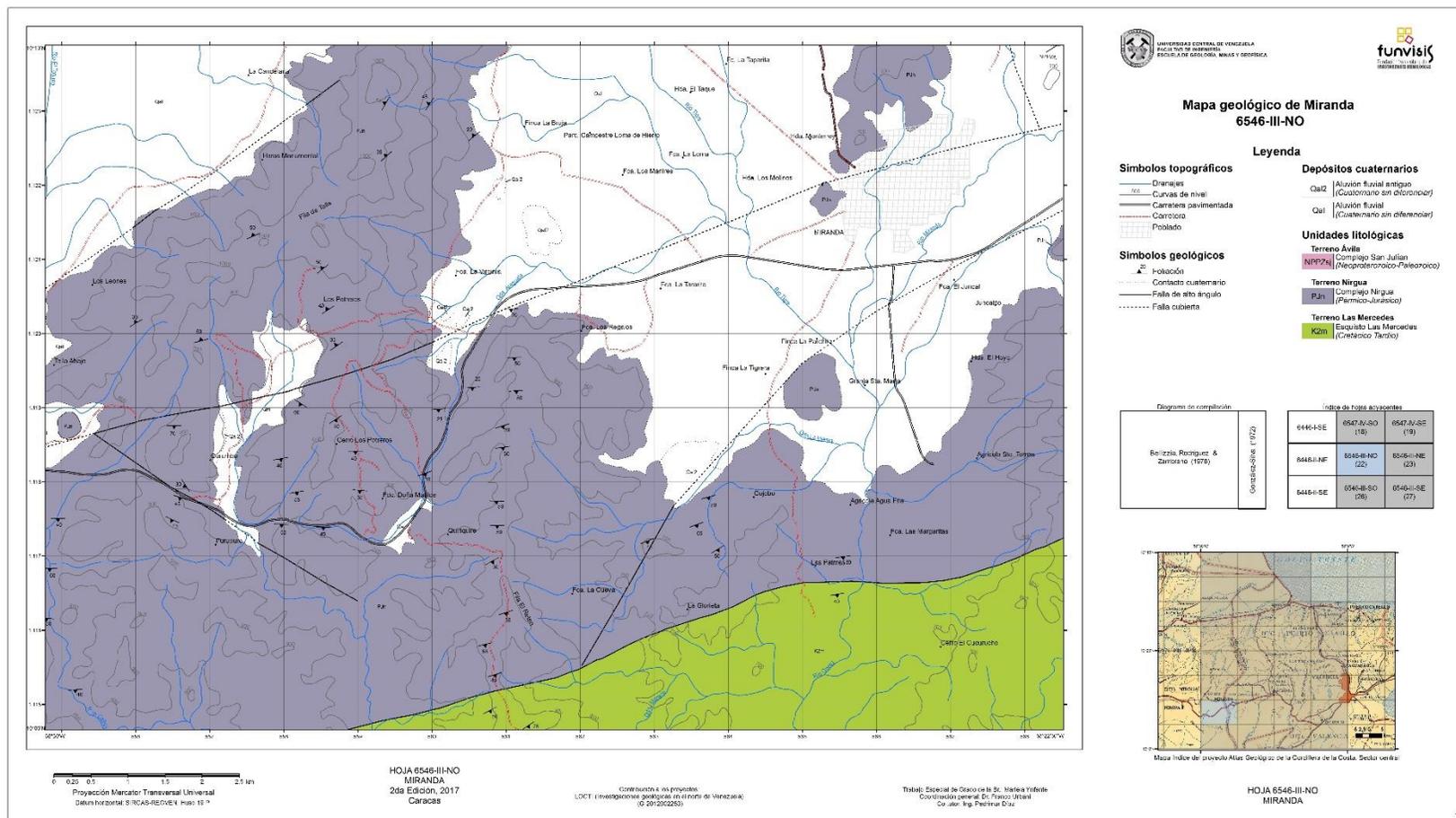


Figura A.3 Mapa geológico de Miranda (tomado de Ynfante, 2017).

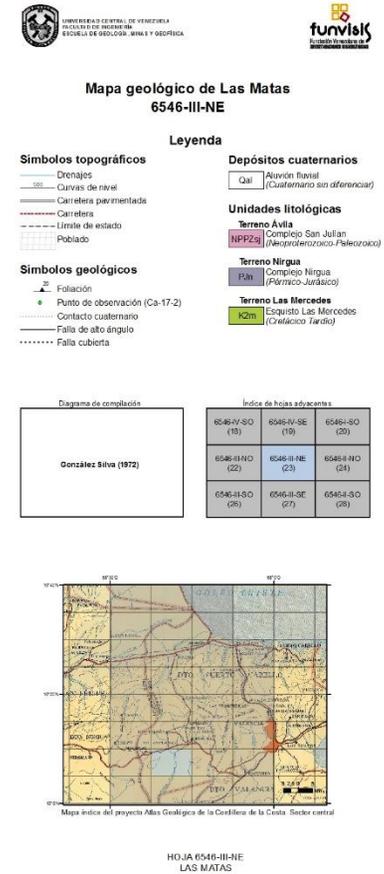
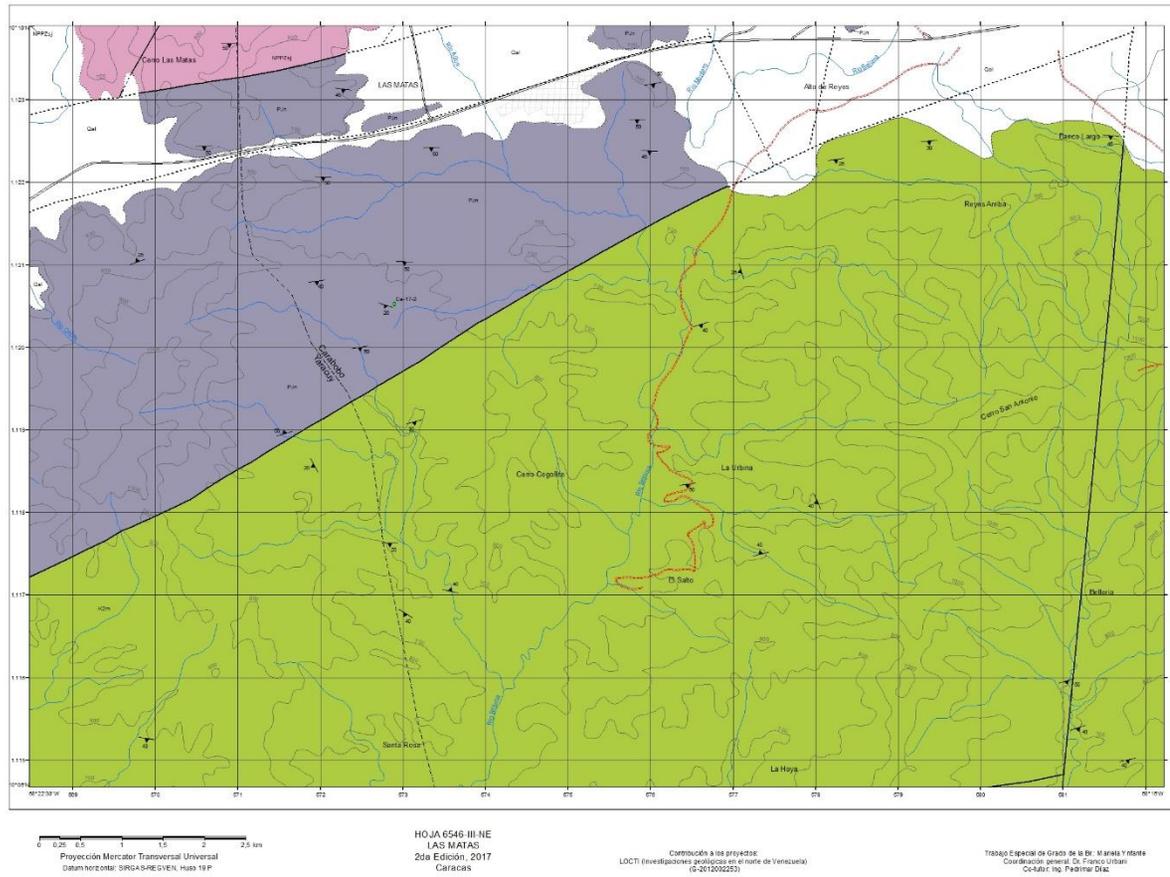


Figura A.4 Mapa geológico de Las Matas (tomado de Ynfante, 2017).

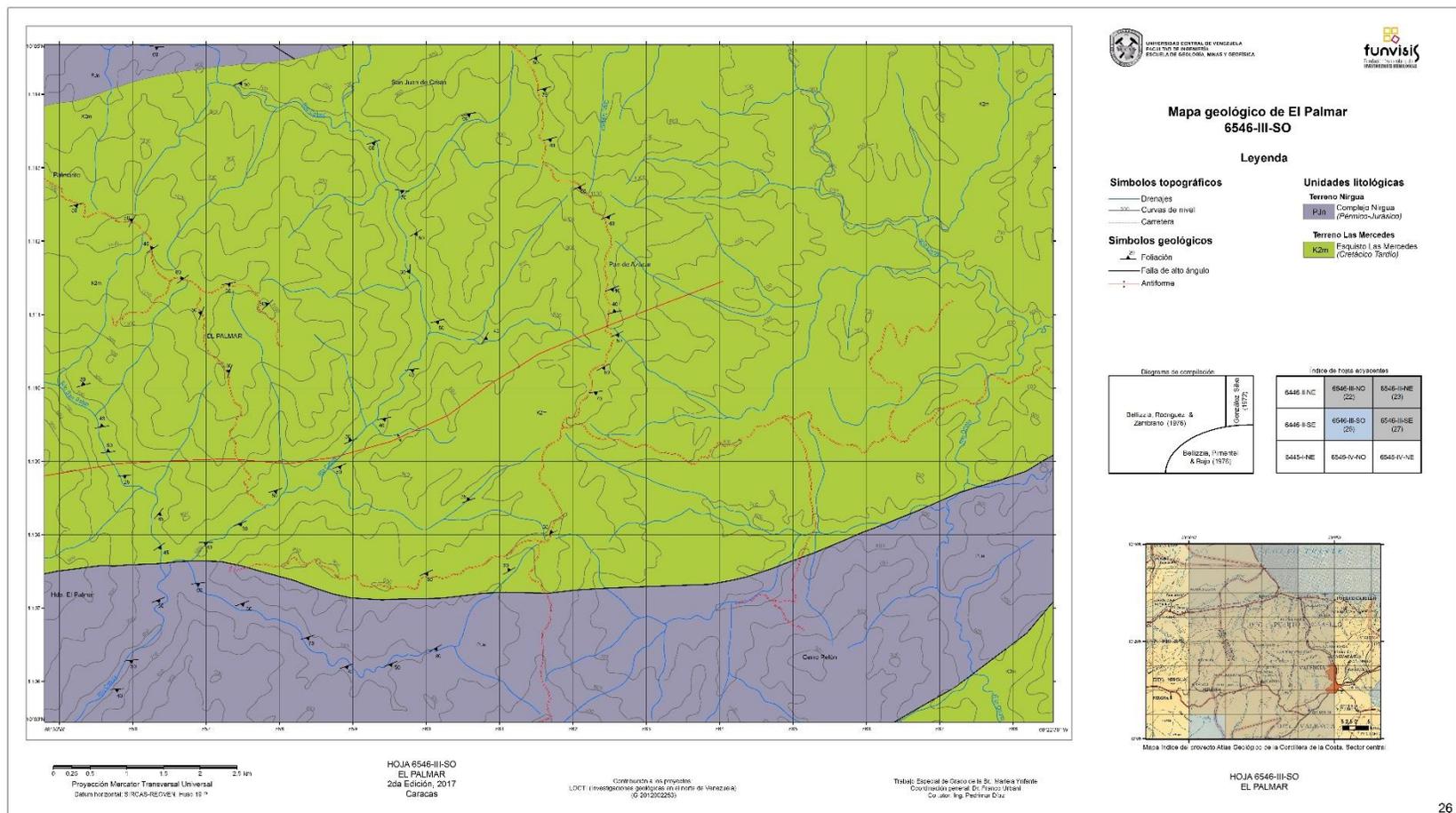


Figura A.5 Mapa geológico de El Palmar (tomado de Ynfante, 2017).

APÉNDICE B

Imágenes y tablas que complementan el capítulo V, correspondiente al marco metodológico.

➤ **B.1 Información de pozos preexistentes en la zona de estudio (pre-adquisición).**

Tabla B.1 Información de pozos preexistentes en la zona de estudio

Pozos cercanos a la subcuenca hidrogeográfica de Miranda (estados Carabobo y Yaracuy)											
Sitio	Norte (m)	Este (m)	Profundidad perforada (m)	Profundidad entubada (m)	Nivel freático (m)	Gastos	Nivel dinámico	Diámetro de tubería	Litología	Tope (m)	Base (m)
Comunidad de Miranda	1122531.94	566155.86	50.6	50.3	9.40	5		8	Arcilla	0	6.1
									Arcilla arenosa	6.1	9.15
									Grava arcillosa	9.15	12.2
									Grava	12.2	18.3
									Arena gruesa	18.3	24.4
									Arena fina	24.4	30.5
									Arena gruesa	30.5	50.33
Las Clavellinas	1122228.88	568317.10	73.0	73.0	7.60	15	57.90	10	Arcilla arenosa	0	7.62
									Arena	7.62	9.14
									Arcilla	9.14	12.19
									Arena gravosa	12.19	15.24
									Grava gruesa	15.24	50.29
									Grava arcillosa	50.29	71.62
									Guijarros	71.62	75.15
Hda las Clavellinas	1121829.01	568013.54	54.9	54.9	9.10	21	44.80	10	Arcilla	0	9.14
									Grava gruesa	9.14	11.27
									Arcilla	11.27	18.28
									Grava arcillosa	18.28	51.8
									Cantos rodados	51.8	54.86
Hda el tanero	1121456.15	565731.81	68.0	68.0	3.00	17	20.00		Capa vegetal	0	0.5
									Arcilla arenosa	0.5	13
									Arena gravosa	13	28
									Arcilla	28	33
									Grava	33	38
									Arcilla arenosa	38	68

Pozos cercanos a la subcuenca hidrogeográfica de Miranda (estados Carabobo y Yaracuy)											
Sitio	Norte (m)	Este (m)	Profundidad perforada (m)	Profundidad entubada (m)	Nivel freático (m)	Gastos	Nivel dinámico	Diámetro de tubería	Litología	Tope (m)	Base (m)
Hato viejo	1124827.63	561769.74	80.0						Capa vegetal	0	1
									Arcilla lenticular	1	10
									Arena cuarcítica	10	20
									Arcilla lenticular	20	30
									Arena cuarcítica	30	33
									Arcilla abigarrada	33	35
									Arena cuarcítica	35	50
									Arcilla compacta	50	80
Asent la trinidad	1124309.37	563961.59	81.0	81.0	6.52	8	18.00	8	Arcilla y capa vegetal	0	1
									Arcilla arenosa	1	3
									Limo arcillo-gravoso	3	9
									Arena arcillosa	9	13
									Arcilla limosa	13	20
									Arcilla	20	21
									Arcilla areno-gravosa	21	23
									Limo areno-arcilloso	23	24
									Arena arcillosa	24	31
									Grava arcillosa	31	40
									Arcilla limosa	40	41
									Arena limo-arcillosa	41	51
									Limo arcillo-arenoso	51	55
									Grava areno-arcillosa	55	73
Limo arcillo-arenoso	73	78									
Grava arenosa	78	81									
El Milagro	1122370.62	569213.37	90.0	90	15				Capa vegetal	0	0.5
									Grava arcillosa	0.5	6
									Grava	6	90

➤ **B.2. Tablas con los materiales utilizados para la adquisición de los datos geofísicos.**

Tabla B.2 Instrumentos utilizados para la adquisición de eléctricos

Instrumentos utilizados	
Cantidad	Equipo
1	Planta eléctrica <i>Porter Cable 5250 Watt</i> modelo <i>BSI525-w</i>
1	Una rectificadora con entrada de 110 VCA y salida de 1500 VCC
2	Carretes de cable de 200 m (MN)
2	Carretes de cable de 500 m (AB)
19	Electrodos de acero con galvanizado de cobre
1	Carrete de cable a tierra
5	Extensiones. Bananos
1	Cable fuente
2	Multímetro digital <i>UNI-T</i> modelo <i>UT33C</i>
1	Anulador de voltaje
1	Multímetro digital <i>UNI-T</i> modelo <i>UT60B</i>
2 pares	Cable para multímetro
4	Cintas métricas
6	Radiotransmisores <i>BAOFENG</i>
1	Posicionador satelital (GPS) <i>GARMIN</i> modelo <i>GPSmap 76C x</i>
4	Mandarria pequeña
2	Extensión eléctrica
4 pares	Guantes
4	Loseta plástica para aislamiento eléctrico del equipo

Tabla B.3 Instrumentos utilizados para la adquisición de datos sísmicos

Instrumentos utilizados	
Cantidad	Equipo
1	Laptop marca <i>Dell</i>
1	Sismógrafo marca <i>Geometrics</i> / 24 canales
1	Carrete cable <i>trigger</i>
1	Cable <i>trigger</i> (caimanes)
1	Cable ethernet
1	Cable de alimentación
1	Cable sísmico de 20 canales
1	Tapa oídos
4 pares	Guantes
1	Cinta métrica de 50 m
1	Batería de capacidad 12 V
4	Radiotransmisores marca <i>BAOFENG</i>
1	Posicionador satelital <i>GARMIN</i> modelo <i>eTrex 10</i>
1	Mandarria de 9 kg (fuente sísmica)
25	Geófonos de componente P marca <i>Geospace</i>
1	Placa metálica
1	Loseta plástica aislante

Tabla B.4 Instrumentos utilizados para la adquisición de datos a través de métodos gravimétricos.

Instrumentos utilizados	
Cantidad	Equipo
1	Gravímetro marca <i>Scintrex CG-5 Autograv</i>
1	Posicionador satelital modelo: <i>Garmin eTrex 10</i>
2	Batería para el gravímetro
1	Trípode para la nivelación del gravímetro
1	Cable de alimentación de energía para cargar el gravímetro
1	Cable USB para descargar los datos del gravímetro

➤ B.3. Procedimiento de adquisición de los métodos eléctricos

1. Antes de empezar la adquisición se realizó una evaluación de la zona de estudio para buscar los lugares con mayor facilidad de acceso y que correspondieran con las zonas de mayor potencial acuífero determinado previamente.
2. Se realizó una revisión y prueba de todos los equipos que se usarían, con el fin de comprobar su buen funcionamiento y de esta manera evitar inconvenientes y retrasos innecesarios en la adquisición.
3. Se determinó el tipo de dispositivo a usar basados en los objetivos planteados, en este caso fue el dispositivo tetraelectródico tipo Wenner ya que representa uno de los métodos más comunes, preciso y no requiere la realización de empalmes que demorarían el proceso de medición, dadas las grandes distancias de los tendidos.
4. Se determinaron los parámetros requeridos para la adquisición de los datos, tales como longitud del sondeo (según el espacio disponible) y orientación de los sondeos.
5. Las distancias de los electrodos de corriente con respecto al punto de atribución debían seguir una progresión geométrica, la cual se determinó siguiendo los lineamientos especificados en la sección 4.38 (distancia de electrodos de corriente para lo cual se fijaron los parámetros: $n=10$ (para mayor precisión), $X_0 = 2$ y $C=1,259$ (fue calculado según la ecuación 4.14). La tabla B.5 indica las distancias $AB/2$ según la progresión planteada.

Tabla B.5 Distancias AB/2 según la progresión geométrica determinada.

Posición	AB/2 (m)	Posición	AB/2 (m)
1	2	14	39.91
2	2.52	15	50.24
3	3.17	16	63.25
4	3.99	17	79.62
5	5.02	18	100.24
6	6.32	19	126.19
7	7.96	20	158.87
8	10.02	21	200
9	12.62	22	251.79
10	15.89	23	316.98
11	20	24	399.05
12	25.18	25	502.38
13	31.7		

6. En base a la progresión geométrica planteada, se determinó la disposición de los electrodos de corriente (AB) y potencial (MN) en el terreno, la cual debía cumplir la siguiente distancia $MN=AB/3$. En la figura B.1. se presenta la configuración general para un sondeo tipo Wenner.

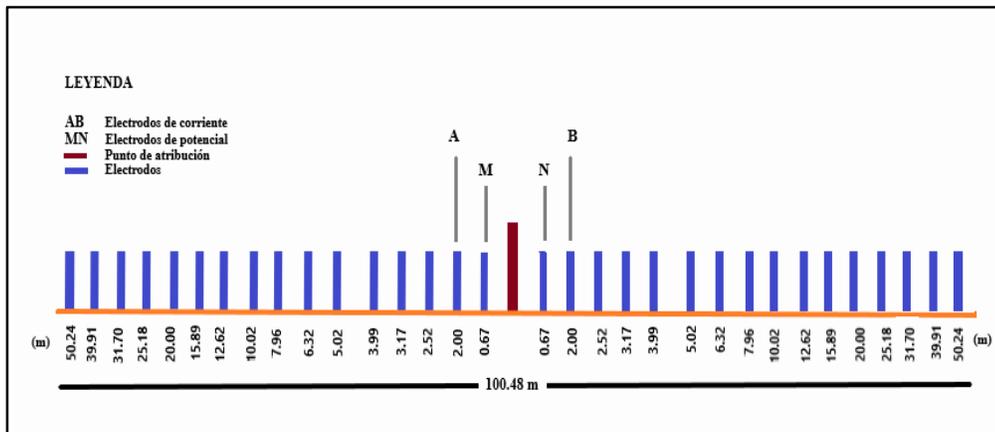


Figura B.1 Configuración general para un dispositivo tipo Wenner con su respectiva progresión geométrica (la longitud del tendido varía dependiendo del espacio disponible).

7. Se procedió a la instalación del circuito de medición, el cual consistió en un multímetro conectado en serie con la rectificadora, en la función de medición de corriente, con los extremos libres conectados a los dos electrodos de corriente A y B y un multímetro, en la función de medición de voltaje,

conectado en paralelo al anulador de potencial espontáneo y este a su vez a los electrodos de potencial M y N.

8. Una vez instalado el dispositivo, se procedió a tomar las coordenadas y cotas del punto medio (punto de atribución) y los extremos del sondeo con el posicionador satelital GPS, todas las coordenadas están referidas al datum geodésico WGS84.
9. Se realizó una prueba de línea con el fin de verificar la continuidad en el circuito, la cual consiste en pasar corriente al terreno con la rectificadora apagada. Esto permite comprobar que los electrodos A y B reciben corriente y no hay fuga en los cables del tendido.
10. Manteniendo la rectificadora apagada, se procedió a anular el potencial espontáneo con el instrumento dispuesto para ello, haciendo que el multímetro que mide el voltaje indicara 0 voltios. El valor del potencial espontáneo anulado fue reportado como información adicional para llevar un control de calidad de las mediciones.
11. En cada paso de separación entre electrodos, se aplicaron cuatro impulsos de corriente al terreno de valores constantes y con polaridad alternada.
12. Mientras se realizaban las mediciones de corriente aplicada y potencial inducido al terreno, se calcularon las resistividades aparentes de forma inmediata y se graficó la curva de resistividad aparente, esto con el fin de detectar cualquier medición defectuosa y determinar si era necesario repetir alguna medición.
13. Solo cuando fue necesario, se les colocó solución salobre (agua con sal) a los electrodos para mejorar el acoplamiento eléctrico de éstos con la superficie del suelo.

➤ **B.4. Procedimiento de adquisición de los sondeos de refracción sísmica**

1. Antes de empezar la adquisición se realizó una evaluación de la zona de estudio para buscar los lugares que puedan llegar a cumplir con los objetivos planteados.
2. Se realizó una revisión y prueba de todos los equipos que se usarían, con el fin de comprobar su buen funcionamiento y de esta manera evitar inconvenientes y retrasos innecesarios en la adquisición.
3. Se configuraron los parámetros de adquisición para el diseño de la geometría del tendido, tales como la longitud (aproximadamente 200 m para todos los tendidos), la cual varía según el espacio disponible, y se fijó una distancia constante entre geófonos (5 m). En la figura B.2 se representa la configuración utilizada generalmente, la cual puede variar dependiendo de los objetivos o condiciones del terreno.
4. Se instaló el equipo sísmico según la configuración establecida y se realizaron todas las conexiones al sismógrafo y laptop.
5. Una vez encendida la laptop se configuraron los parámetros de adquisición en el software *Geometrics*, tales como duración del registro, intervalo de muestreo, cantidad de muestras por trazas, apilamiento (usualmente eran 10 *stacks* en los extremos y 5 en el centro), distancia fuente-receptor u *offset* (2.5 m) y posición de la fuente (esto varió según las condiciones y circunstancias).
6. Se procedió a tomar las coordenadas y cotas de los extremos del tendido y de cada posición de la fuente con el posicionador satelital (GPS), todas las coordenadas están referidas al datum geodésico WGS84.
7. Antes de iniciar las mediciones se procedió a realizar una “prueba de ruido”, la cual consistió en comprobar el buen funcionamiento de los geófonos. En caso de haber geófonos o canales dañados, los mismos se anularon o congelaron desde el software. Esta prueba también sirvió para verificar en el software la polarización de los tendidos y la correcta ubicación de la fuente.
8. Una vez instalado el tendido, se procedió a generar ondas sísmicas artificiales mediante el impacto de una mandarria a una placa metálica. La repetición de

impactos sobre esta placa para una misma posición de la fuente, permite garantizar la calidad del registro mediante la reducción del ruido por el apilado de las trazas sísmicas.

9. Para cada posición de la fuente se repitió el procedimiento.

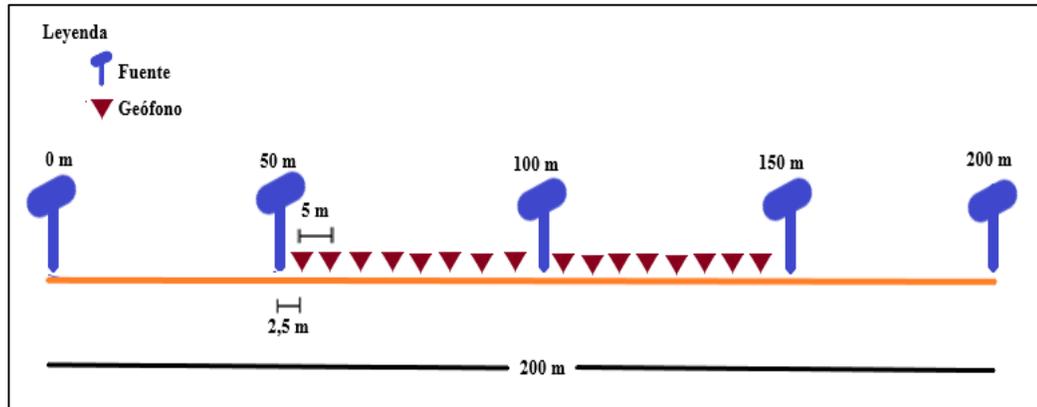


Figura B.2 Configuración general de la geometría de una refracción sísmica de onda P para un tendido de 200 m.

➤ B.5. Procedimiento de adquisición de métodos gravimétricos

1. Se definió el circuito a realizar durante el día de adquisición
2. Se configuró el gravímetro introduciendo las coordenadas geográficas y altura correspondientes, además del nombre del circuito.
3. Para el levantamiento de las estaciones ordinarias se utilizó el método del circuito cerrado el cual se puede observar en la figura B.3.
4. El circuito se abrió o se inició tomando las lecturas en la estación base (tercer orden).
5. Posteriormente, se realizaron las mediciones en las siguientes estaciones, en cada levantamiento se niveló el gravímetro y se verificaron los resultados a medida que se iban registrando, debido a que factores como el viento pueden alterar las mediciones. Para ello, se verificaba que los *tilts* estuvieran entre -5 y 5, que la desviación estándar fuera menor a 0.05 y el error fuese menor 0.02.

6. Finalmente, una vez completado el levantamiento, se cerraba cada circuito en la estación base (tercer orden).

LEYENDA

- **Estación base (3er orden)**
- **Estaciones ordinarias**

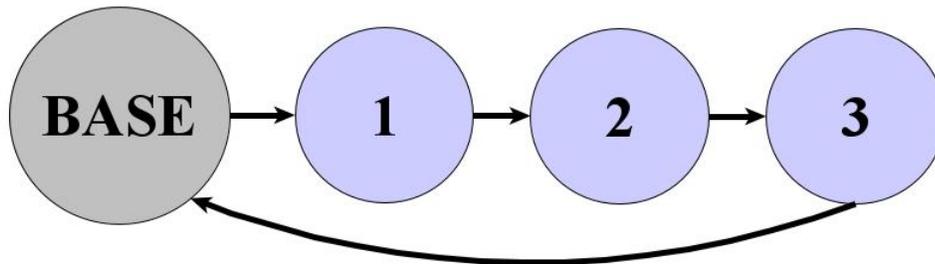


Figura B.3 Esquema general del circuito cerrado empleado para la adquisición de datos gravimétricos

➤ B.6. Estación gravimétrica de orden 2 (Benchmark en San Blas)

 INSTITUTO GEOGRÁFICO DE VENEZUELA SIMÓN BOLÍVAR									
RED GRAVIMÉTRICA VENEZOLANA									
ESTACION: San Blas					PAIS: Venezuela		ESTADO: Carabobo		
MUNICIPIO: Valencia					ORDEN: 2				
Fecha de levantamiento: Noviembre 2014					Fecha de publicación: 1er trimestre de 2016				
COORDENADAS GEODESICAS					COORDENADAS UTM (DATUM SIRGAS-REGVEN)			GRAVEDAD (mgal)	
LATITUD:	10°	09'	1,2421" N	h (m)	NORTE (m)	ESTE (m)	HUSO		
LONGITUD:	68°	02'	16,3424" W	454,09	1122191,212	605400,654	19	978047,411	
CROQUIS					ACCESO				
					DESCRIPCIÓN: El monumento se encuentra saliendo de la redoma San Blas vía tocuyito, se llega al distribuidor La Florida a 7 Km. El punto se encuentra en los restos de la plaza monumento José Antonio Páez. El punto es una placa empotrada en el piso de la plaza.				
					ALTURA DEL SENSOR : 0,26 m				
					ALTURA DEL MONUMENTO : 0,15 m				
					NOTA: El valor de gravedad reflejado en esta ficha está referido al sensor del equipo.				
MONUMENTO DE REFERENCIA									
					Red Geocéntrica de Venezuela, Orden C (REGVEN C).				
FOTOGRAFIA PANORÁMICA					FOTOGRAFIA ESTACIÓN				
									
OPERADORES: Ana Silva									
EQUIPO: CG-5					SERIAL: 482 / 412 / 469				
INSCRIPCIÓN PLACA: GPS Excéntrica del BM IV 4.4.85									

Figura B.4 Información de la estación San Blas, Carabobo. (Tomado de IGVSB, 2014).

➤ **B.7 Estación gravimétrica de tercer orden (base en Montalbán)**

ESTACIÓN GRAVIMÉTRICA DE MONTALBÁN					
ESTACIÓN: Plaza Bolívar			PAÍS: Venezuela		
MUNICIPIO: Montalbán			ESTADO: Carabobo		
Fecha de levantamiento: 06 de abril de 2019			ORDEN: 3		
COORDENADAS GEODESICAS			COORDENADAS UTM (SATUM WGS-84)		GRAVEDAD (mgal)
LATITUD	10° 12' 53.136" N	COTA (m)	NORTE (m)	1129233.58	
LONGITUD	68° 19' 44.328" W	662	ESTE (m)	573493.561	19P
CROQUIS			ACCESO		
			Descripción: La estación está ubicada en la Plaza Bolívar de Montalbán, frente a la parroquia de la Iglesia. Justo encima de la Placa de la red geodésica municipal.		
			MONUMENTO DE REFERENCIA		
			Red Geodesica Municipal 2012		
FOTOGRAFÍA PANORÁMICA			FOTOGRAFÍA ESTACIÓN		
					
OPERADORES: ESTUDIANTES DE GEOFÍSICA DE CAMPO 2019					
EQUIPO: CG-5					
INSCRIPCIÓN PLACA: RED GEODESICA MUNICIPAL IGVSB PLAZA BOLIVAR 2012					

Figura B.5 Información de la estación gravimétrica de Montalbán, Carabobo (elaboración propia).

APÉNDICE C

Imágenes y tablas complementarias de los resultados obtenidos a partir de métodos eléctricos correspondientes al capítulo V.

➤ **C.1. Resistividades aparentes generales de todos los sondeos eléctricos verticales**

Tabla C.1 Resistividades aparentes de todos los sondeos eléctricos verticales originales

SONDEO	SEV-01	SEV-02	SEV-03	SEV-04	SEV-05	SEV-06	SEV-07	SEV-08	SEV-09	SEV-10	SEV-11	SEV-12	SEV-13	SEV-14	SEV-15	SEV-16
AB/3 (m)	pa (Ω m)															
1.33	205.02	157.76	528.18	51.70	65.77	118.25	204.78	86.67	35.42	60.36	76.35	300.36	152.31	26.73	795.63	135.77
1.68	149.49	187.56	541.15	55.02	73.16	138.60	230.82	104.26	47.66	55.44	87.99	342.51	143.10	28.00	784.38	182.54
2.11	127.65	215.58	565.22	62.78	83.53	149.55	252.26	114.24	53.99	47.31	98.24	340.00	132.30	29.87	800.16	213.59
2.66	112.41	257.54	529.10	46.25	103.12	162.88	284.32	124.99	58.75	44.56	114.04	328.48	111.71	31.87	790.19	225.43
3.34	85.78	278.23	513.76	30.81	110.97	169.13	309.00	131.53	56.50	44.30	124.85	296.46	91.91	28.29	789.90	232.59
4.20	74.81	292.07	469.89	41.80	83.11	176.79	334.47	137.34	52.27	46.31	127.07	243.21	77.78	28.81	756.87	254.79
5.31	49.15	318.09	403.70	39.13	66.83	185.07	348.99	135.68	50.52	48.26	135.30	182.73	70.26	29.36	717.85	288.65
6.68	48.10	319.09	333.68	34.46	56.33	185.00	374.25	134.71	50.71	57.78	139.16	144.57	60.65	30.16	725.78	284.50
8.41	45.03	321.47	237.45	33.97	44.43	178.58	374.49	124.79	24.91	66.31	146.89	113.35	56.11	28.92	690.29	268.96
10.59	44.13	325.52	176.66	34.64	50.86	167.74	374.21	112.55	50.94	75.60	144.57	74.58	57.95	26.52	634.55	211.13
13.13	41.71	311.85	129.20	38.04	50.77	148.27	361.85	94.63	50.83	86.03	131.51	70.49	60.64	30.74	552.96	178.34
16.79	43.02	296.67	84.13	47.28	50.09	133.24	357.32	77.75	55.97	95.36	128.14	75.52	67.09	26.62	526.21	137.12
21.13	50.21	251.78	78.33	50.30	53.74	107.36	350.15	69.64	62.60	98.30	116.93	87.14	76.06	29.10	492.23	104.87
26.60	45.12	229.11	61.14	52.23	55.19	89.15	341.09	62.74	61.54	91.91	102.00	99.11	85.73	28.83	470.09	70.76
33.49	50.09	220.39	53.69	46.60	50.29	77.63	339.66	58.82	65.19	79.03	86.48	100.53	95.16	27.90	436.21	69.41
42.16	55.47	214.82	53.29	47.62	57.67	61.32	316.22	58.18	70.83	67.27	82.61	105.46	107.64	28.99	433.04	50.38
53.08	56.16	174.49	46.31	50.66	60.48	63.10	314.86	60.05	75.50	66.19	83.23	117.01	123.17	31.85	403.95	52.63
66.82	65.56	107.62	45.80	53.37	66.33	55.33	297.90	64.92	85.67	69.54	91.88	119.01	130.44	35.20	336.91	50.66
84.16	97.93	113.93	57.16	66.28	63.90	61.51	253.26	64.20	96.56	69.17	113.24	119.29	136.92	42.12	269.93	61.40
105.91	107.94	118.52	78.22	72.23	71.37	73.07	225.64	60.41	102.36	89.37	157.39	113.79	135.07	54.45	210.06	87.98
133.33	67.32	129.45	77.94	92.42	66.97	69.40	228.38	60.62	117.68	95.50	183.70	55.24	134.85	64.55	177.98	73.22
167.86	63.87	132.09	96.85	89.52	67.14	87.11	256.14	66.39	134.27	109.56	176.47	94.10	132.08	80.49	168.75	87.90
211.32	67.32	139.52	83.83	101.85	77.62	90.79	272.80	55.79	154.52	116.62	189.01	86.99	123.96	105.06	149.40	111.83
245.33													141.93			
266.03		142.50			88.12			66.56	175.44	127.95	196.22					
334.92		163.31							222.96	121.72						

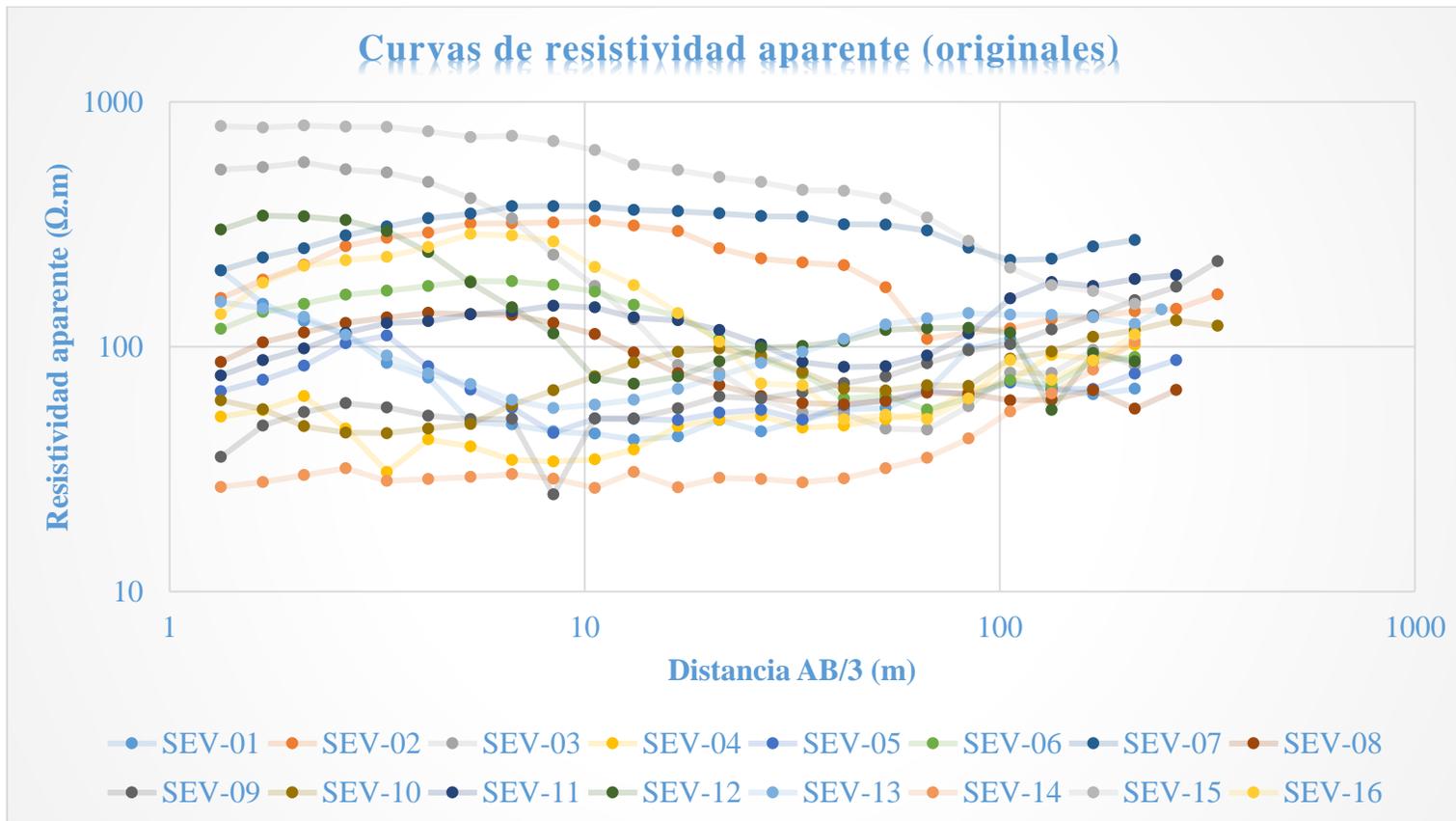


Figura C.1 Curvas de resistividad aparente originales de todos los sondeos eléctricos verticales tipo Wenner.

➤ **C.2. Gráficos de resistividad aparente de cada uno de los sondeos eléctricos verticales (tipo wenner) obtenidos a través de excel**

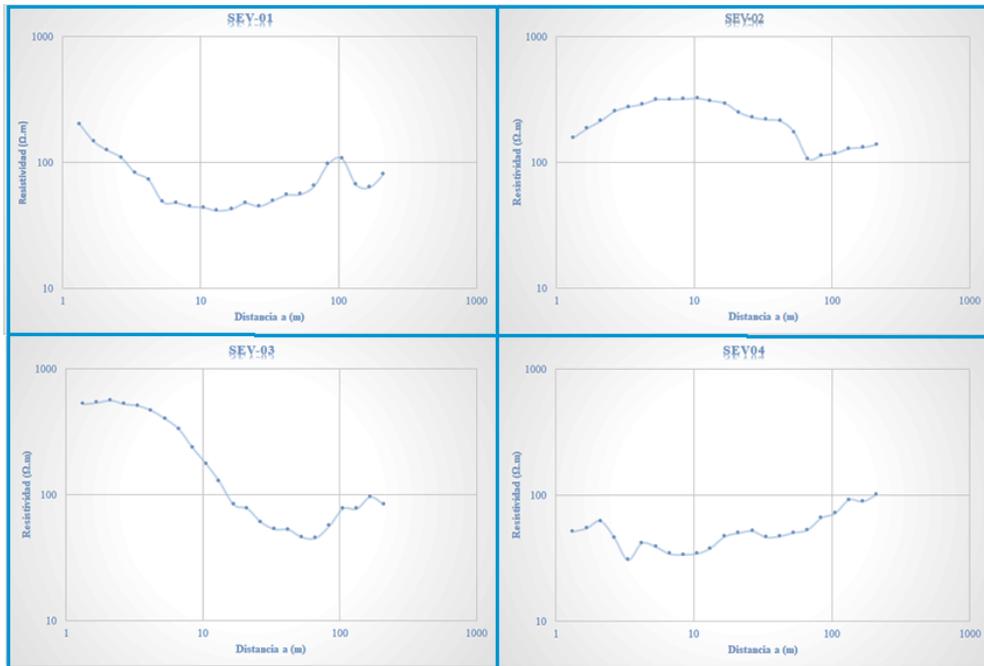


Figura C.2 Curva de resistividades aparentes del SEV-01 al SEV-04.

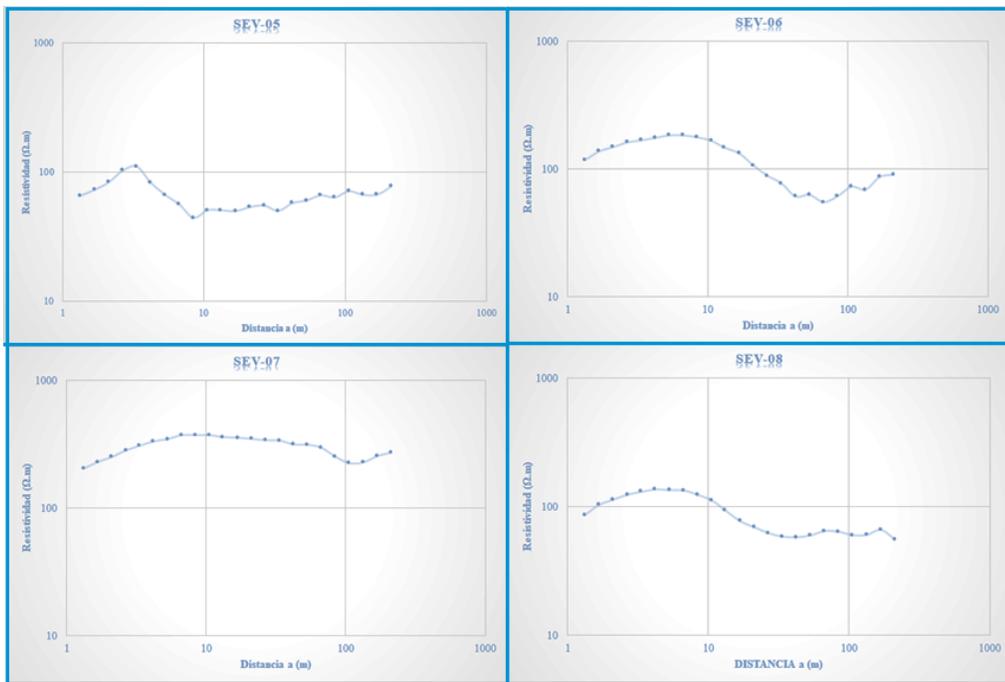


Figura C.3 Curva de resistividades aparentes del SEV-05 al SEV-08.

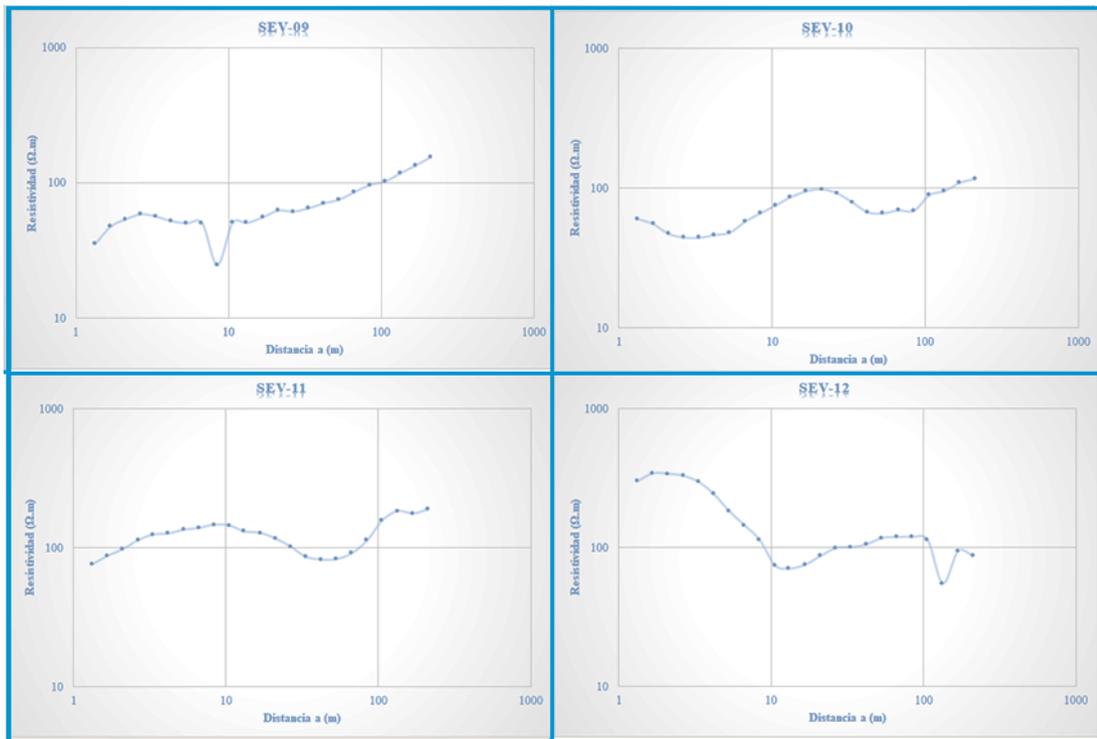


Figura C.4 Curva de resistividades aparentes del SEV-09 al SEV-12.

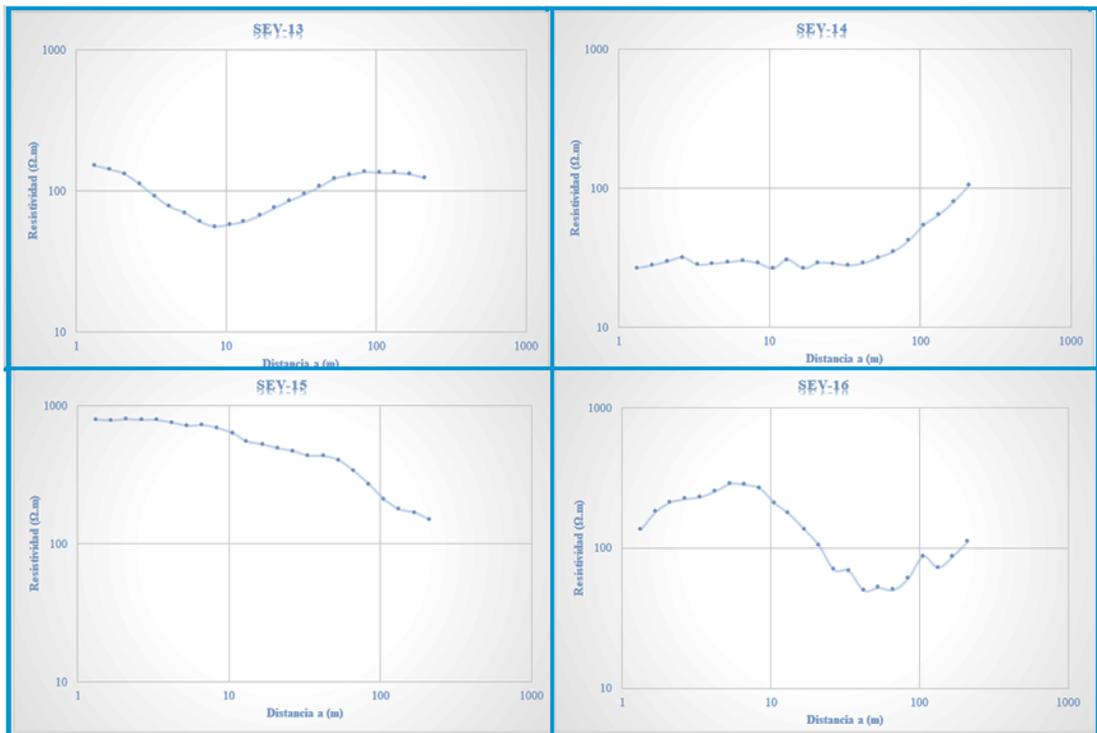


Figura C.5 Curva de resistividades aparentes del SEV-13 al SEV-16.

➤ **C.3. Modelos y curvas de inversión de los sondeos eléctricos verticales obtenidos a través del programa IPI2WIN**

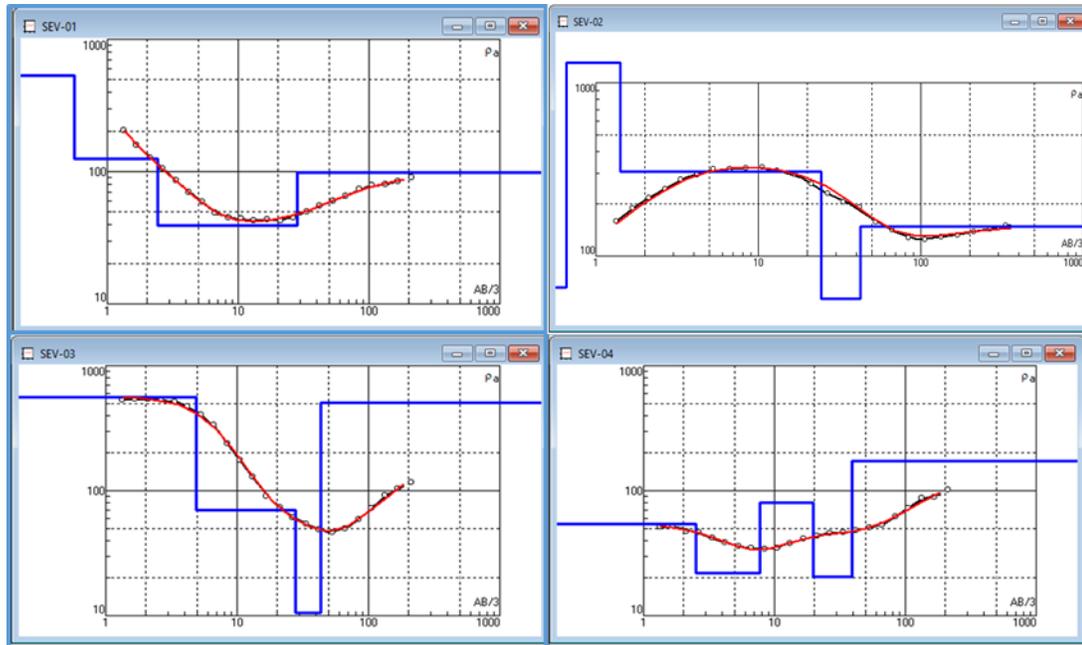


Figura C.6 Curva de resistividades verdaderas del SEV-01 al SEV-04.

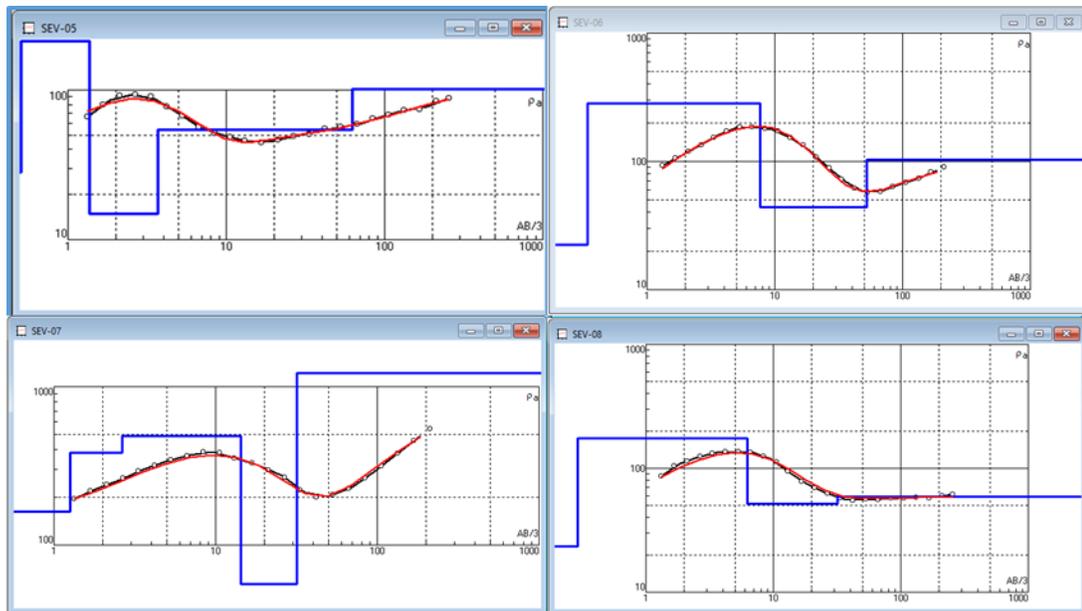


Figura C.7 Curva de resistividades verdaderas del SEV-05 al SEV-08.

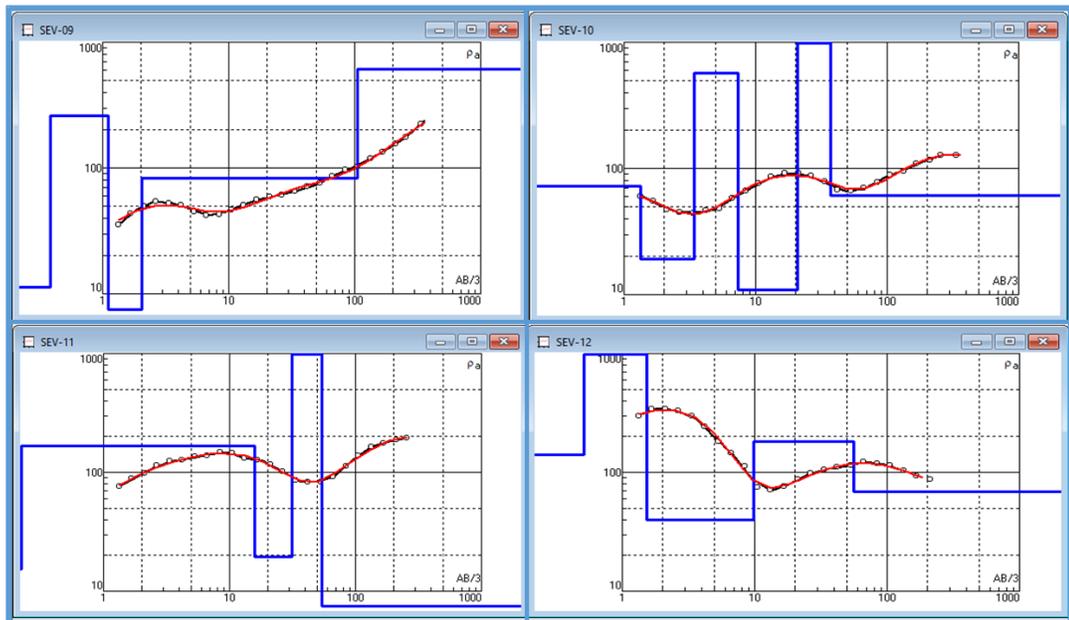


Figura C.8 Curva de resistividades verdaderas del SEV-09 al SEV-12.

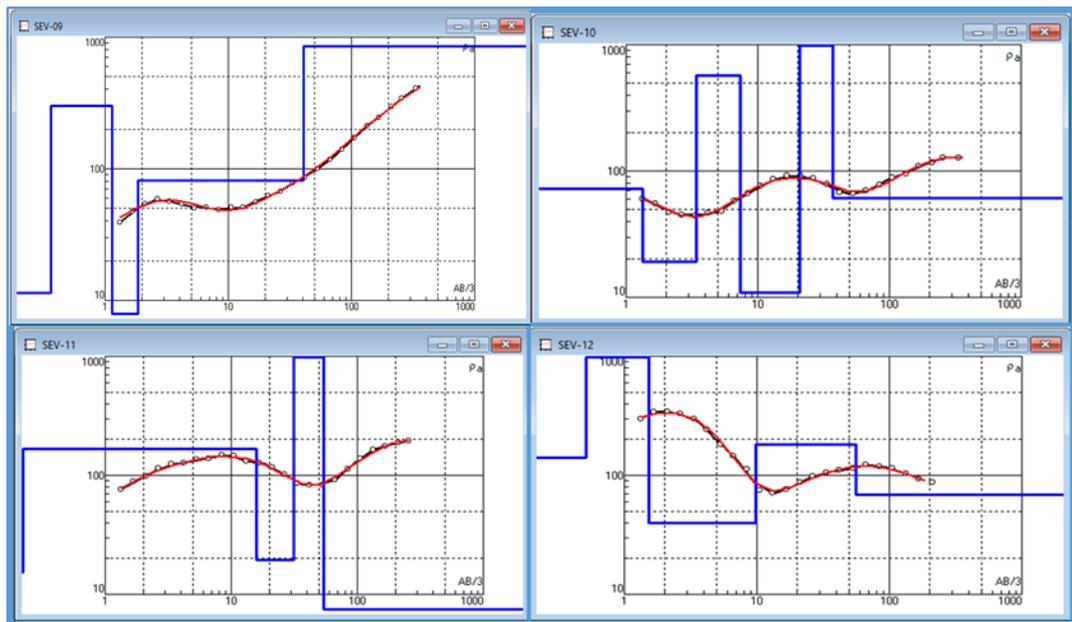


Figura C.9 Curva de resistividades verdaderas del SEV-13 al SEV-16.

Tabla C.2 Resistividades y espesores de modelos de inversión.

Nº de capa	Resistividad (Ω.m)	Espesor capa (m)	Profundidad base de la capa (m)	Altura de la capa (m)
SEV-01 Hacienda Monterrey				
1	536	0.6	0.6	596.4
2	125	1.9	2.4	594.6
3	39.1	25.7	28.1	568.9
4	97.9			
SEV-02 Agropecuaria San Miguel				
1	65.8	0.7	0.7	621.3
2	1305	0.8	1.5	620.5
3	307	23	24.5	597.5
4	56.7	18	42.5	579.5
5	148			
SEV-03 Sector la Gripta (urb. Diego Salazar)				
1	563	4.9	4.9	604.2
2	70	15.1	20.0	589.1
3	19.7	30.2	50.2	558.9
4	534			
SEV-04 Urbanización San Roque				
1	53.9	2.5	2.5	617.5
2	21.9	10.2	12.7	607.3
3	80.5	12	24.7	595.3
4	20.4	19.3	44	576.0
5	172			
SEV-05 Sabana de Arriba - La Podenca				
1	28.4	0.5	0.5	616.5
2	365	0.9	1.4	615.6
3	14.9	2.4	3.7	613.3
4	54.2	59	62.8	554.2
5	102			
SEV-06 Urb. San Roque				
1	22.5	0.3	0.3	609.7
2	285	7.4	7.7	602.3
3	44	45.1	52.8	557.2
4	103			
SEV-07 Finca el Milagro (empresa Pardo Suizo)				
1	163	1.3	1.3	625.7
2	383	1.4	2.7	624.3
3	488	11.7	14.4	612.6
4	56.7	17.5	31.9	595.1
5	1217			
SEV-08 Finca el Milagro (empresa Pardo Suizo)				
1	23.3	0.3	0.3	627.7
2	175	6	6.3	621.7
3	51.7	25.6	31.9	596.1
4	59			

Nº de capa	Resistividad (Ω.m)	Espesor capa (m)	Profundidad base de la capa (m)	Altura de la capa (m)
SEV-09 Agrícola Las Clavelinas				
1	11.3	0.4	0.4	629.6
2	300	0.8	1.2	628.8
3	4.1	0.7	1.9	628.1
4	81.4	39	40.9	589.1
5	850			
SEV-10 Urb. La Guaruga				
1	72.9	1.3	1.3	611.7
2	19	2.1	3.4	609.6
3	570	6.9	10.3	602.7
4	10.8	13.6	23.9	589.1
5	2524	16.4	40.3	572.7
6	61.1			
SEV-11 Finca el Milagro (Empresa Pardo Suizo)				
1	15.2	0.2	0.2	649.8
2	166	15.7	15.9	634.1
3	19.3	15.2	31.1	618.9
4	4057	22.9	54	596
5	4.1			
SEV-12 Sector las Parchas				
1	140	0.5	0.5	595.5
2	1038	1.0	1.5	594.5
3	40.1	8.4	9.9	586.1
4	181	46.3	56.2	539.8
5	68.9			
SEV-13 Cooperativa Dos Fronteras				
1	170.7	1.8	1.8	600.2
2	49.1	15.6	17.4	584.7
3	302.4	44.8	62.2	539.8
4	23.8	52.6	114.8	487.2
5	4654			
SEV-14 Hacienda de Andrés Olivo				
1	28.5	29.7	29.7	573.3
2	16.3	28.7	58.5	544.5
3	6355			
SEV-15 Hacienda de Andrés Olivo				
1	801	5.95	5.95	610.1
2	465	43.6	49.6	566.4
3	133			
SEV-16 Hacienda Guayabal				
1	39	0.4	0.4	615.6
2	488	5.1	5.5	610.5
3	43.1	97.3	103	513
4	558			

C.4. Parámetros de Dar Zarrouk

Tabla C.3 Parámetros de conductancia longitudinal.

Sondeo	Longitud	Latitud	Conductancia longitudinal (S)
SEV01	-68.40976	10.15164	0.6730
SEV02	-68.38456	10.1618	0.0862
SEV03	-68.40562	10.14902	1.7570
SEV04	-68.38406	10.13758	1.6070
SEV05	-68.42258	10.17186	1.2660
SEV06	-68.39096	10.13609	1.0640
SEV07	-68.37579	10.15689	0.0356
SEV08	-68.37256	10.15272	0.5423
SEV09	-68.37408	10.14831	0.3071
SEV10	-68.42044	10.16568	1.4047
SEV12	-68.40107	10.12297	0.4687
SEV13	-68.41501	10.13497	0.3272
SEV15	-68.41087	10.1277	0.1012

APÉNDICE D

Imágenes y tablas complementarias de los resultados obtenidos a partir de métodos sísmicos correspondientes al capítulo V.

D.1. Dromocrónicas y modelos de inversión de los tendidos sísmicos realizados en la zona de estudio obtenidos a través de los programas *PICKWIN* y *PLOTREFA*

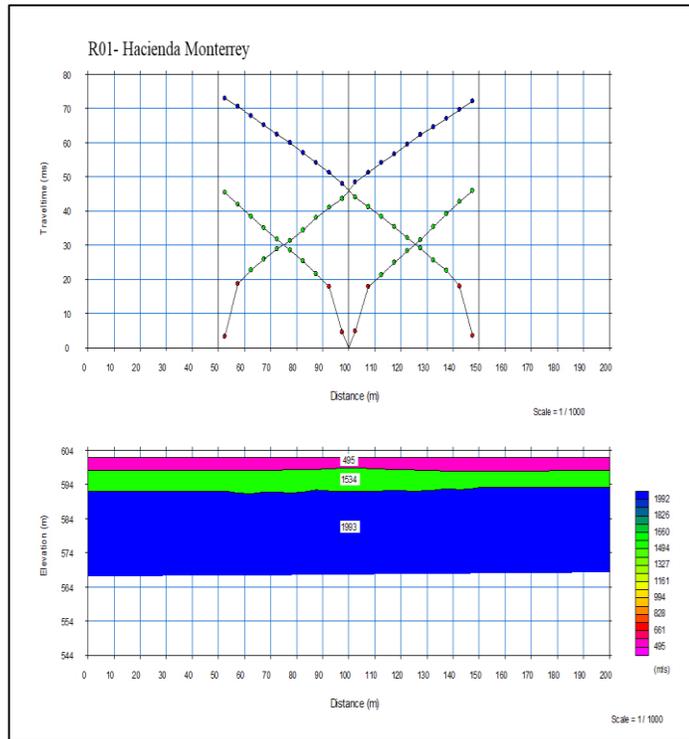


Figura D.1 Tendido R-01 ubicado en la Hacienda Monterrey.

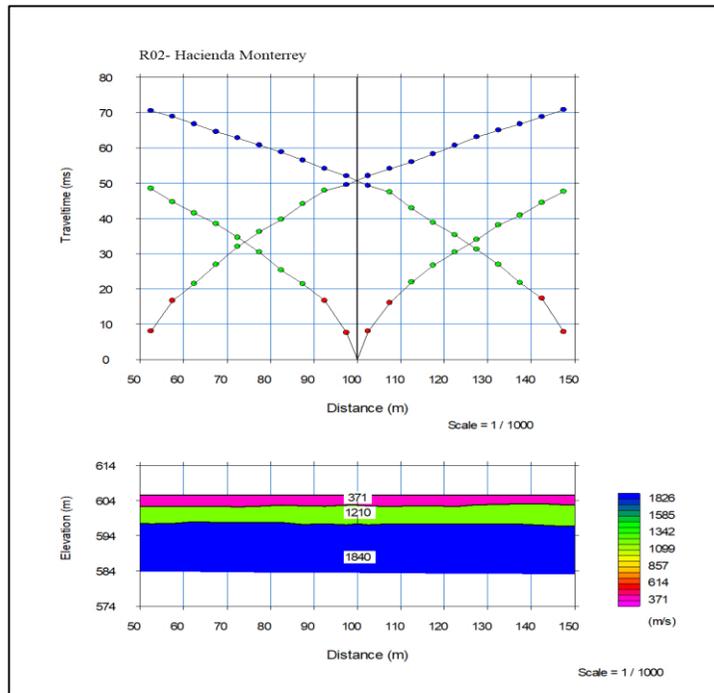


Figura D.2 Tendido R-02 ubicado en la Hacienda Monterrey.

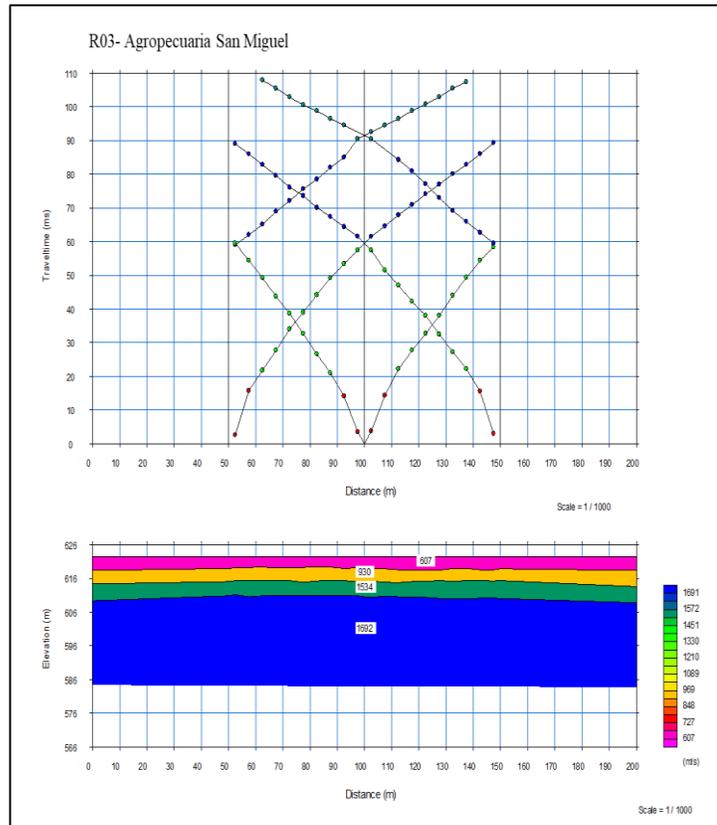


Figura D.3 Tendido R-03 ubicado en la Agropecuaria San Miguel.

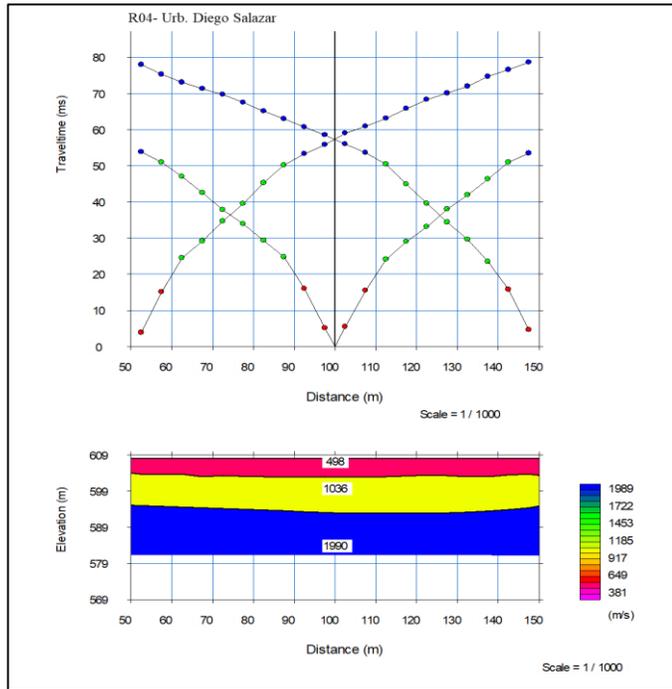


Figura D.4 Tendido R-04 ubicado en el Sector La Gripta (Urbanización Diego Salazar).

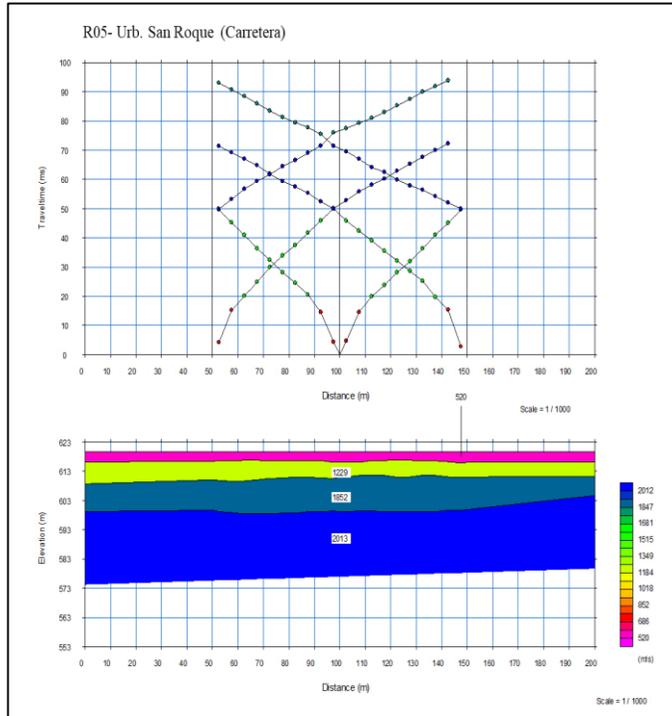


Figura D.5 Tendido R-05 ubicado en la Urbanización San Roque.

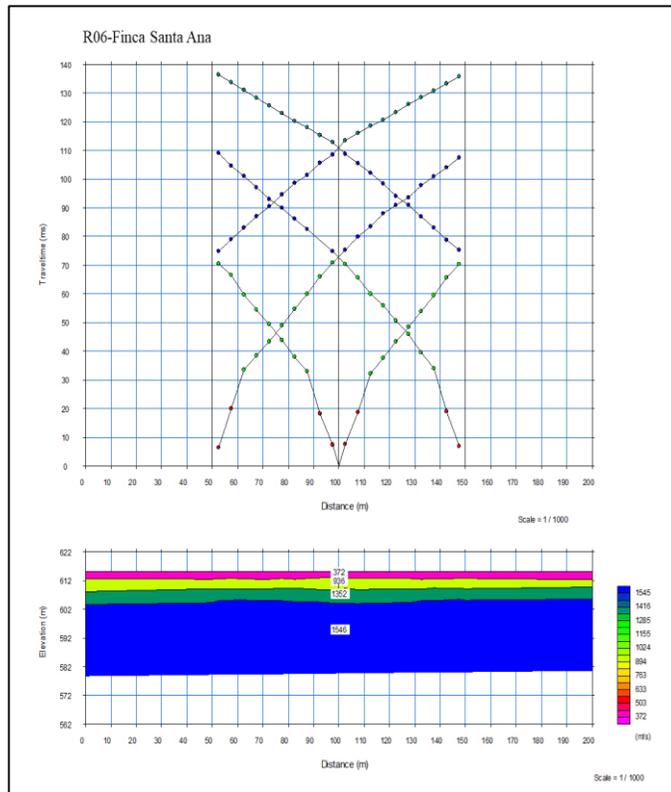


Figura D.6 Tendido R-06 ubicado en Sabana de Arriba (La Podeca).

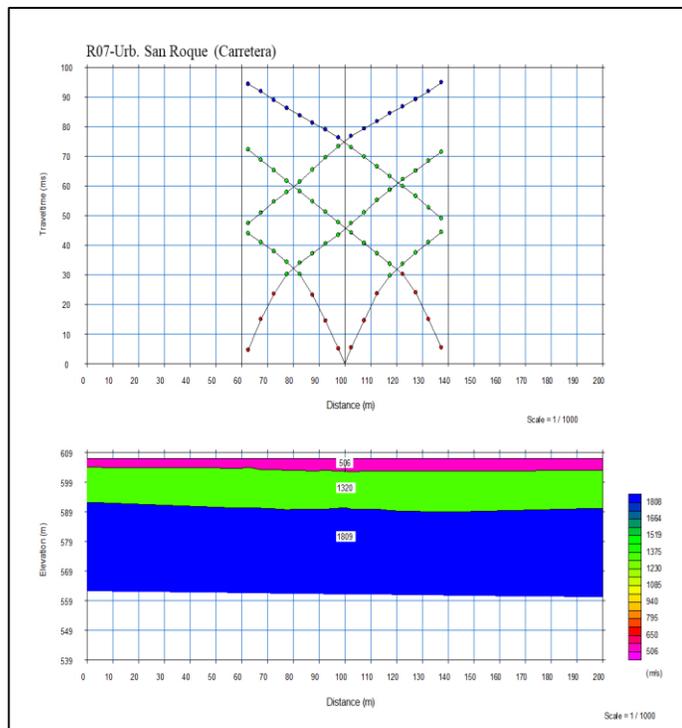


Figura D.7 Tendido R-07 ubicado en la Urbanización San Roque.

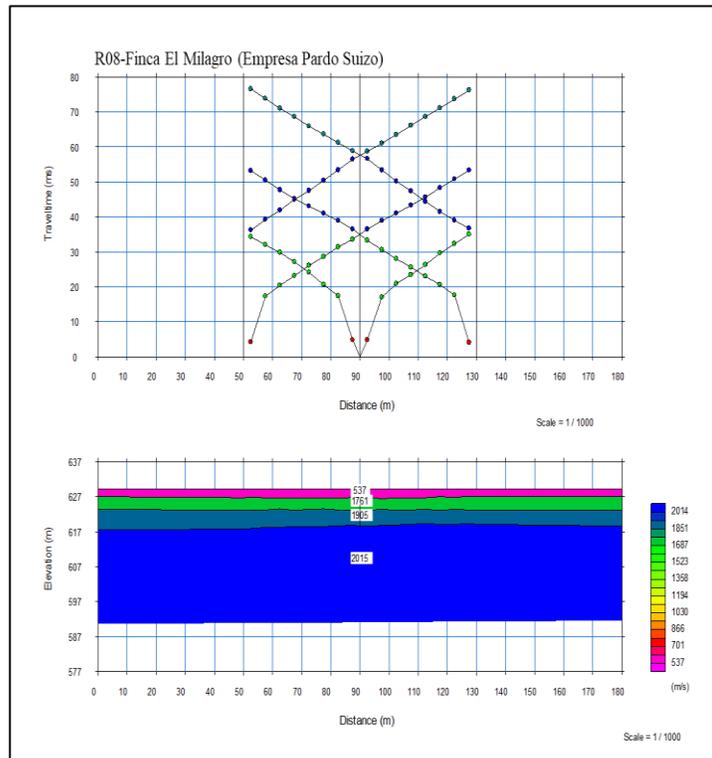


Figura D.8 Tendido R-08 ubicado en la Finca El Milagro (Empresa Pardo Suizo).

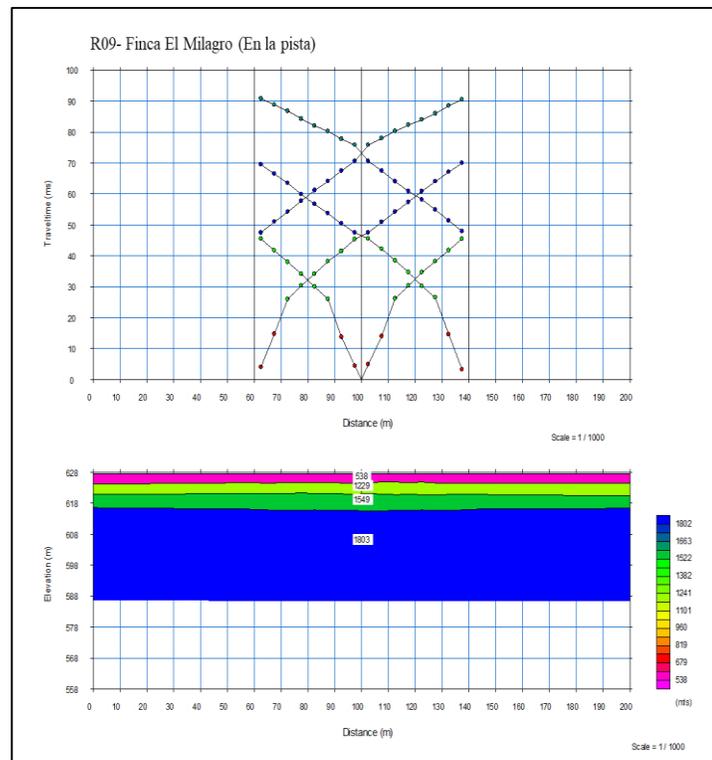


Figura D.9 Tendido R-09 ubicado en la Finca El Milagro (Empresa Pardo Suizo).

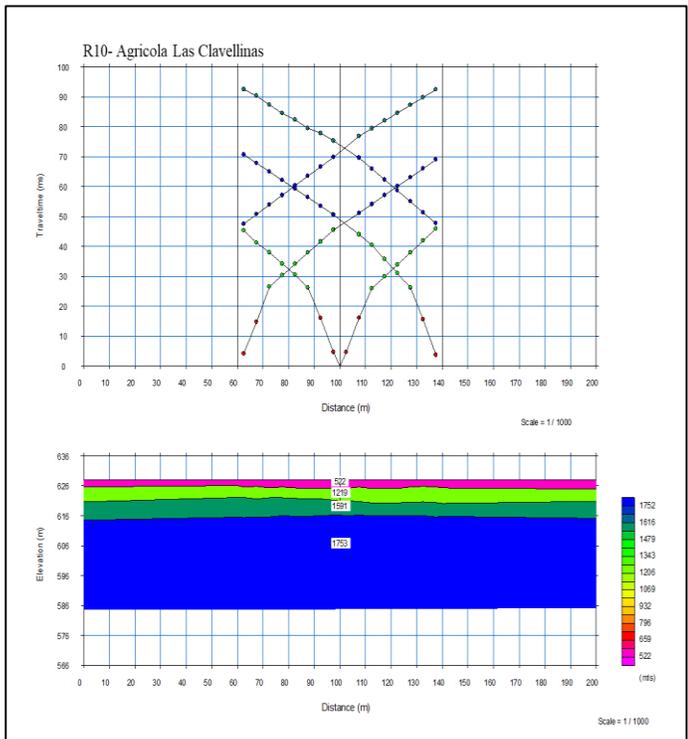


Figura D.10 Tendido R-10 ubicado en la Agrícola Las Clavelinas.

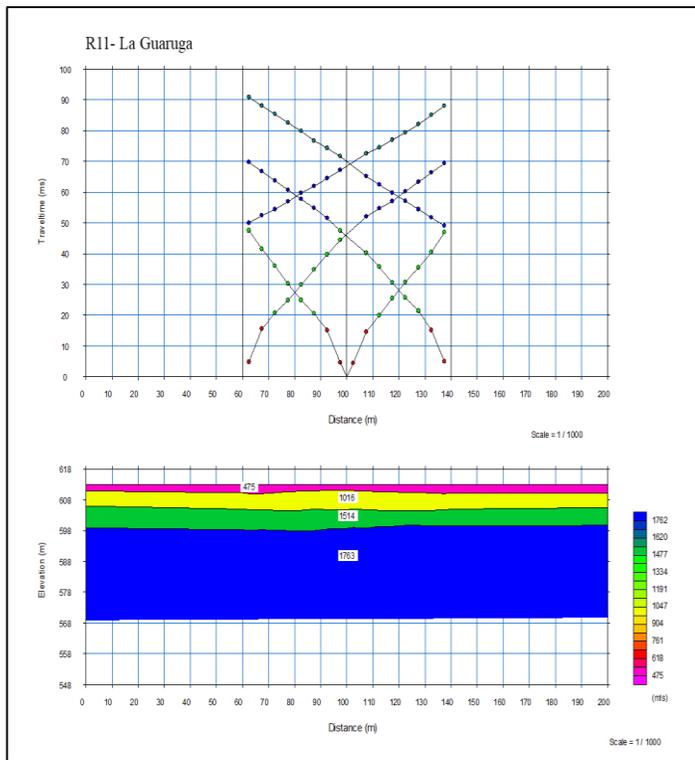


Figura D.11 Tendido R-11 ubicado en la urbanización la Guaruga.

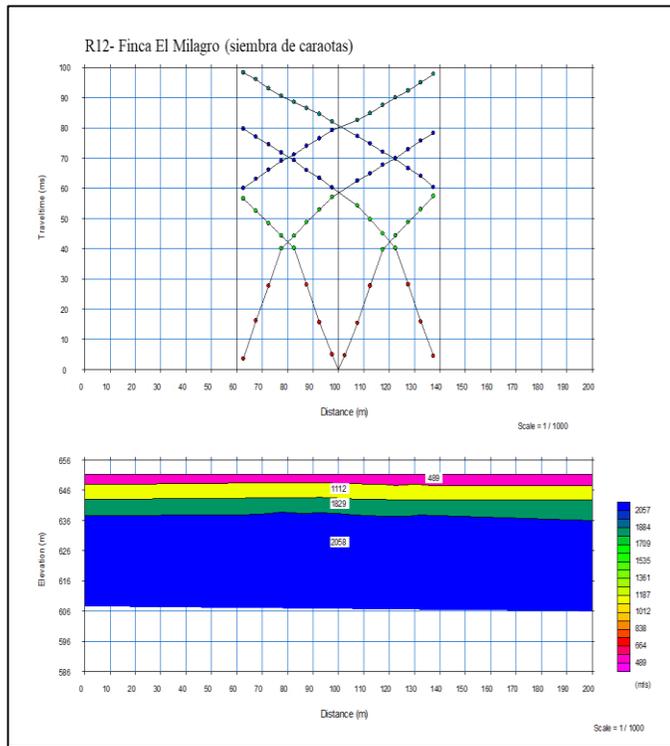


Figura D.12 Tendido R-12 ubicado en la Finca El Milagro (Empresa Pardo Suizo).

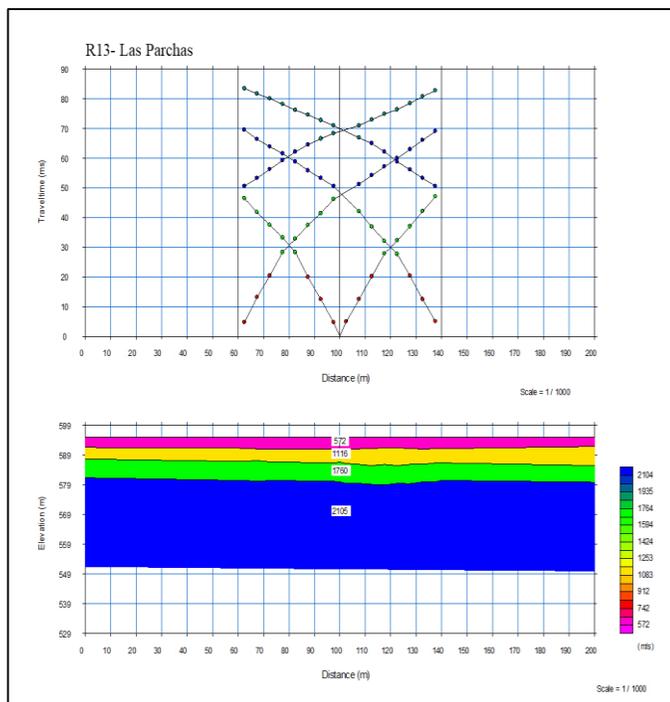


Figura D.13 Tendido R-13 ubicado en el Sector las Parchas.

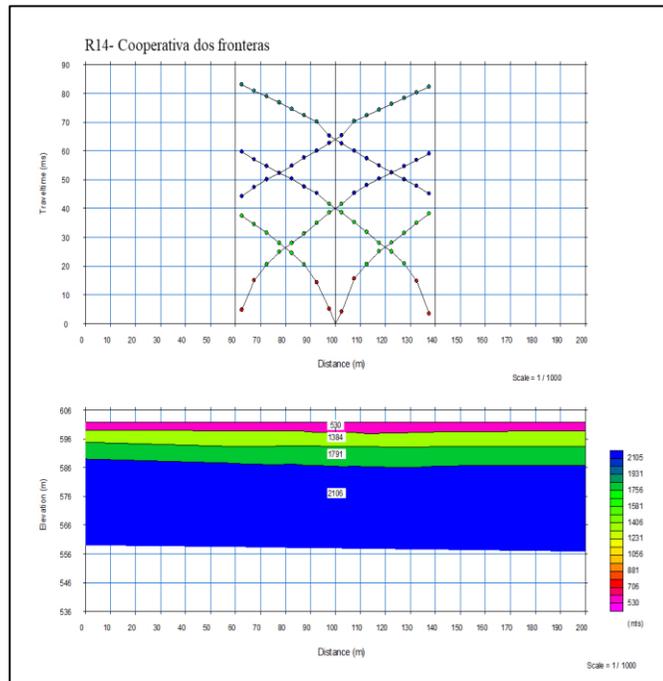


Figura D.14 Tendido R-14 ubicado en la Cooperativa Dos Frontera.

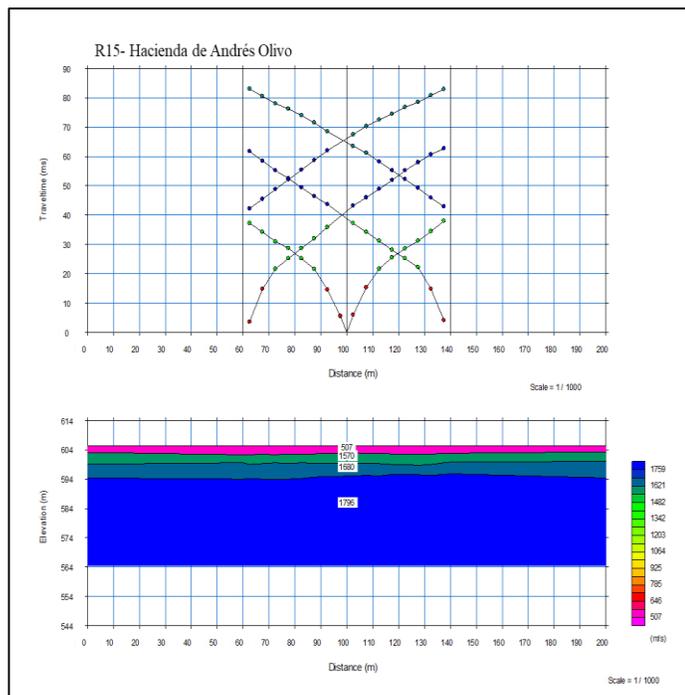


Figura D.15 Tendido R-15 ubicado en la Finca de Andrés Olivo.

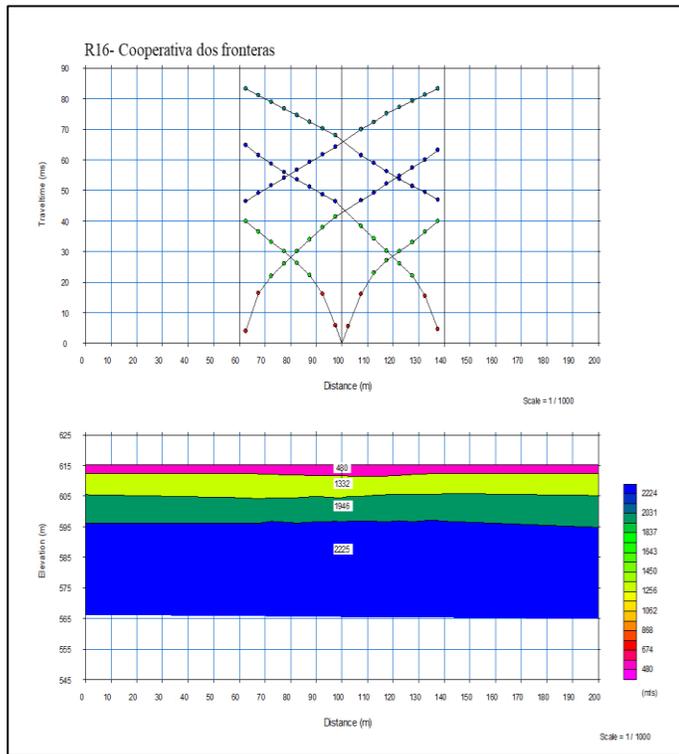


Figura D.16 Tendido R-16 ubicado en la Cooperativa Dos Fronteras.

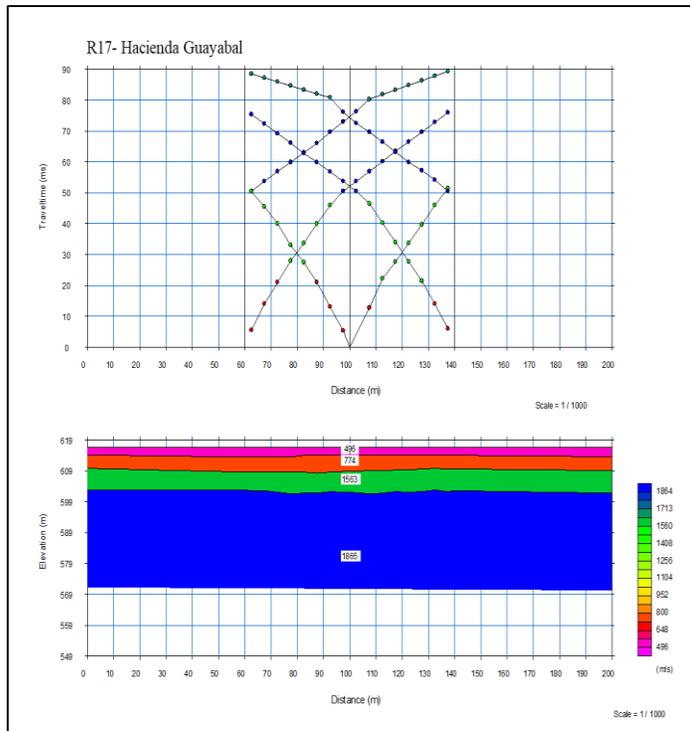


Figura D.17 Tendido R-17 ubicado en la Hacienda Guayabal (Alto Viejo).

APÉNDICE E

Imágenes y tablas complementarias de los resultados obtenidos a partir de métodos gravimétricos correspondientes al capítulo VI.

➤ **E.1. Datos usados para realizar los principales mapas gravimétricos**

Tabla E.1 Datos de identificación de las estaciones gravimétricas ordinarias y datos gravimétricos calculados para elaborar los mapas gravimétricos

Estación	Longitud (°)	Latitud (°)	Altura (m)	Gravedad Observada (mgal)	Anomalía de aire libre (mgal)	Anomalía de Bouguer simple (mgal)	Corrección Topografica (mgal)	Anomalía de Bouguer total (mgal)
Base	10.21478	68.32899	662	978026.235	-	-	-	-
A001	68.36828	10.15150	639	978025.729	-167.67	-167.57	0.05961	-167.51039
A002	68.36896	10.15216	636	978025.980	-168.36	-167.98	0.04432	-167.93568
A003	68.36976	10.15232	636	978026.338	-168.01	-167.62	0.03763	-167.58237
A004	68.37051	10.15227	634	978026.593	-168.37	-167.79	0.03769	-167.75231
A005	68.37152	10.15219	633	978026.718	-168.55	-167.88	0.0367	-167.84330
A006	68.37246	10.15209	632	978027.024	-168.55	-167.78	0.03785	-167.74215
A007	68.37333	10.15197	628	978027.242	-169.56	-168.41	0.04931	-168.36069
A008	68.37436	10.15189	627	978027.495	-169.62	-168.36	0.04827	-168.31173
A009	68.37540	10.15172	629	978027.826	-168.66	-167.60	0.03988	-167.56012
A010	68.37656	10.15162	627	978028.230	-168.87	-167.62	0.04764	-167.57236
A011	68.37745	10.15161	621	978028.574	-170.38	-168.55	0.08364	-168.46636
A012	68.37833	10.15150	621	978028.777	-170.17	-168.34	0.07907	-168.26093
A013	68.37933	10.15144	621	978028.770	-170.18	-168.35	0.07061	-168.27939
A014	68.38016	10.15142	625	978028.822	-168.89	-167.45	0.05581	-167.39419
A015	68.38108	10.15135	623	978028.913	-169.42	-167.78	0.06422	-167.71578
A016	68.38224	10.15146	620	978029.246	-170.01	-168.09	0.08107	-168.00893
A017	68.38318	10.15139	620	978029.983	-169.27	-167.35	0.09022	-167.25978
A018	68.38450	10.15132	610	978030.104	-172.24	-169.35	0.16314	-169.18686
A019	68.38531	10.15130	612	978030.239	-171.48	-168.78	0.1522	-168.62780
A020	68.38629	10.15114	616	978030.264	-170.22	-167.91	0.119	-167.79100
A021	68.38730	10.15115	616	978029.961	-170.52	-168.21	0.11181	-168.09819
A022	68.38825	10.15104	618	978029.320	-170.54	-168.42	0.09605	-168.32395
A023	68.38923	10.15101	618	978029.104	-170.76	-168.64	0.09082	-168.54918
A024	68.39037	10.15081	620	978029.037	-170.20	-168.27	0.07973	-168.19027
A025	68.39145	10.15094	621	978029.069	-169.87	-168.03	0.07944	-167.95056
A026	68.39276	10.15077	615	978029.381	-171.40	-168.99	0.12171	-168.86829
A027	68.39378	10.15070	613	978029.592	-171.80	-169.20	0.14317	-169.05683
A028	68.39480	10.15069	612	978029.800	-171.90	-169.21	0.15606	-169.05394
A029	68.39612	10.15057	611	978030.007	-172.00	-169.21	0.16548	-169.04452
A030	68.39706	10.15048	610	978030.219	-172.09	-169.20	0.17137	-169.02863
A031	68.39801	10.15047	612	978030.136	-171.56	-168.86	0.15689	-168.70311
A032	68.39897	10.15045	612	978029.656	-172.04	-169.34	0.14899	-169.19101
A033	68.39983	10.15040	616	978029.200	-171.26	-168.95	0.12165	-168.82835
A034	68.40084	10.15021	617	978028.955	-171.19	-168.97	0.11157	-168.85843
A035	68.40236	10.15018	617	978028.616	-171.53	-169.31	0.09952	-169.21048
A036	68.40308	10.15091	617	978028.816	-171.35	-169.13	0.11209	-169.01791
A037	68.40382	10.15148	613	978029.131	-172.29	-169.69	0.14217	-169.54783
A038	68.40466	10.15213	611	978028.935	-173.12	-170.33	0.16244	-170.16756
A039	68.40561	10.15296	611	978028.817	-173.27	-170.47	0.16798	-170.30202
A040	68.40634	10.15355	609	978028.621	-174.10	-171.11	0.18123	-170.92877
A041	68.40711	10.15435	610	978028.377	-174.06	-171.17	0.17828	-170.99172
A042	68.40783	10.15494	609	978028.150	-174.61	-171.62	0.18896	-171.43104
A043	68.40848	10.15557	606	978028.026	-175.68	-172.40	0.21495	-172.18505
A044	68.40942	10.15642	609	978028.013	-174.80	-171.81	0.19667	-171.61333
A045	68.41036	10.15700	603	978028.019	-176.66	-173.09	0.24317	-172.84683
A046	68.41102	10.15773	605	978028.069	-176.01	-172.64	0.23537	-172.40463
A047	68.41186	10.15840	606	978028.021	-175.77	-172.50	0.21971	-172.28029
A048	68.41257	10.15915	607	978028.115	-175.40	-172.21	0.21184	-171.99816
A049	68.41320	10.15976	605	978028.246	-175.90	-172.53	0.23077	-172.29923
A050	68.41400	10.16034	607	978028.275	-175.27	-172.09	0.21087	-171.87913
A051	68.41478	10.16095	603	978028.295	-176.51	-172.94	0.24604	-172.69396
A052	68.41544	10.16150	607	978028.339	-175.25	-172.06	0.20683	-171.85317

Estación	Longitud (°)	Latitud (°)	Altura (m)	Gravedad Observada (mgal)	Anomalía de aire libre (mgal)	Anomalía de Bouguer simple (mgal)	Corrección Topografica (mgal)	Anomalía de Bouguer total (mgal)
A053	68.41633	10.16216	611	978028.325	-174.05	-171.25	0.16474	-171.08526
A054	68.41729	10.16309	611	978028.232	-174.17	-171.37	0.16332	-171.20668
A055	68.41826	10.16383	608	978028.032	-175.32	-172.23	0.19207	-172.03793
B056	68.38709	10.15121	616	978030.174	-170.31	-168.00	0.11371	-167.88629
B057	68.38691	10.15202	615	978029.840	-170.98	-168.57	0.11618	-168.45382
B058	68.38711	10.15308	619	978029.546	-170.07	-168.05	0.08978	-167.96022
B059	68.38723	10.15413	620	978029.304	-170.04	-168.11	0.07713	-168.03287
B060	68.38723	10.15496	626	978029.332	-168.19	-166.84	0.0515	-166.78850
B061	68.38699	10.15588	621	978029.240	-169.85	-168.02	0.06584	-167.95416
B062	68.38670	10.15702	623	978028.874	-169.63	-167.99	0.06135	-167.92865
B063	68.38636	10.15800	622	978028.658	-170.19	-168.45	0.0647	-168.38530
B064	68.38599	10.15899	620	978028.641	-170.85	-168.93	0.07726	-168.85274
B065	68.38555	10.15999	620	978028.594	-170.93	-169.00	0.07721	-168.92279
B066	68.38510	10.16085	623	978028.631	-170.00	-168.36	0.06306	-168.29694
B067	68.38484	10.16174	621	978028.593	-170.68	-168.85	0.07006	-168.77994
B068	68.38448	10.16255	623	978028.528	-170.15	-168.51	0.05966	-168.45034
B069	68.38400	10.16343	627	978028.314	-169.16	-167.91	0.03961	-167.87039
B070	68.38374	10.16417	628	978028.141	-169.05	-167.89	0.03279	-167.85721
B071	68.38327	10.16502	628	978028.010	-169.20	-168.05	0.0307	-168.01930
B072	68.38283	10.16588	630	978027.810	-168.81	-167.85	0.02558	-167.82442
B073	68.38294	10.16699	628	978028.484	-168.79	-167.63	0.03266	-167.59734
B074	68.38323	10.16804	629	978028.373	-168.63	-167.57	0.03189	-167.53811
B075	68.38312	10.16897	628	978028.659	-168.68	-167.52	0.03662	-167.48338
B076	68.38281	10.17012	632	978028.974	-167.17	-166.39	0.02477	-166.36523
B077	68.38250	10.17111	629	978028.125	-168.97	-167.91	0.0383	-167.87170
B078	68.38216	10.17261	635	978027.194	-168.10	-167.62	0.02151	-167.59849
B079	68.38170	10.17369	642	978026.759	-166.41	-166.60	0.01208	-166.58792
B080	68.38115	10.17461	640	978026.482	-167.33	-167.33	0.03575	-167.29425
B081	68.38077	10.17552	643	978025.909	-167.01	-167.29	0.036	-167.25400
B082	68.38034	10.17660	650	978025.649	-165.14	-166.10	0.03637	-166.06363
B083	68.37987	10.17760	652	978024.634	-165.57	-166.72	0.03378	-166.68622
B084	68.38075	10.17800	649	978025.214	-165.93	-166.79	0.03231	-166.75769
B085	68.38160	10.17835	649	978025.901	-165.25	-166.12	0.0348	-166.08520
B086	68.38264	10.17869	641	978026.413	-167.22	-167.31	0.04196	-167.26804
B087	68.38357	10.17893	645	978025.992	-166.41	-166.89	0.04229	-166.84771
B088	68.38443	10.17944	642	978025.877	-167.47	-167.66	0.04125	-167.61875
B089	68.38688	10.15102	616	978030.190	-170.29	-167.98	0.11436	-167.86564
B090	68.38701	10.15021	614	978030.151	-170.92	-168.41	0.1269	-168.28310
B091	68.38603	10.15039	613	978030.050	-171.34	-168.73	0.13723	-168.59277
B092	68.38331	10.15033	614	978029.102	-171.97	-169.47	0.12803	-169.34197
B093	68.38356	10.14948	615	978028.950	-171.79	-169.38	0.12507	-169.25493
B094	68.38368	10.14846	617	978028.725	-171.37	-169.15	0.11044	-169.03956
B095	68.38394	10.14758	615	978028.725	-171.96	-169.55	0.12338	-169.42662
B096	68.38438	10.14690	615	978028.480	-172.18	-169.77	0.12334	-169.64666
B097	68.38518	10.14602	616	978028.187	-172.14	-169.82	0.11816	-169.70184
B098	68.38593	10.14524	613	978028.136	-173.09	-170.49	0.13648	-170.35352
B099	68.38641	10.14414	614	978028.005	-172.88	-170.37	0.13621	-170.23379
B100	68.38677	10.14324	610	978027.919	-174.17	-171.28	0.15886	-171.12114
B101	68.38722	10.14232	614	978028.018	-172.81	-170.30	0.13871	-170.16129
B102	68.38751	10.14149	609	978028.150	-174.19	-171.20	0.16969	-171.03031
B103	68.38813	10.14020	611	978028.059	-173.63	-170.83	0.16813	-170.66187
B104	68.38862	10.13923	607	978027.701	-175.19	-172.01	0.19616	-171.81384
B105	68.38946	10.13865	609	978027.497	-174.76	-171.77	0.18543	-171.58457
B106	68.38999	10.13791	610	978027.326	-174.60	-171.70	0.17627	-171.52373
B107	68.39060	10.13685	611	978027.528	-174.05	-171.26	0.1712	-171.08880
B108	68.39103	10.13599	609	978027.720	-174.45	-171.46	0.18394	-171.27606
B109	68.39150	10.13502	610	978027.605	-174.23	-171.33	0.17917	-171.15083
B110	68.39197	10.13407	609	978027.699	-174.41	-171.42	0.18855	-171.23145
B111	68.39242	10.13325	606	978027.765	-175.25	-171.97	0.21498	-171.75502

Estación	Longitud (°)	Latitud (°)	Altura (m)	Gravedad Observada (mgal)	Anomalía de aire libre (mgal)	Anomalía de Bouguer simple (mgal)	Corrección Topografica (mgal)	Anomalía de Bouguer total (mgal)
B112	68.39291	10.13254	607	978027.799	-174.88	-171.70	0.21273	-171.48727
B113	68.39330	10.13178	603	978028.089	-175.80	-172.23	0.2477	-171.98230
C114	68.36924	10.15102	640	978025.632	-167.44	-167.44	0.06263	-167.37737
C115	68.37030	10.15029	633	978025.645	-169.57	-168.89	0.09351	-168.79649
C116	68.37118	10.14976	635	978025.782	-168.79	-168.31	0.09054	-168.21946
C117	68.37215	10.14926	635	978025.948	-168.61	-168.13	0.09089	-168.03911
C118	68.37328	10.14849	632	978026.029	-169.43	-168.66	0.10791	-168.55209
C119	68.37435	10.14782	630	978026.163	-169.90	-168.93	0.1179	-168.81210
C120	68.37530	10.14722	628	978026.434	-170.22	-169.07	0.12502	-168.94498
C121	68.37623	10.14663	630	978026.575	-169.45	-168.48	0.11797	-168.36203
C122	68.37716	10.14606	624	978026.961	-170.89	-169.35	0.14335	-169.20665
C123	68.37815	10.14545	622	978027.303	-171.15	-169.42	0.15376	-169.26624
C124	68.37910	10.14486	616	978027.657	-172.63	-170.32	0.18638	-170.13362
C125	68.37996	10.14432	616	978028.141	-172.13	-169.82	0.17327	-169.64673
C126	68.38092	10.14377	613	978028.474	-172.71	-170.10	0.17814	-169.92186
C127	68.38172	10.14323	617	978028.349	-171.58	-169.36	0.13696	-169.22304
C128	68.38262	10.14265	617	978028.316	-171.59	-169.38	0.1218	-169.25820
C129	68.38361	10.14211	617	978028.152	-171.74	-169.52	0.11801	-169.40199
C130	68.38561	10.14112	611	978028.322	-173.39	-170.60	0.16649	-170.43351
C131	68.38656	10.14092	611	978028.323	-173.38	-170.59	0.16972	-170.42028
C132	68.38753	10.14071	607	978028.117	-174.82	-171.64	0.19167	-171.44833
C133	68.38849	10.14043	612	978027.943	-173.44	-170.74	0.16281	-170.57719
C134	68.38953	10.14036	607	978027.824	-175.10	-171.92	0.20417	-171.71583
C135	68.39096	10.14025	610	978027.930	-174.06	-171.17	0.18095	-170.98905
C136	68.39208	10.13984	609	978028.164	-174.13	-171.14	0.19227	-170.94773
C137	68.39296	10.14010	604	978027.749	-176.09	-172.62	0.23474	-172.38526
C138	68.39410	10.13999	609	978027.757	-174.54	-171.55	0.18922	-171.36078
C139	68.39485	10.13990	610	978027.495	-174.49	-171.60	0.18153	-171.41847
C140	68.39589	10.13973	605	978027.594	-175.93	-172.55	0.22255	-172.32745
C141	68.39714	10.13965	605	978027.780	-175.74	-172.37	0.23092	-172.13908
C142	68.39837	10.13944	606	978027.879	-175.32	-172.05	0.21915	-171.83085
C143	68.39937	10.13936	607	978027.786	-175.11	-171.93	0.20751	-171.72249
C144	68.40046	10.13926	608	978027.858	-174.72	-171.64	0.20321	-171.43679
C145	68.40155	10.13914	604	978027.932	-175.88	-172.41	0.23387	-172.17613
C146	68.40260	10.13917	605	978028.142	-175.36	-171.99	0.23012	-171.75988
C147	68.40367	10.13928	605	978027.713	-175.79	-172.42	0.22271	-172.19729
C148	68.40479	10.13941	610	978027.719	-174.25	-171.36	0.18028	-171.17972
C149	68.40613	10.13965	610	978027.896	-174.08	-171.19	0.18262	-171.00738
C150	68.40720	10.13987	604	978028.040	-175.79	-172.32	0.23706	-172.08294
C151	68.40846	10.14005	604	978028.696	-175.14	-171.67	0.25624	-171.41376
C152	68.40954	10.14013	600	978029.027	-176.05	-172.19	0.29944	-171.89056
C153	68.41048	10.14034	598	978029.413	-176.29	-172.24	0.32028	-171.91972
C154	68.41155	10.14064	602	978028.725	-175.75	-172.09	0.27453	-171.81547
C155	68.41242	10.14080	603	978028.715	-175.46	-171.89	0.26047	-171.62953
C156	68.41366	10.14071	603	978028.672	-175.50	-171.93	0.26563	-171.66437
C157	68.41457	10.14086	600	978028.048	-177.05	-173.20	0.29438	-172.90562
C158	68.41567	10.14094	599	978027.342	-178.07	-174.12	0.31099	-173.80901
C159	68.41664	10.14087	603	978026.806	-177.37	-173.80	0.25935	-173.54065
C160	68.41776	10.14068	609	978026.151	-176.16	-173.18	0.19457	-172.98543
C161	68.41857	10.14005	607	978025.829	-177.08	-173.90	0.18928	-173.71072
C162	68.41846	10.13250	619	978024.823	-174.15	-172.13	0.10397	-172.02603
C163	68.41806	10.13331	613	978025.403	-175.45	-172.85	0.15666	-172.69334
C164	68.41802	10.13423	602	978026.608	-177.67	-174.00	0.26026	-173.73974
C165	68.41841	10.13516	611	978026.465	-175.06	-172.27	0.18779	-172.08221
C166	68.41853	10.13605	610	978026.146	-175.72	-172.82	0.19188	-172.62812
C167	68.41876	10.13689	606	978026.127	-177.00	-173.72	0.21542	-173.50458
C168	68.41883	10.13772	606	978026.387	-176.76	-173.49	0.22506	-173.26494
C169	68.41893	10.13857	604	978026.559	-177.23	-173.76	0.23919	-173.52081
C170	68.41857	10.13950	610	978026.019	-175.95	-173.06	0.1862	-172.87380

Estación	Longitud (°)	Latitud (°)	Altura (m)	Gravedad Observada (mgal)	Anomalía de aire libre (mgal)	Anomalía de Bouguer simple (mgal)	Corrección Topografica (mgal)	Anomalía de Bouguer total (mgal)
C171	68.41850	10.14066	612	978025.781	-175.61	-172.91	0.16772	-172.74228
C172	68.41949	10.14108	613	978025.361	-175.73	-173.13	0.14567	-172.98433
C173	68.42004	10.14188	615	978025.360	-175.14	-172.73	0.13338	-172.59662
D174	68.36935	10.16157	649	978026.375	-164.25	-165.12	0.05748	-165.06252
D175	68.37026	10.16184	636	978027.589	-167.06	-166.67	0.01869	-166.65131
D176	68.37121	10.16201	637	978028.015	-166.33	-166.04	0.01321	-166.02679
D177	68.37219	10.16206	635	978028.091	-166.87	-166.39	0.01543	-166.37457
D178	68.37316	10.16206	638	978027.500	-166.54	-166.34	0.00817	-166.33183
D179	68.37394	10.16149	643	978026.587	-165.89	-166.18	0.00917	-166.17083
D180	68.37388	10.16061	643	978026.271	-166.18	-166.47	0.04903	-166.42097
D181	68.37364	10.15969	645	978027.030	-164.77	-165.25	0.02239	-165.22761
D182	68.37384	10.15879	636	978028.092	-166.46	-166.07	0.01332	-166.05668
D183	68.37408	10.15781	634	978027.862	-167.27	-166.70	0.02047	-166.67953
D184	68.37456	10.15700	628	978028.882	-168.08	-166.92	0.04236	-166.87764
D185	68.37505	10.15622	621	978029.292	-169.81	-167.98	0.08082	-167.89918
D186	68.37594	10.15605	625	978029.120	-168.74	-167.29	0.05169	-167.23831
D187	68.37650	10.15528	627	978029.014	-168.20	-166.95	0.04174	-166.90826
D188	68.37717	10.15443	628	978029.209	-167.67	-166.52	0.03939	-166.48061
D189	68.37766	10.15363	626	978028.822	-168.65	-167.30	0.04456	-167.25544
D190	68.37702	10.15290	622	978028.536	-170.15	-168.42	0.05786	-168.36214
D191	68.37608	10.15275	627	978028.372	-168.77	-167.51	0.04126	-167.46874
D192	68.37515	10.15280	632	978028.038	-167.56	-166.79	0.03051	-166.75949
D193	68.37425	10.15280	628	978027.676	-169.16	-168.00	0.03956	-167.96044
D194	68.36417	10.16480	660	978024.008	-163.32	-165.25	0.05131	-165.19869
D195	68.36484	10.16425	658	978024.623	-163.31	-165.04	0.04977	-164.99023
D196	68.36502	10.16338	653	978025.217	-164.23	-165.48	0.04584	-165.43416
D197	68.36475	10.16247	654	978025.613	-163.50	-164.85	0.04843	-164.80157
D198	68.36426	10.16152	653	978025.935	-163.45	-164.71	0.05198	-164.65802
D199	68.36394	10.16067	649	978026.248	-164.35	-165.22	0.05185	-165.16815
D200	68.36388	10.15969	645	978026.529	-165.27	-165.75	0.0559	-165.69410
D201	68.36424	10.15864	647	978025.990	-165.16	-165.84	0.0618	-165.77820
D202	68.36485	10.15788	642	978026.510	-166.16	-166.35	0.0676	-166.28240
D203	68.36470	10.15702	640	978026.411	-166.85	-166.85	0.07577	-166.77423
D204	68.36469	10.15606	644	978025.689	-166.31	-166.69	0.08359	-166.60641
D205	68.36556	10.15580	641	978026.556	-166.36	-166.45	0.01146	-166.43854
D206	68.36654	10.15563	640	978026.935	-166.28	-166.28	0.01175	-166.26825
D207	68.36746	10.15555	638	978027.028	-166.80	-166.61	0.01263	-166.59737
D208	68.36823	10.15489	637	978026.923	-167.20	-166.91	0.01634	-166.89366
D209	68.36925	10.15482	635	978027.461	-167.27	-166.79	0.01877	-166.77123
D210	68.37039	10.15486	634	978027.344	-167.70	-167.12	0.02126	-167.09874
D211	68.37143	10.15492	627	978028.394	-168.81	-167.56	0.04398	-167.51602
D212	68.37243	10.15501	629	978028.154	-168.44	-167.38	0.03432	-167.34568
D213	68.37337	10.15512	629	978028.013	-168.58	-167.52	0.03439	-167.48561
D214	68.37429	10.15485	624	978028.655	-169.48	-167.93	0.06019	-167.86981
D215	68.37505	10.15421	626	978028.284	-169.21	-167.86	0.04653	-167.81347
D216	68.37597	10.15415	625	978028.608	-169.19	-167.75	0.04846	-167.70154
D217	68.37672	10.15328	626	978028.451	-169.01	-167.66	0.04799	-167.61201
D218	68.37682	10.15233	626	978028.386	-169.05	-167.70	0.04897	-167.65103
D219	68.40079	10.15007	615	978029.234	-171.52	-169.11	0.12059	-168.98941
D220	68.40074	10.14884	619	978027.830	-171.66	-169.63	0.09696	-169.53304
D221	68.40050	10.14797	620	978027.598	-171.55	-169.62	0.10151	-169.51849
D222	68.40011	10.14710	613	978028.659	-172.62	-170.02	0.14475	-169.87525
D223	68.39992	10.14612	613	978029.082	-172.17	-169.57	0.15381	-169.41619
D224	68.39990	10.14504	609	978029.097	-173.36	-170.37	0.18558	-170.18442
D225	68.40001	10.14393	607	978029.035	-174.00	-170.82	0.20873	-170.61127
D226	68.40030	10.14283	606	978028.710	-174.60	-171.32	0.22018	-171.09982
D227	68.40077	10.14181	612	978028.311	-173.11	-170.42	0.16848	-170.25152
D228	68.40117	10.14088	608	978028.292	-174.34	-171.25	0.19274	-171.05726
D229	68.40164	10.13990	607	978028.438	-174.47	-171.29	0.2103	-171.07970

Estación	Longitud (°)	Latitud (°)	Altura (m)	Gravedad Observada (mgal)	Anomalía de aire libre (mgal)	Anomalía de Bouguer simple (mgal)	Corrección Topografica (mgal)	Anomalía de Bouguer total (mgal)
D230	68.40200	10.13887	604	978028.087	-175.72	-172.25	0.2413	-172.00870
D231	68.40252	10.13804	606	978028.421	-174.74	-171.46	0.22508	-171.23492
D232	68.40299	10.13713	602	978028.095	-176.27	-172.61	0.26643	-172.34357
D233	68.40337	10.13625	601	978028.136	-176.51	-172.75	0.27883	-172.47117
E234	68.40388	10.13537	606	978027.796	-175.28	-172.00	0.23636	-171.76364
E235	68.40428	10.13446	604	978027.804	-175.86	-172.39	0.25592	-172.13408
E236	68.40477	10.13357	598	978028.321	-177.17	-173.12	0.32069	-172.79931
E237	68.40552	10.13278	597	978029.307	-176.47	-172.32	0.33684	-171.98316
E238	68.40620	10.13213	599	978029.412	-175.72	-171.77	0.32235	-171.44765
E239	68.40707	10.13155	598	978028.710	-176.72	-172.67	0.31861	-172.35139
E240	68.40766	10.13076	604	978027.644	-175.91	-172.44	0.25399	-172.18601
E241	68.40812	10.12975	599	978027.369	-177.69	-173.74	0.30099	-173.43901
E242	68.40852	10.12873	608	978026.963	-175.29	-172.20	0.21797	-171.98203
E243	68.40857	10.12773	610	978026.854	-174.75	-171.86	0.18073	-171.67927
E244	68.40925	10.12691	610	978026.510	-175.07	-172.18	0.17656	-172.00344
E245	68.40989	10.12616	610	978026.187	-175.37	-172.48	0.1738	-172.30620
E246	68.41027	10.12516	613	978025.722	-174.88	-172.27	0.14431	-172.12569
E247	68.41043	10.12406	615	978025.265	-174.68	-172.27	0.12178	-172.14822
E248	68.41059	10.12316	617	978025.520	-173.78	-171.56	0.11444	-171.44556
E249	68.41079	10.12212	613	978025.467	-175.04	-172.43	0.14083	-172.28917
E250	68.41074	10.12112	615	978026.042	-173.81	-171.40	0.14443	-171.25557
E251	68.41053	10.12017	603	978027.843	-175.68	-172.12	0.26127	-171.85873
E252	68.39397	10.12188	608	978028.109	-173.93	-170.84	0.22361	-170.61639
E253	68.39424	10.12296	603	978028.947	-174.67	-171.10	0.27342	-170.82658
E254	68.39480	10.12396	598	978030.275	-174.91	-170.87	0.33986	-170.53014
E255	68.39535	10.12505	595	978030.389	-175.76	-171.42	0.38376	-171.03624
E256	68.39535	10.12613	599	978029.415	-175.53	-171.58	0.32222	-171.25778
E257	68.39549	10.12719	601	978028.939	-175.43	-171.67	0.29229	-171.37771
E258	68.39555	10.12829	602	978028.581	-175.51	-171.85	0.27513	-171.57487
E259	68.39563	10.12971	602	978028.415	-175.72	-172.06	0.26985	-171.79015
E260	68.39577	10.13088	604	978028.177	-175.38	-171.91	0.24665	-171.66335
E261	68.39585	10.13223	607	978027.738	-174.93	-171.75	0.21474	-171.53526
E262	68.39597	10.13330	606	978027.476	-175.54	-172.26	0.2205	-172.03950
E263	68.39607	10.13413	605	978027.300	-176.05	-172.67	0.23409	-172.43591
E264	68.39572	10.13591	602	978028.532	-175.80	-172.13	0.26272	-171.86728
E265	68.39571	10.13688	606	978027.676	-175.45	-172.17	0.22913	-171.94087
E266	68.39571	10.13811	607	978027.305	-175.55	-172.37	0.21268	-172.15732
E267	68.39553	10.13935	607	978027.568	-175.32	-172.14	0.20723	-171.93277
E268	68.39552	10.14012	609	978027.499	-174.80	-171.81	0.18904	-171.62096
E269	68.39546	10.14113	610	978027.726	-174.30	-171.40	0.17488	-171.22512
E270	68.39542	10.14215	609	978027.740	-174.62	-171.63	0.1817	-171.44830
E271	68.39534	10.14349	609	978027.948	-174.46	-171.47	0.18469	-171.28531
E272	68.39516	10.14456	607	978028.650	-174.41	-171.22	0.19909	-171.02091
E273	68.39430	10.14465	615	978027.952	-172.64	-170.23	0.13698	-170.09302
E274	68.39380	10.14531	614	978027.909	-173.01	-170.50	0.13262	-170.36738
E275	68.39380	10.14628	615	978028.398	-172.24	-169.83	0.12966	-169.70034
E276	68.39384	10.14738	612	978028.811	-172.79	-170.09	0.15207	-169.93793
E277	68.39396	10.14867	610	978029.622	-172.64	-169.74	0.17224	-169.56776
E278	68.39411	10.14956	609	978029.788	-172.81	-169.82	0.17607	-169.64393
E279	68.39407	10.15060	613	978029.648	-171.74	-169.14	0.147	-168.99300
E280	68.39414	10.15183	612	978030.006	-171.73	-169.03	0.15044	-168.87956
E281	68.39429	10.15306	612	978029.925	-171.85	-169.15	0.14959	-169.00041
E282	68.39431	10.15407	616	978029.921	-170.65	-168.34	0.11695	-168.22305
E283	68.39438	10.15500	616	978029.750	-170.85	-168.54	0.11164	-168.42836
E284	68.39447	10.15605	620	978029.484	-169.92	-167.99	0.08968	-167.90032
E285	68.39479	10.15684	617	978029.231	-171.12	-168.91	0.10057	-168.80943
E286	68.39514	10.15777	623	978028.691	-169.84	-168.20	0.07042	-168.12958
E287	68.39500	10.15878	622	978028.027	-170.84	-169.11	0.06894	-169.04106
E288	68.39473	10.15959	628	978027.493	-169.55	-168.39	0.04141	-168.34859

Estación	Longitud (°)	Latitud (°)	Altura (m)	Gravedad Observada (mgal)	Anomalía de aire libre (mgal)	Anomalía de Bouguer simple (mgal)	Corrección Topografica (mgal)	Anomalía de Bouguer total (mgal)
E289	68.39500	10.16044	634	978025.864	-169.36	-168.78	0.02183	-168.75817
E290	68.39603	10.16045	636	978025.076	-169.53	-169.14	0.01832	-169.12168
E291	68.39633	10.15750	622	978028.869	-169.96	-168.23	0.06754	-168.16246
E292	68.39789	10.15723	627	978027.614	-169.67	-168.41	0.0384	-168.37160
E293	68.39867	10.15806	633	978026.923	-168.53	-167.86	0.02332	-167.83668
F294	68.41367	10.13770	600	978028.912	-176.09	-172.23	0.29369	-171.93631
F295	68.41208	10.13653	600	978028.754	-176.21	-172.35	0.30432	-172.04568
F296	68.41119	10.13448	595	978028.334	-178.11	-173.77	0.36068	-173.40932
F297	68.40900	10.13301	601	978028.103	-176.44	-172.68	0.2892	-172.39080
F298	68.40934	10.13134	604	978027.202	-176.37	-172.90	0.25704	-172.64296
F299	68.41013	10.12962	601	978026.835	-177.60	-173.85	0.28181	-173.56819
F300	68.41318	10.12872	607	978025.947	-176.61	-173.43	0.2097	-173.22030
F301	68.41367	10.12593	612	978025.581	-175.35	-172.65	0.1521	-172.49790
F302	68.41283	10.13192	603	978027.271	-176.62	-173.06	0.26023	-172.79977
F303	68.41505	10.13240	608	978027.280	-175.09	-172.00	0.20042	-171.79958
F304	68.41363	10.13547	603	978028.161	-175.84	-172.28	0.26567	-172.01433
F305	68.41483	10.13505	602	978028.379	-175.92	-172.26	0.27159	-171.98841
F306	68.41602	10.13818	605	978027.734	-175.74	-172.37	0.24086	-172.12914
F307	68.42083	10.14274	612	978025.400	-176.06	-173.36	0.14509	-173.21491
F308	68.42161	10.14380	617	978025.657	-174.29	-172.07	0.12561	-171.94439
F309	68.42247	10.14455	609	978025.184	-177.25	-174.27	0.16876	-174.10124
F310	68.42327	10.14535	617	978024.884	-175.11	-172.89	0.1212	-172.76880
F311	68.42423	10.14597	613	978024.578	-176.67	-174.07	0.14057	-173.92943
F312	68.42515	10.14645	611	978024.395	-177.48	-174.69	0.15063	-174.53937
F313	68.42624	10.14703	616	978024.223	-176.13	-173.82	0.11476	-173.70524
F314	68.42701	10.14764	617	978024.066	-176.00	-173.78	0.10525	-173.67475
F315	68.42796	10.14827	615	978023.905	-176.80	-174.39	0.11876	-174.27124
F316	68.42886	10.14570	616	978023.164	-177.15	-174.84	0.11046	-174.72954
F317	68.42867	10.14895	615	978023.768	-176.96	-174.55	0.12241	-174.42759
F318	68.42973	10.14948	613	978023.642	-177.71	-175.11	0.13629	-174.97371
F319	68.43117	10.14986	615	978023.426	-177.33	-174.92	0.11705	-174.80295
F320	68.43213	10.15016	620	978023.404	-175.81	-173.89	0.08818	-173.80182
F321	68.43332	10.15047	614	978023.343	-177.74	-175.23	0.11651	-175.11349
F322	68.43434	10.15056	622	978023.455	-175.16	-173.42	0.07457	-173.34543
F323	68.43543	10.15078	621	978023.473	-175.46	-173.62	0.07092	-173.54908
F324	68.43628	10.15132	622	978023.377	-175.26	-173.52	0.06756	-173.45244
F325	68.43626	10.15249	619	978023.465	-176.13	-174.11	0.08155	-174.02845
F326	68.43701	10.15322	626	978023.502	-173.96	-172.61	0.05293	-172.55707
F327	68.43807	10.15327	622	978023.501	-175.20	-173.46	0.06208	-173.39792
F328	68.43908	10.15330	623	978023.550	-174.84	-173.20	0.05765	-173.14235
F329	68.44008	10.15318	625	978023.507	-174.26	-172.82	0.04975	-172.77025
F330	68.44147	10.15287	619	978023.613	-176.00	-173.97	0.08061	-173.88939
F331	68.44275	10.15303	626	978023.849	-173.61	-172.26	0.04793	-172.21207
F332	68.44389	10.15337	628	978023.509	-173.34	-172.18	0.03501	-172.14499
F333	68.44487	10.15416	634	978022.920	-172.10	-171.52	0.02088	-171.49912
F334	68.44451	10.15604	638	978022.854	-170.99	-170.80	0.01973	-170.78027
F335	68.44410	10.15777	640	978023.021	-170.26	-170.26	0.0237	-170.23630
F336	68.44443	10.15971	639	978022.770	-170.88	-170.79	0.01659	-170.77341
F337	68.44476	10.16150	642	978023.148	-169.64	-169.83	0.01998	-169.81002
F338	68.44441	10.16353	633	978023.895	-171.73	-171.06	0.01593	-171.04407
F339	68.44329	10.16537	640	978024.435	-169.09	-169.09	0.01248	-169.07752
F340	68.44206	10.16714	639	978024.890	-169.00	-168.90	0.01196	-168.88804
F341	68.44142	10.16913	640	978024.327	-169.31	-169.31	0.01315	-169.29685
F342	68.44135	10.17108	644	978025.056	-167.41	-167.80	0.03008	-167.76992
F343	68.44023	10.17267	642	978025.496	-167.64	-167.83	0.02767	-167.80233
F344	68.43872	10.17412	633	978026.866	-169.09	-168.42	0.01966	-168.40034
F345	68.43758	10.17575	636	978027.028	-168.05	-167.67	0.01177	-167.65823
F346	68.43693	10.17791	638	978027.417	-167.12	-166.92	0.00754	-166.91246
F347	68.43593	10.17919	637	978028.414	-166.47	-166.18	0.00761	-166.17239

Estación	Longitud (°)	Latitud (°)	Altura (m)	Gravedad Observada (mgal)	Anomalía de aire libre (mgal)	Anomalía de Bouguer simple (mgal)	Corrección Topografica (mgal)	Anomalía de Bouguer total (mgal)
F348	68.41913	10.16460	609	978027.855	-175.21	-172.22	0.18146	-172.03854
F349	68.41984	10.16527	612	978027.687	-174.47	-171.77	0.15394	-171.61606
F350	68.42074	10.16597	612	978027.447	-174.73	-172.04	0.14622	-171.89378
F351	68.42149	10.16675	615	978027.182	-174.10	-171.69	0.12132	-171.56868
F352	68.42239	10.16748	618	978026.925	-173.45	-171.33	0.10668	-171.22332
F353	68.42314	10.16816	613	978026.717	-175.22	-172.62	0.13328	-172.48672
F354	68.42394	10.16882	613	978026.571	-175.39	-172.79	0.1346	-172.65540
F355	68.42485	10.16958	617	978026.544	-174.21	-171.99	0.10731	-171.88269
F356	68.42537	10.17005	616	978026.559	-174.52	-172.20	0.10957	-172.09043
F357	68.42629	10.17081	621	978026.602	-172.95	-171.12	0.07825	-171.04175
F358	68.42694	10.17141	619	978026.689	-173.50	-171.48	0.0822	-171.39780
F359	68.42775	10.17212	622	978027.037	-172.25	-170.52	0.06791	-170.45209
F360	68.42854	10.17277	620	978027.247	-172.68	-170.75	0.07796	-170.67204
G361	68.42941	10.17355	620	978027.421	-172.53	-170.60	0.07924	-170.52076
G362	68.43027	10.17426	625	978027.679	-170.75	-169.30	0.04818	-169.25182
G363	68.43117	10.17508	625	978027.933	-170.52	-169.08	0.04571	-169.03429
G364	68.43209	10.17586	626	978028.109	-170.06	-168.71	0.04196	-168.66804
G365	68.43310	10.17682	625	978028.338	-170.17	-168.73	0.04524	-168.68476
G366	68.43402	10.17746	633	978028.391	-167.67	-167.00	0.01933	-166.98067
G367	68.43473	10.17808	635	978028.332	-167.13	-166.65	0.01262	-166.63738
G368	68.43388	10.17327	626	978027.596	-170.49	-169.14	0.04474	-169.09526
G369	68.43146	10.17207	619	978026.962	-173.25	-171.23	0.08357	-171.14643
G370	68.43188	10.17356	624	978027.476	-171.24	-169.70	0.0532	-169.64680
G371	68.42962	10.16941	618	978026.478	-173.96	-171.84	0.09415	-171.74585
G372	68.42269	10.17056	616	978026.982	-174.11	-171.80	0.11293	-171.68707
G373	68.42251	10.17337	619	978027.248	-173.01	-170.98	0.0889	-170.89110
G374	68.42239	10.17578	620	978027.613	-172.41	-170.48	0.07843	-170.40157
G375	68.41978	10.17563	617	978027.681	-173.26	-171.04	0.10153	-170.93847
G376	68.41693	10.17501	618	978028.181	-172.43	-170.31	0.09665	-170.21335
G377	68.41449	10.17588	620	978027.989	-172.03	-170.11	0.08365	-170.02635
G378	68.41217	10.17535	627	978027.229	-170.62	-169.36	0.05072	-169.30928
G379	68.42004	10.16772	615	978027.705	-173.61	-171.20	0.12402	-171.07598
G380	68.41795	10.16941	610	978028.610	-174.30	-171.41	0.17256	-171.23744
G381	68.41728	10.15996	608	978027.437	-175.79	-172.71	0.19426	-172.51574
G382	68.42627	10.16256	609	978025.101	-177.90	-174.91	0.17916	-174.73084
G383	68.42108	10.15956	610	978025.406	-177.19	-174.30	0.17498	-174.12502
G384	68.40772	10.14943	607	978028.090	-175.12	-171.94	0.21222	-171.72778
G385	68.40985	10.14796	604	978027.717	-176.37	-172.90	0.25303	-172.64697
G386	68.40767	10.14700	603	978028.694	-175.67	-172.10	0.26107	-171.83893
G387	68.40432	10.14504	612	978027.990	-173.54	-170.84	0.16014	-170.67986
G388	68.40723	10.14382	600	978029.507	-175.68	-171.83	0.29608	-171.53392
G389	68.42624	10.15041	612	978024.727	-176.97	-174.27	0.15114	-174.11886
G390	68.42715	10.15579	611	978024.579	-177.59	-174.80	0.16169	-174.63831
G391	68.42644	10.15934	611	978024.607	-177.68	-174.88	0.16212	-174.71788
G392	68.42344	10.15349	603	978025.328	-179.24	-175.67	0.25404	-175.41596
G393	68.42073	10.15257	604	978025.703	-178.53	-175.06	0.24478	-174.81522
G394	68.43065	10.15543	612	978023.797	-178.06	-175.36	0.14763	-175.21237
H395	68.40886	10.15295	607	978027.754	-175.56	-172.38	0.21012	-172.16988
H396	68.41085	10.15113	603	978028.004	-176.49	-172.92	0.25866	-172.66134
H397	68.41150	10.14905	599	978028.289	-177.38	-173.42	0.31046	-173.10954
H398	68.41216	10.15406	604	978027.148	-177.13	-173.66	0.24407	-173.41593
H399	68.41287	10.15080	604	978027.885	-176.29	-172.82	0.24891	-172.57109
H400	68.43463	10.16698	620	978026.200	-173.54	-171.62	0.08166	-171.53834
H401	68.43817	10.16744	627	978025.235	-172.36	-171.11	0.04236	-171.06764
H402	68.37517	10.13687	647	978022.599	-167.87	-168.55	0.70147	-167.84853
H403	68.37796	10.13890	636	978024.946	-168.98	-168.60	0.22307	-168.37693
H404	68.38104	10.14094	624	978027.129	-170.57	-169.02	0.10557	-168.91443
H405	68.38117	10.13534	629	978025.523	-170.45	-169.39	0.09871	-169.29129
H406	68.38438	10.13782	613	978027.719	-173.27	-170.67	0.15803	-170.51197

Estación	Longitud (°)	Latitud (°)	Altura (m)	Gravedad Observada (mgal)	Anomalía de aire libre (mgal)	Anomalía de Bouguer simple (mgal)	Corrección Topografica (mgal)	Anomalía de Bouguer total (mgal)
H407	68.39433	10.13399	608	978027.387	-175.03	-171.94	0.19881	-171.74119
H408	68.40027	10.12606	592	978030.689	-176.42	-171.79	0.42906	-171.36094
H409	68.40106	10.12199	597	978029.682	-175.75	-171.61	0.35597	-171.25403
H410	68.40504	10.11918	609	978026.886	-174.76	-171.77	0.19284	-171.57716
H411	68.40513	10.12406	625	978024.790	-172.07	-170.62	0.08409	-170.53591
H412	68.39735	10.14484	607	978029.495	-173.57	-170.39	0.21092	-170.17908
H413	68.39748	10.14751	607	978029.978	-173.17	-169.99	0.21097	-169.77903
H414	68.39764	10.14992	611	978030.074	-171.91	-169.12	0.16875	-168.95125
H415	68.39582	10.14858	611	978030.005	-171.94	-169.15	0.17094	-168.97906
H416	68.39568	10.14643	606	978029.574	-173.85	-170.57	0.21308	-170.35692
H417	68.39864	10.14874	608	978030.052	-172.83	-169.74	0.19837	-169.54163
H418	68.39812	10.14608	606	978029.486	-173.93	-170.65	0.22024	-170.42976
H419	68.39128	10.14651	616	978028.125	-172.21	-169.90	0.112	-169.78800
H420	68.38862	10.14749	613	978028.934	-172.36	-169.76	0.13753	-169.62247
H421	68.38866	10.15019	619	978029.317	-170.21	-168.19	0.08995	-168.10005
H422	68.39122	10.14915	620	978028.864	-170.32	-168.39	0.08314	-168.30686
H423	68.39131	10.15358	615	978029.755	-171.11	-168.70	0.11777	-168.58223
H424	68.38981	10.15530	619	978029.641	-170.05	-168.02	0.08366	-167.93634
I425	68.37340	10.14448	646	978023.127	-167.89	-168.47	0.48059	-167.98786
I426	68.37512	10.14135	695	978010.031	-165.77	-171.07	0.63707	-170.43293
I427	68.37178	10.13930	733	978002.764	-161.24	-170.21	0.80021	-169.40979
I428	68.36907	10.13802	788	977990.665	-156.33	-170.60	1.26188	-169.33812
I429	68.37819	10.14229	630	978026.699	-169.19	-168.22	0.21075	-168.00925
I430	68.38019	10.14838	616	978028.707	-171.69	-169.38	0.1267	-169.25330
I431	68.37771	10.14975	622	978028.355	-170.23	-168.50	0.08612	-168.41388
I432	68.37486	10.15009	627	978027.260	-169.80	-168.54	0.06914	-168.47086
I433	68.37192	10.15069	633	978026.367	-168.86	-168.18	0.05945	-168.12055
I434	68.40178	10.15300	629	978026.610	-169.92	-168.86	0.05322	-168.80678
I435	68.40231	10.15565	619	978029.262	-170.44	-168.41	0.09281	-168.31719
I436	68.40323	10.16047	616	978029.257	-171.52	-169.20	0.11975	-169.08025
I437	68.40412	10.16416	619	978027.787	-172.18	-170.15	0.09803	-170.05197
I438	68.40534	10.16914	626	978027.626	-170.33	-168.98	0.0593	-168.92070
I439	68.40750	10.17215	628	978028.061	-169.38	-168.22	0.05379	-168.16621
I440	68.40978	10.17470	642	978025.578	-167.62	-167.81	0.03778	-167.77222
I441	68.42373	10.16333	610	978025.430	-177.29	-174.39	0.17013	-174.21987
I442	68.42521	10.16550	615	978025.787	-175.45	-173.04	0.12206	-172.91794
I443	68.43933	10.15877	622	978024.513	-174.36	-172.62	0.0676	-172.55240
I444	68.44044	10.16072	624	978024.356	-173.96	-172.42	0.05604	-172.36396
I445	68.38896	10.15371	621	978028.957	-170.06	-168.23	0.07502	-168.15498
I446	68.38915	10.15795	616	978029.177	-171.52	-169.21	0.10863	-169.10137
I447	68.39179	10.15600	622	978029.056	-169.73	-167.99	0.07385	-167.91615
I448	68.39692	10.15541	626	978027.770	-169.76	-168.41	0.04722	-168.36278
I449	68.39618	10.15409	622	978028.647	-170.08	-168.34	0.07178	-168.26822
I450	68.39887	10.15300	627	978027.082	-170.07	-168.81	0.05051	-168.75949
I451	68.38738	10.14888	615	978028.694	-172.03	-169.62	0.12279	-169.49721
I452	68.36473	10.15147	644	978025.024	-166.83	-167.21	0.20477	-167.00523
I453	68.36145	10.15146	658	978023.655	-163.88	-165.61	0.19099	-165.41901
I454	68.35788	10.15158	657	978023.088	-164.76	-166.39	0.20261	-166.18739
J455	68.38495	10.15629	622	978029.150	-169.64	-167.91	0.06585	-167.84415
J456	68.38492	10.15284	615	978030.625	-170.22	-167.81	0.1239	-167.68610
J457	68.38184	10.16324	624	978029.222	-169.17	-167.63	0.05231	-167.57769
J458	68.38173	10.16136	622	978029.666	-169.29	-167.55	0.06813	-167.48187
J459	68.38084	10.15890	618	978030.380	-169.73	-167.61	0.10099	-167.50901
J460	68.38027	10.15736	628	978030.735	-166.24	-165.08	0.04313	-165.03687
J461	68.38415	10.15983	625	978028.922	-169.06	-167.61	0.05384	-167.55616
J462	68.38258	10.15736	618	978029.282	-170.78	-168.66	0.09493	-168.56507
J463	68.38613	10.17148	641	978027.015	-166.39	-166.49	0.01804	-166.47196
J464	68.38835	10.17369	642	978026.048	-167.12	-167.31	0.09295	-167.21705
J465	68.38989	10.17660	680	978019.061	-162.47	-166.32	0.187	-166.13300

Estación	Longitud (°)	Latitud (°)	Altura (m)	Gravedad Observada (mgal)	Anomalía de aire libre (mgal)	Anomalía de Bouguer simple (mgal)	Corrección Topográfica (mgal)	Anomalía de Bouguer total (mgal)
J466	68.37617	10.15929	636	978027.443	-167.12	-166.74	0.01449	-166.72551
J467	68.37636	10.15787	630	978029.315	-167.06	-166.09	0.02764	-166.06236
J468	68.37879	10.15970	626	978029.385	-168.28	-166.93	0.04478	-166.88522
J469	68.37926	10.16203	629	978028.484	-168.33	-167.27	0.03191	-167.23809
J470	68.37937	10.16548	636	978028.065	-166.69	-166.31	0.0107	-166.29930
J471	68.37811	10.15594	621	978030.405	-168.69	-166.85	0.06827	-166.78173
J472	68.40272	10.14909	634	978025.204	-169.66	-169.08	0.06452	-169.01548
J473	68.40232	10.14647	628	978025.753	-170.88	-169.72	0.06708	-169.65292
J474	68.39797	10.13607	599	978028.274	-176.98	-173.03	0.30441	-172.72559
J475	68.39923	10.13527	602	978028.578	-175.73	-172.07	0.27654	-171.79346
J476	68.39989	10.13599	603	978028.675	-175.35	-171.78	0.26298	-171.51702
J477	68.39792	10.13229	602	978028.220	-175.99	-172.33	0.27293	-172.05707
J478	68.39801	10.12841	598	978028.437	-176.89	-172.84	0.33081	-172.50919
J479	68.39646	10.12122	589	978030.636	-177.25	-172.33	0.47513	-171.85487
J480	68.39177	10.13847	602	978028.499	-175.91	-172.25	0.25116	-171.99884
J481	68.42261	10.14155	612	978024.836	-176.58	-173.88	0.14801	-173.73199
J482	68.43074	10.14431	619	978022.871	-176.47	-174.45	0.08741	-174.36259
K483	68.39366	10.13607	607	978028.224	-174.57	-171.39	0.20792	-171.18208
K484	68.38903	10.13245	605	978028.624	-174.67	-171.30	0.2438	-171.05620
K485	68.38517	10.13238	621	978026.137	-172.22	-170.39	0.11286	-170.27714
K486	68.38307	10.12925	648	978023.615	-166.31	-167.08	0.14748	-166.93252
K487	68.38737	10.12708	618	978027.285	-171.83	-169.71	0.13666	-169.57334
K488	68.38672	10.12442	630	978023.094	-172.23	-171.27	0.07411	-171.19589
K489	68.38816	10.13030	616	978027.579	-172.25	-169.94	0.14295	-169.79705
K490	68.38311	10.12511	658	978019.954	-166.76	-168.49	0.14627	-168.34373
K491	68.38786	10.13441	608	978028.740	-173.69	-170.60	0.20575	-170.39425
K492	68.40721	10.16019	608	978028.664	-174.57	-171.49	0.19766	-171.29234
K493	68.41091	10.16279	604	978028.577	-175.97	-172.50	0.24471	-172.25529
K494	68.40829	10.16478	611	978028.577	-173.88	-171.08	0.16894	-170.91106
K495	68.41011	10.16953	609	978028.735	-174.48	-171.50	0.19338	-171.30662
K496	68.41318	10.17125	614	978029.186	-172.54	-170.04	0.13453	-169.90547
K497	68.41383	10.16856	619	978028.986	-171.12	-169.09	0.09733	-168.99267
K498	68.41346	10.16599	608	978028.943	-174.47	-171.39	0.19312	-171.19688
K499	68.42010	10.17232	613	978027.580	-174.49	-171.89	0.13702	-171.75298
K500	68.40142	10.13349	594	978028.394	-178.33	-173.89	0.37781	-173.51219
K501	68.40755	10.12378	625	978023.263	-173.59	-172.14	0.06806	-172.07194

➤ E.2. Mapas gravimétricos obtenidos a partir del programa Oasis Montaj

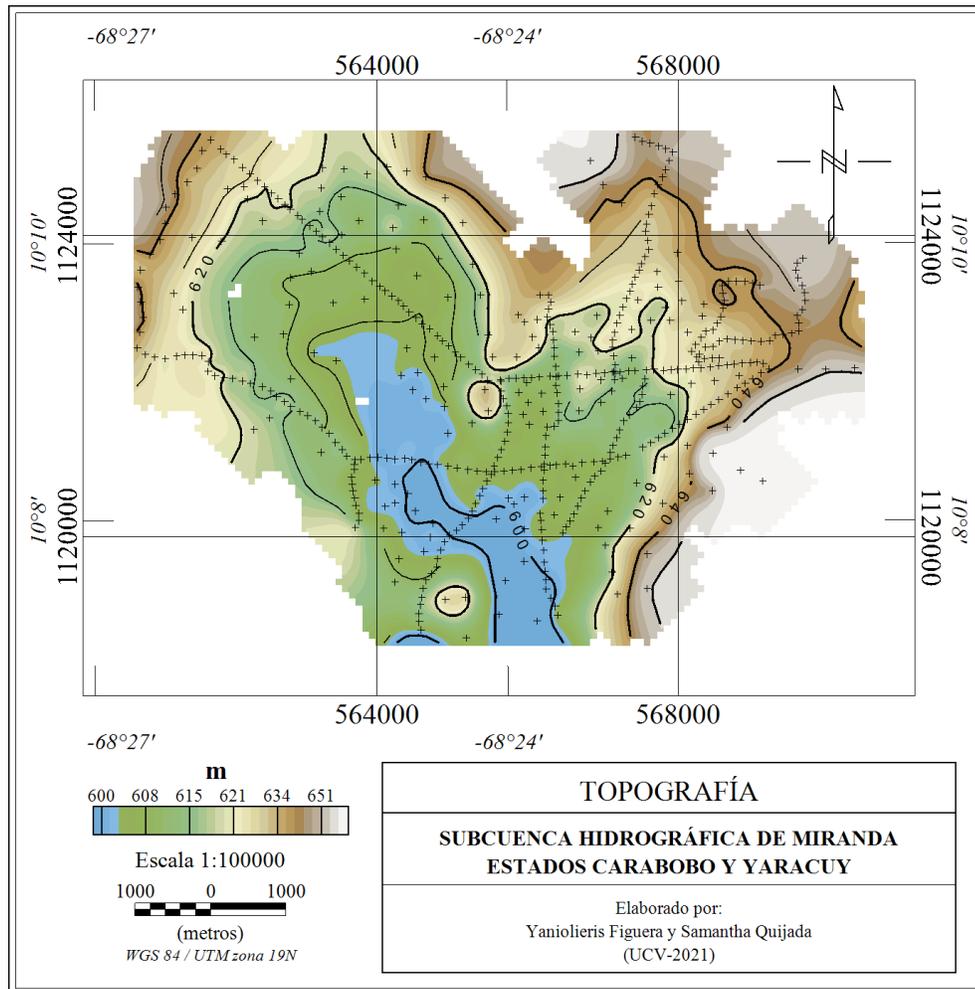


Figura E.1 Mapa topográfico del área sedimentaria de la subcuena de Miranda, estados Carabobo-Yaracuy (formato de Oasis).

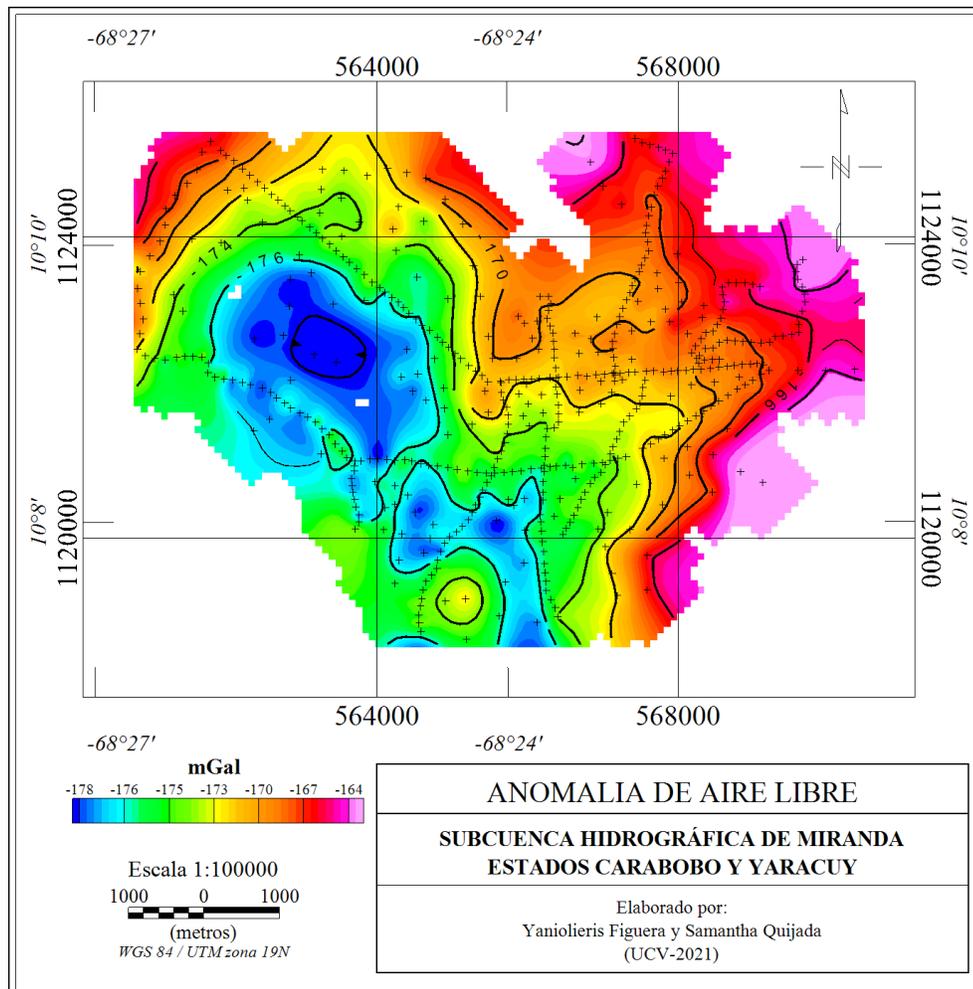


Figura E.2 Mapa de anomalía de aire libre del área sedimentaria de la subcuenca de Miranda, estados Carabobo-Yaracuy (formato de Oasis).

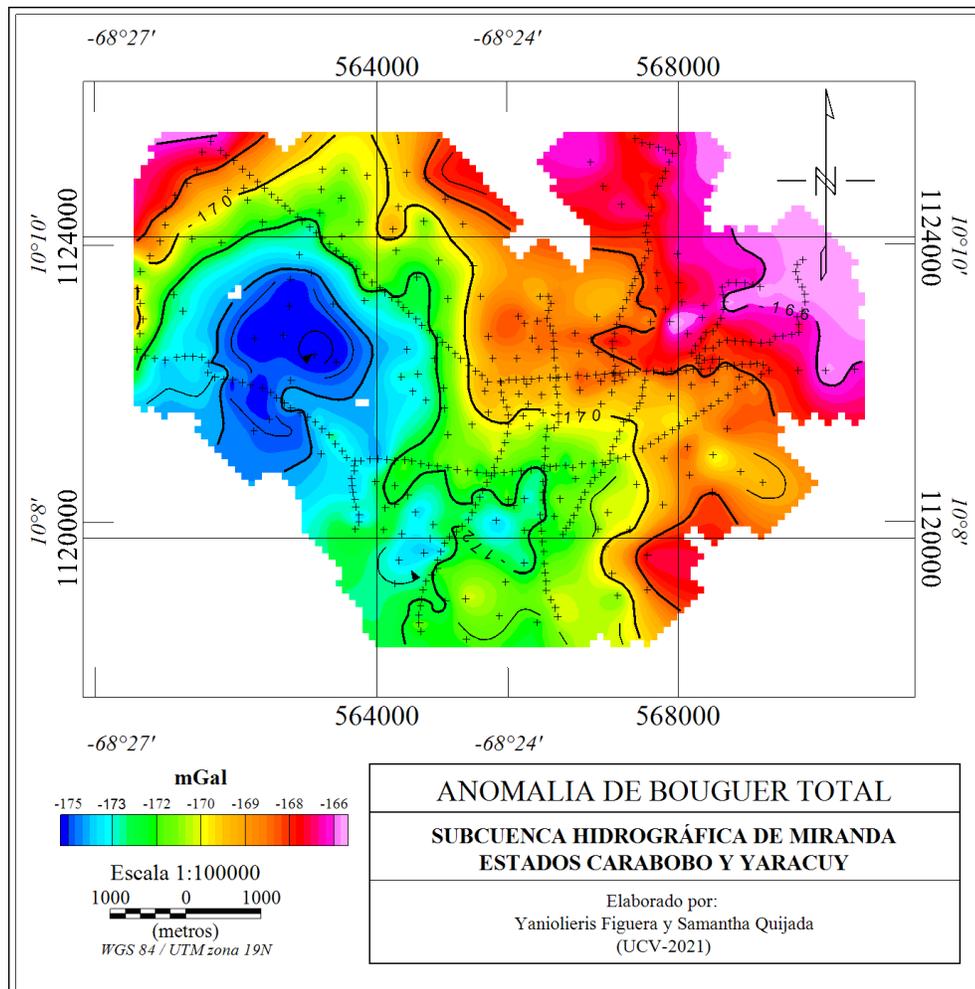


Figura E.3 Mapa de anomalía de Bouguer total del área sedimentaria de la subcuenca de Miranda, estados Carabobo-Yaracuy, densidad 2.3 g/cm³ (formato de Oasis).

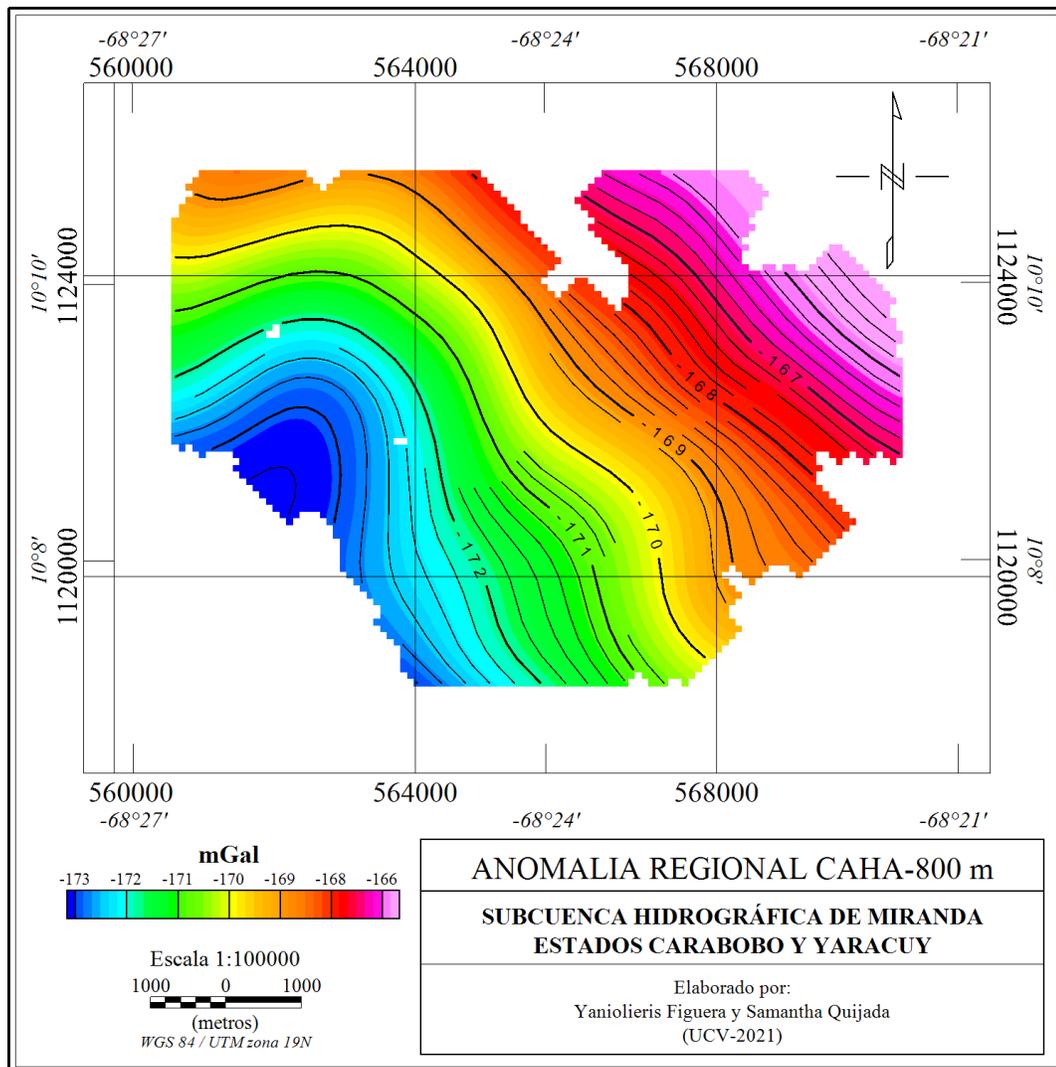


Figura E.4 Mapa de anomalía regional por continuación analítica hacia arriba a 800 m del área sedimentaria de la subcuenca de Miranda, estados Carabobo-Yaracuy, densidad 2.3 g/cm³ (formato de Oasis).

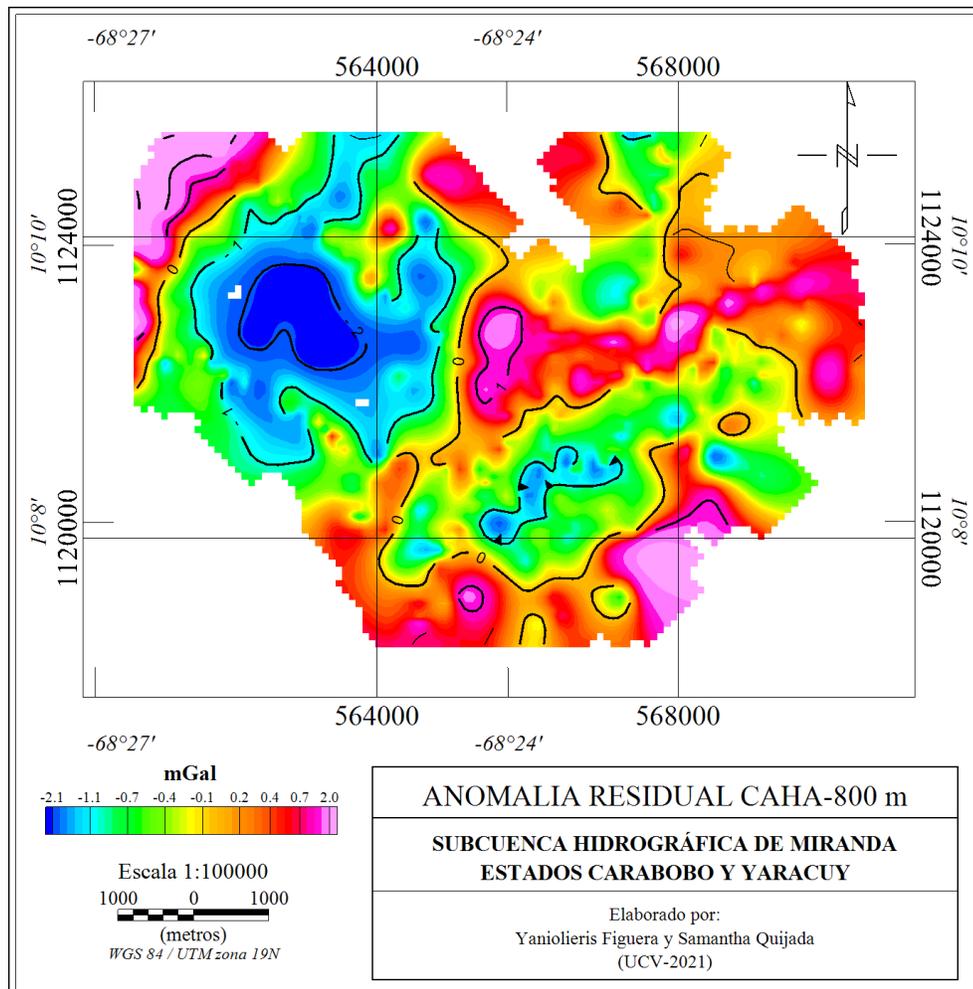


Figura E.5 Mapa de anomalía residual por continuación analítica hacia arriba a 800 m del área sedimentaria de la subcuenca de Miranda, estados Carabobo-Yaracuy, densidad 2.3 g/cm³ (formato de Oasis).

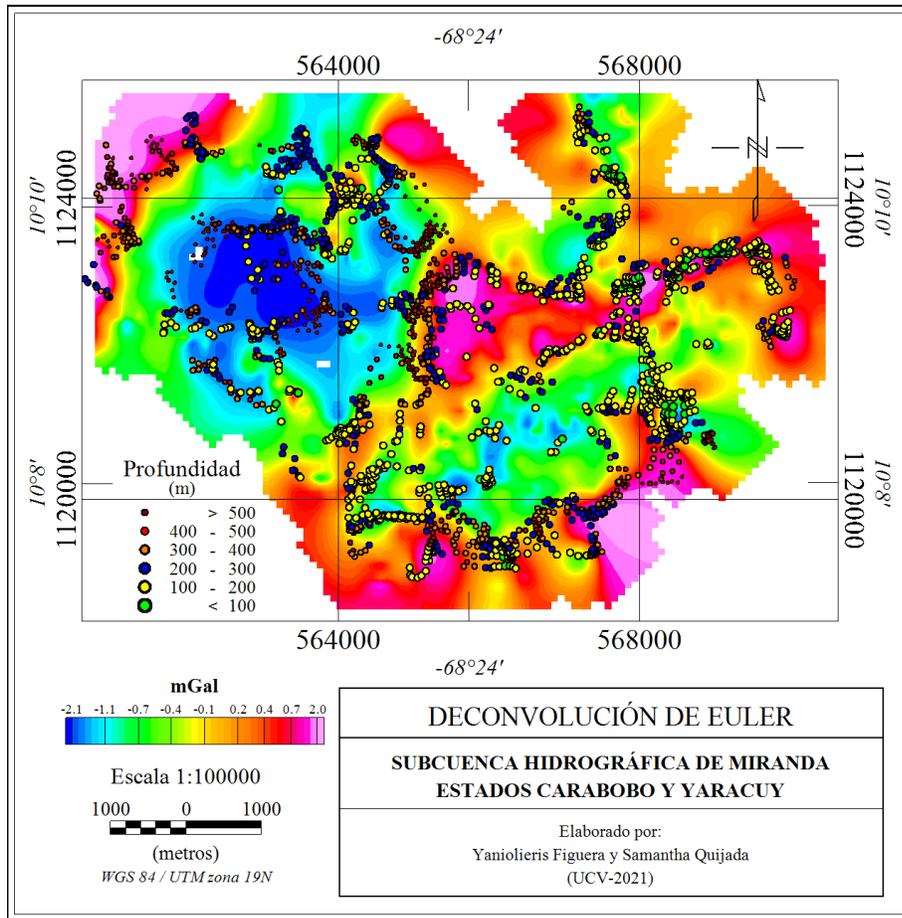


Figura E.6 Solución obtenida para la Deconvolución de Euler (I=1.0, T=20, W=8).

➤ **.E.3. Pruebas de deconvolución de Euler**

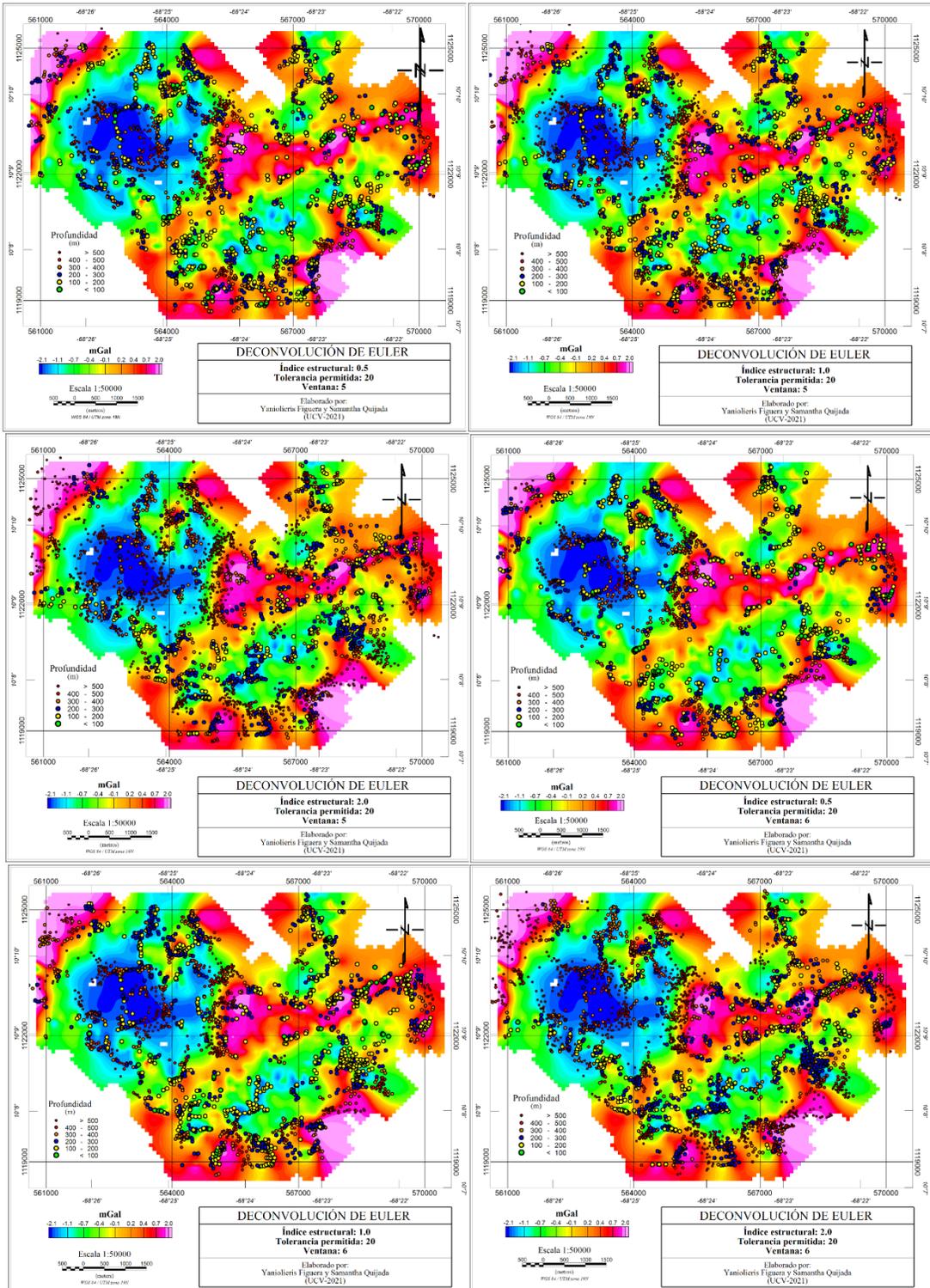


Figura E.7 Pruebas para definir parámetros de la deconvolución de Euler

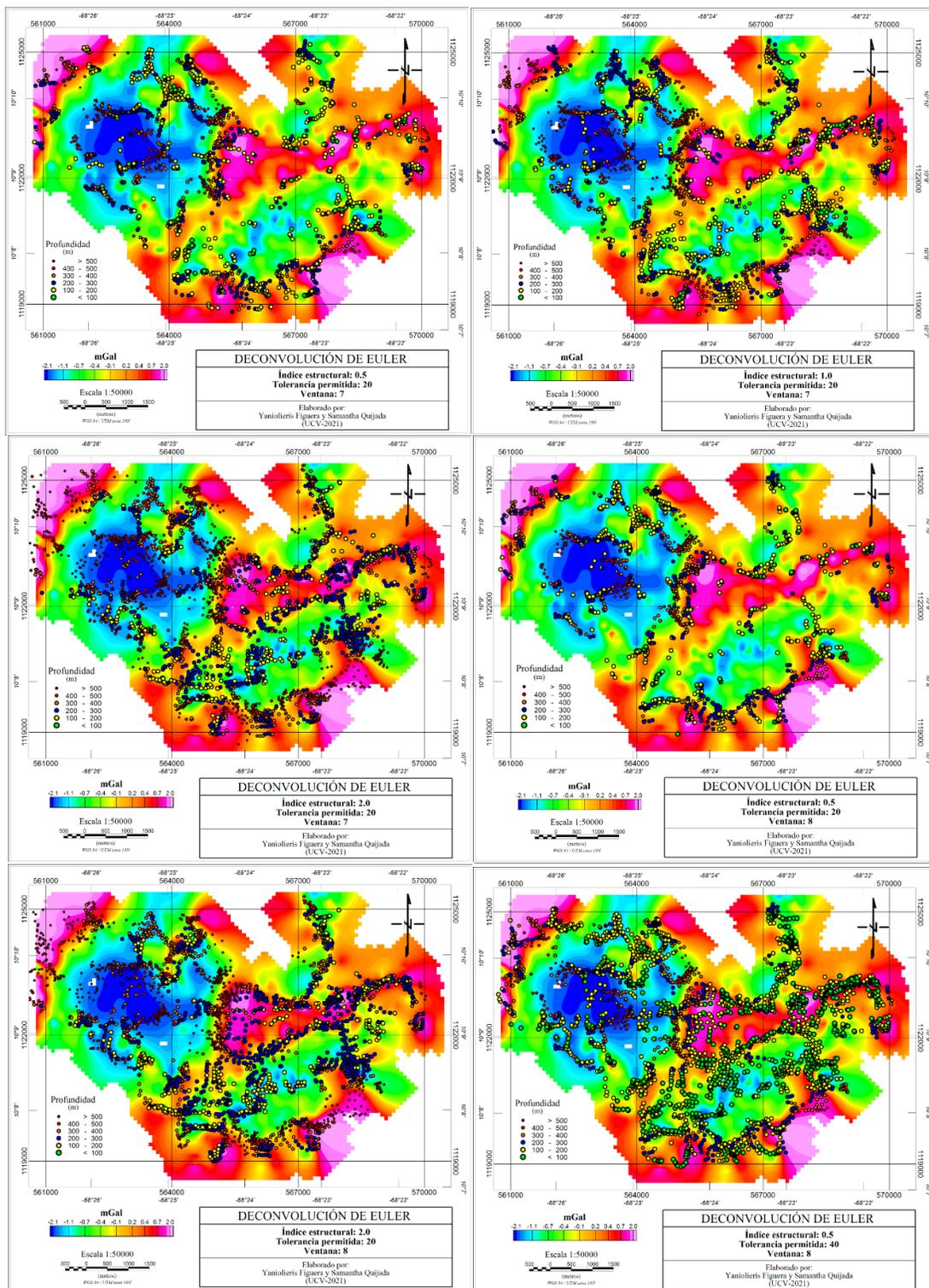


Figura E.8 Pruebas para definir parámetros de la deconvolución de Euler.

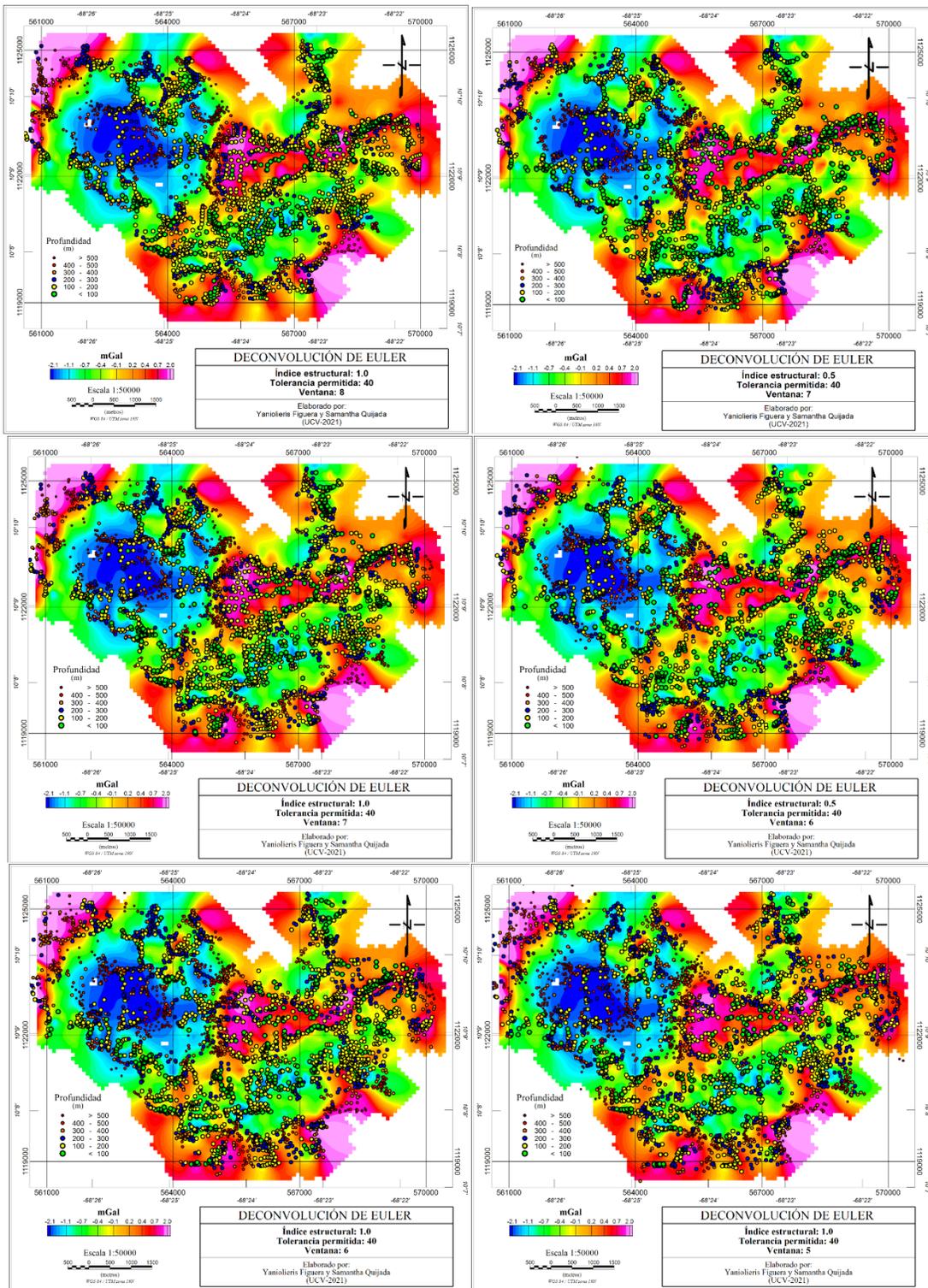


Figura E.9 Pruebas para definir parámetros de la deconvolución de Euler.