



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA

COLEGIO DE INGENIERÍA GEOFÍSICA



---

“DETECCIÓN DE OQUEDADES EN EL SUBSUELO DE LA ZONA DEL PARQUE  
DE LA ORQUÍDEA EN XALAPA, VERACRUZ MEDIANTE GRAVIMETRÍA Y  
GEORADAR”.

---

PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN INGENIERÍA GEOFÍSICA

P R E S E N T A:

**PAMELA BIBIANA MÁRQUEZ ARELLANO**

**DIRECTOR INTERNO:** M.C. JOSÉ SERRANO ORTÍZ

**DIRECTORA EXTERNA:** DRA KATRIN SIERON

**ASESOR EXTERNO:** DR BLAKE WEISSLING

H. PUEBLA DE ZARAGOZA, PUEBLA, A 31 DE MAYO DEL 2021



**BUAP**

Oficio No. SAC/1057/2021

**C. PAMELA BIBIANA MARQUEZ ARELLANO  
PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA  
GEOFÍSICA  
Presente.**

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional en línea, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

**“DETECCIÓN DE OQUEDADES EN EL SUBSUELO DE LA ZONA DEL PARQUE DE LA ORQUÍDEA EN XALAPA, VERACRUZ MEDIANTE GRAVIMETRÍA Y GEORADAR.”**

Por lo anterior hago de su conocimiento que se asigna como asesor interno de tema al Mtro. José Serrano Ortíz.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

**Atentamente**

**“Pensar bien, para vivir mejor”  
H. Puebla de Z. a 25 de mayo de 2021**

**M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora  
Director**



M'ACGZ /barv  
C.c.p. Interesado  
C.c.p. Archivo

Facultad  
de Ingeniería

Bldv. Valsequillo y Av. San Claudio  
s/n, edif. ING 4, Col. San Manuel,  
Ciudad Universitaria,  
Puebla, Pue. C.P. 72570  
222 229 55 00 Ext. 7610

M. I. Ángel Cecilio Guerrero Zamora  
Director de la Facultad de Ingeniería  
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
P r e s e n t e.

El que suscribe: Mtro. José Serrano Ortíz, asesor interno del tema de tesis:

“DETECCIÓN DE OQUEDADES EN EL SUBSUELO DE LA ZONA DEL PARQUE DE LA ORQUÍDEA EN XALAPA, VERACRUZ MEDIANTE GRAVIMETRÍA Y GEORADAR.”

Presentada por la C. Pamela Bibiana Márquez Arellano, pasante del Colegio de Ingeniería Geofísica, y en atención al oficio No. SAC/1057/2021 con fecha de emisión 25 de mayo de 2021, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión del mismo.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

A t e n t a m e n t e  
“Pensar bien, para vivir mejor”  
H. Puebla de Z. a 27 de mayo de 2021



Mtro. José Serrano Ortíz  
Asesor de tema

M'JSO/BARV  
C.c.p. Interesado  
C.c.p. Archivo

## **DEDICATORIA**

Esta tesis está dedicada a mi madre Lluvia Jazmín Arellano Mont, a mi padre René Sigfrido Márquez Quintada, a mi abuela Blanca Margarita Mont Velasco y a todos los familiares que me apoyaron a lo largo de mi trayectoria educativa.

A mis amigos por darme su amistad incondicional.

A mis maestros de la BUAP y docentes externos que me brindaron su conocimiento y apoyo.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecerle a mi madre Lluvia Arellano Mont por todo el apoyo que me brindó y me sigue brindando en la vida, pero sobre todo por su cariño y paciencia, sin ti, no hubiera podido lograr esto.

A mi padre René Márquez Quintana por estar siempre pendiente de mí, por cuidarme y quererme a pesar de la distancia que ha existido entre nosotros.

A mi abuela Blanca Mont Velasco por darme el ejemplo de una persona fuerte, que sabe salir adelante a pesar de los obstáculos que existen en la vida.

A mi abuelo Óscar Arellano Aguirre porque siempre estuvo presente, alegrándome el día con sus ideas y demostrarme la tolerancia que hay que tener en ciertas situaciones.

A mis tíos Javier y Mercedes porque me brindaron su apoyo, animándome y creyendo en mí; y a Yoshua porque su llegada me brindó alegría.

Al ayuntamiento del Municipio de Xalapa por todo el apoyo y permiso para realizar esta investigación en el Parque de la Cueva de la Orquídea y los alrededores.

A Protección Civil del municipio de Xalapa por la antena de georadar que me prestaron para obtener más información.

A todos los docentes que me apoyaron a lo largo de mi trayecto educativo, desde del kínder hasta la universidad, porque los conocimientos que me transmitieron, contribuyeron a que aprendiera algo nuevo cada día.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por haberme brindado una educación de calidad, en donde no solo disfruté de mi carrera, sino también de otras actividades recreativas/ talleres que impartía como acuarela y squash; el aprendizaje de idiomas como el francés e italiano.

A los docentes que conforman la facultad de ingeniería, especialmente a los del colegio de Ingeniería Geofísica.

Al Mtro. Julio César González por sus enseñanzas, por su paciencia, por su gran apoyo, por incluirme en el proyecto.

A mi director de tesis el Mtro. José Serrano por apoyarme en la elaboración de la tesis, por su paciencia y tiempo.

Al Mtro. Manuel Uribe por su paciencia y todos los conocimientos que me transmitió a lo largo de mi carrera.

Así como también a los maestros e investigadores que forman parte de otras universidades:

A mi directora externa la Dra. Katrin Sieron por apoyarme en la corrección de mi tesis, por brindarme sus conocimientos y estar al pendiente a pesar de la distancia.

A mi asesor externo el Dr. Blake Weissling por apoyarme en el procesamiento y revisión de los datos obtenidos en esta tesis.

A Society of Exploration Geophysicists (SEG) por haberme permitido formar parte del programa “Geoscientists Without Borders” en el proyecto “Peligros Hidrometeorológicos y geológicos en el Volcan Pico de Orizaba, México” y por el apoyo financiero recibido

A mis amigos Jesús Ortigoza y Billy Montesinos, al Mtro. José Serrano por apoyarme en la obtención de los datos que se ocuparon para la realización de esta tesis.

A mis amigos Marenly Ortiz, Ilse Sánchez, Víctor Toledo, Román Gutiérrez y Diego Vivanco que estuvieron ahí para brindarme una mano y alentarme cuando lo necesitaba, por los momentos que compartimos en la universidad y enseñarme que hay tiempo para el estudio pero también para divertirse.

A Eduardo Antonio Ríos Aguirre por creer en mí, por brindarme su amistad y amor, y por alentarme a ser mejor cada día.

A mis amigos scouts porque siempre integrarme a pesar de ser una persona tímida, por permitirme conocer tantos lugares y disfrutar de su compañía, especialmente a mí amiga Dulce Pérez, porque su amistad hace que la distancia no exista.

A los amigos que a pesar de los años y distancia siempre se han encontrado ahí, Marianely García, Salvador Hernández, Alexander Ramos, Luis Aguirre, Sheccid Velasco, Luis Fernando López.

A mis amigas Anahí García y Jocelyn Cruz por la amistad que hemos estado construyendo.

A Galleta porque su compañía alegra mi vida.

Y a todas las personas que estuvieron en algún momento de mi vida brindándome su apoyo.

## Tabla de contenido

Tabla de contenido.....	1
ÍNDICE DE FIGURAS .....	5
ÍNDICE DE TABLAS .....	12
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	13
RESUMEN .....	15
ABSTRACT .....	16
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	17
1.1 Introducción .....	17
1.2 Planteamiento del problema .....	18
1.3 Justificación .....	19
1.4 Objetivos .....	19
1.4.1. Objetivo general.....	19
1.4.2. Objetivos particulares .....	20
1.5 Antecedentes .....	20
1.5.1 Historia arqueológica y estado actual del parque de la cueva de la Orquídea.....	23
CAPITULO 2. MARCO GEOLÓGICO .....	25
2.1 Macrolocalización del área de estudio .....	25
2.2 Microlocalización del área de estudio y vías de acceso .....	27
2.3 Geología.....	28
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO.....	30
3.1 La gravimetría.....	30
3.2 El geoide.....	31
3.3 Gravímetros .....	34
3.4 Aplicaciones del método gravimétrico.....	36
3.5 Correcciones gravimétricas .....	39
3.6 Filtrado de anomalías gravimétricas .....	43
3.7 Deconvolución de Werner .....	44
3.8 Espectro radial de potencia.....	45
3.9 Método de georadar .....	46
3.10 Ecuaciones de Maxwell .....	46
3.11 Constante dieléctrica .....	47

3.12 Conductividad .....	48
3.13 Permitividad eléctrica.....	50
3.14 Permeabilidad magnética .....	50
3.15 Velocidad de propagación .....	51
3.16 El georadar. ....	52
3.17 Historia del georadar.....	53
3.18 Descripción de los componentes del georadar .....	54
3.18.1 Las antenas .....	54
3.18.2 Unidad de control.....	56
3.19 Funcionamiento del georadar .....	57
3.20 Los radargramas.....	58
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....	59
4.1 Adquisición de datos gravimétricos.....	59
4.2 Procesamiento de datos gravimétricos .....	66
4.3 Adquisición de datos con georadar .....	69
4.4. Procesamiento de datos con georadar .....	75
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	76
5.1 Resultados del método gravimétrico .....	76
5.2 Resultados del método con georadar .....	82
5.2.1 Líneas con georadar dentro del Parque de la Cueva de la Orquídea ....	83
5.2.2 Líneas externas al parque de la cueva de la orquídea .....	92
5.2.3 Líneas obtenidas dentro de una de las cuevas en el parque de la Cueva de la Orquídea .....	98
5.2.4 Líneas obtenidas en el cerro del Macuiltépetl.....	100
5.3 Estimación de la profundidad de los cuerpos anómalos .....	101
5.3.1 Resultados de la deconvolución de Werner.....	101
5.3.2 Resultados del espectro radial de potencia .....	112
5.4 Mapeo de las rutas internas y externas al parque de la orquídea.....	113
5.4.1 Rutas internas y ubicación de cavidades dentro del Parque de la Orquídea. ....	120
5.4.2 Rutas externas y ubicación de cavidades fuera del Parque de la Orquídea. ....	121

5.5 Factibilidad del uso de suelo del parque de la orquídea a través del método gravimétrico y del método o con georadar para la construcción de casas habitación.....	125
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	126
6.1 Conclusiones.....	126
6.2 Recomendaciones .....	127
BIBLIOGRAFÍA .....	129
ANEXOS .....	134
ANEXO A.1 Tabla de lecturas gravimétricas obtenidas el 23 de agosto de 2019 .....	134
ANEXO A.2 Tabla de lecturas gravimétricas obtenidas el 24 de agosto de 2019 .....	136
ANEXO B Tabla de correcciones gravimétricas.....	140
ANEXO C Coordenadas y profundidad de las líneas obtenidas con georadar. ....	143
ANEXO D Radargramas .....	144
Anexo D.1 Radargrama de la línea 1 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz. ....	144
Anexo D.2 Radargrama de la línea 2 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz. ....	144
Anexo D.3 Radargrama de la línea 3 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz. ....	145
Anexo D.4 Radargrama de la línea 4 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz. ....	145
Anexo D.5 Radargrama de la línea 5 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz. ....	145
Anexo D.6 Radargrama de la línea 6 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz. ....	146
Anexo D.7 Radargrama de la línea 7 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz. ....	146
Anexo D.8 Radargrama de la línea 8 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz. ....	146
Anexo D.9 Radargrama de la línea 9 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz. ....	147
Anexo D.10 Radargrama de la línea 11 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz. ....	147

Anexo D.11 Radargrama de la línea 13 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz. ....	147
Anexo D.12 Radargrama de la línea 15 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz. ....	148
Anexo D.13 Radargrama de la línea H1 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz. ....	148
Anexo D.14 Radargrama de la línea H6 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz. ....	148
Anexo D.15 Radargrama de la línea H7 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz. ....	149
Anexo D.16 Radargrama de la línea 1 cerro obtenida con georadar con una antena de 300 MHz. ....	149
Anexo D.17 Radargrama de la línea 2 cerro obtenida con georadar con una antena de 300 MHz. ....	149
Anexo D.18 Radargrama de la línea 3 cerro obtenida con georadar con una antena de 300 MHz. ....	150
Anexo D.19 Radargrama de la línea 4 cerro obtenida con georadar con una antena de 300 MHz. ....	150
Anexo D.20 Radargrama de la línea 5 cerro obtenida con georadar con una antena de 300 MHz. ....	150

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1.1 Plano 5 Proyecto Macuiltépetl.....	24
Figura 2.1. Colindancias del municipio de Xalapa-Enríquez, Veracruz.....	26
Figura 2.2 Vías de acceso al parque de la cueva de la Orquídea.....	27
Figura 2.3 Pétalos de la Cueva de la Orquídea.....	29
Figura 2.4 Geología de la zona de estudio.....	29
Figura 2.5 Material dentro de la Cueva de la Orquídea.....	30
Figura 3.1 Distorsión de un geoide: a) efectos de la escala continental, y b) Efectos locales debido a un exceso de masa en el subsuelo.....	32
Figura 3.2 Las diferencias entre un elipsoide y una esfera debido al factor de achatamiento.....	32
Figura 3.3 Diagrama esquemático del sistema LaCoste & Romberg de longitud cero.....	36
Figura 3.4 Profundidad de investigación con georadar GPR.....	55
Figura 3.5 Esquema de una antena de 100 MHz de "GGSI" (Según Hännien et al., 1992). La espira que hace de dipolo emisor es del tipo mariposa.....	56
Figura 3.6 Funcionamiento del georadar.....	57
Figura 4.1 Gravímetro utilizado para la adquisición de datos gravimétricos.....	60
Figura 4.2 GPS y libreta de campo utilizados para obtener y registrar coordenadas.....	60
Figura 4.3 Equipo utilizado para el levantamiento gravimétrico.....	60
Figura 4.4 L1 de puntos gravimétricos.....	61

Figura 4.5 L2 de puntos gravimétricos. ....	62
Figura 4.6 L3 y L4 de puntos gravimétricos.....	62
Figura 4.7 L5 de puntos gravimétricos.....	62
Figura 4.8 L-Aleatorias.....	63
Figura 4.9 L6 Y L7 de puntos gravimétricos.....	63
Figura 4.10 L8 de puntos gravimétricos.....	64
Figura 4.11 Puntos sobre cima de la cueva.....	64
Figura 4.12 P107 afuera del parque de la Orquídea.....	65
Figura 4.13 Gravedad absoluta en el municipio de Altotonga, Veracruz.....	67
Figura 4.14 Mapa de anomalía de Bouguer.....	68
Figura 4.15 Base de datos hecha con el software Oasis Montaj.....	69
Figura 4.16 Equipo necesario para el levantamiento con georadar.....	69
Figura 4.17 Adquisición de datos con georadar.....	69
Figura 4.18 Perfiles 1-9 y H1-H7 con georadar.....	70
Figura 4.19 Perfiles con georadar en las partes altas del parque de la Orquídea..	71
Figura 4.20 Líneas 17-22 con georadar.....	72
Figura 4.21 Adquisición de datos con el georadar en el exterior del parque de la cueva de la Orquídea.....	72
Figura 4.22 Adquisición de datos con el georadar en el interior de la cueva de la Orquídea.....	73
Figura 4.23 Perfiles adquiridos con el georadar en el interior de la cueva de la Orquídea.....	73
Figura 4.24 Lecturas con georadar en volcán Macuiltépetl.....	74

Figura 4.25 Visualización de datos obtenidos con el georadar.....	74
Figura 4.26 Radargrama de la línea 2 antes de aplicarle background removal y moveout correction con el software Prism2d.....	75
Figura 4.27 Radargrama de la línea 2 filtrado.....	75
Figura 5.1 Mapa de la anomalía de Bouguer del Parque de la Cueva de la Orquídea con ArcMap.....	76
Figura 5.2 Cueva a la que se obtuvo acceso en el Parque de la cueva de la Orquídea.....	77
Figura 5.3 Modelo de la anomalía elaborado en GravMag.....	78
Figura 5.4 Mapa de anomalía de Bouguer del Parque de la Cueva de la Orquídea.....	79
Figura 5.5 Mapa de la primera derivada vertical del Parque de la Cueva de la Orquídea.....	80
Figura 5.6 Imagen obtenida con dron del Parque de la Cueva de la Orquídea...	81
Figura 5.7 Mapa de la segunda derivada vertical del Parque de la Cueva de la Orquídea.....	82
Figura 5.8 Línea 2 obtenida con georadar.....	83
Figura 5.9 Radargrama de la línea 2 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.....	84
Figura 5.10 Línea 10 obtenida con georadar.....	84
Figura 5.11 Radargrama de la línea 10 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.....	85
Figura 5.12 Línea 12 obtenida con georadar.....	85

Figura 5.13 Radargrama de la línea 12 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.....	86
Figura 5.14 Línea 14 obtenida con georadar.....	86
Figura 5.15 Radargrama de la línea 14 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.....	87
Figura 5.16 Línea 16 obtenida con georadar.....	87
Figura 5.17 Radargrama de la línea 16 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.....	88
Figura 5.18 Línea H2 obtenida con georadar.....	88
Figura 5.19 Radargrama de la línea H2 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.....	89
Figura 5.20 Línea H3 obtenida con georadar.....	89
Figura 5.21 Radargrama de la línea H3 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.....	90
Figura 5.22 Línea H4 obtenida con georadar.....	90
Figura 5.23 Radargrama de la línea H4 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.....	91
Figura 5.24 Línea H5 obtenida con georadar.....	91
Figura 5.25 Radargrama de la línea H5 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.....	92
Figura 5.26 Línea 17 obtenida con georadar.....	92
Figura 5.27 Radargrama de la línea 17 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.....	93
Figura 5.28 Línea 18 obtenida con georadar.....	93

Figura 5.29 Radargrama de la línea 18 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.....	94
Figura 5.30 Línea 19 obtenida con georadar.....	94
Figura 5.31 Radargrama de la línea 19 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.....	95
Figura 5.32 Línea 20 obtenida con georadar.....	95
Figura 5.33 Radargrama de la línea 20 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.....	96
Figura 5.34 Línea 21 obtenida con georadar.....	96
Figura 5.35 Radargrama de la línea 21 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.....	97
Figura 5.36 Línea 22 obtenida con georadar.....	97
Figura 5.37 Radargrama de la línea 22 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.....	98
Figura 5.38 Radargrama de la línea cueva 1 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.....	99
Figura 5.39 Radargrama de la línea cueva 2 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.....	99
Figura 5.40 Radargrama de la línea cueva 3 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.....	100
Figura 5.41 Radargrama de la línea cueva 4 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.....	100
Figura 5.42 Parámetros iniciales para la realización del cálculo de la deconvolución de Werner.....	102
Figura 5.43 Datos obtenidos con la deconvolución de Werner.....	103

Figura 5.44 Modelo obtenido a través de la deconvolución de Werner.....	103
Figura 5.45 Profundidad de la primera anomalía relacionada con la línea 2 obtenida con georadar.....	105
Figura 5.46 Profundidad de anomalía relacionada con la línea H4 obtenida con georadar.....	106
Figura 5.47 Profundidad de la primera anomalía relacionada con la línea 10 obtenida con georadar.....	107
Figura 5.48 Profundidad de la segunda anomalía relacionada con la línea 10 obtenida con georadar.....	108
Figura 5.49 Profundidad de primera anomalía no correlacionada.....	109
Figura 5.50 Profundidad de segunda anomalía no correlacionada.....	109
Figura 5.51 Mapa de profundidades obtenidas con la deconvolución de Werner.....	110
Figura 5.52 Espectro de potencia obtenido.....	112
Figura 5.53 Espectro de potencia en donde se observan las tres pendientes utilizadas y sus profundidades correspondientes.....	113
Figura 5.54 Correlación de línea 2 obtenida con georadar y mapa gravimétrico de la primera derivada vertical.....	114
Figura 5.55 Correlación de línea 10 obtenida con georadar y mapa gravimétrico de la primera derivada vertical.....	116
Figura 5.56 Correlación de línea H4 obtenida con georadar y mapa gravimétrico de la primera derivada vertical.....	117
Figura 5.57 Correlación de línea 16 obtenida con georadar y mapa gravimétrico de la primera derivada vertical.....	119

Figura 5.58 Rutas internas de oquedades en el Parque de la Cueva de la Orquídea.....	120
Figura 5.59 Localización de oquedades en la línea 17 obtenida con georadar...	121
Figura 5.60 Localización de oquedades en la línea 18 obtenida con georadar...	122
Figura 5.61 Localización de oquedades en la línea 19 obtenida con georadar...	123
Figura 5.62 Localización de oquedades en la línea 20 obtenida con georadar...	123
Figura 5.63 Localización de oquedades en la línea 21 obtenida con georadar...	124
Figura 5.64 Localización de oquedades en la línea 22 obtenida con georadar...	125

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 3.1 Aplicaciones de los estudios gravimétricos.....	38
Tabla 3.2 Parámetros electromagnéticos para diferentes tipos de materiales. (Pérez, 2001).....	49
Tabla 3.3 Valores estimativos de constante dieléctrica y atenuación para diferentes materiales y litologías a 100 MHz (Daniel, 1996).....	51
Tabla 3.4 Aplicaciones del método de Georadar.....	58
Tabla 4.1 Equipo necesario para el levantamiento gravimétrico.....	59
Tabla 4.2 Lecturas gravimétricas en el parque de la zona de la orquídea.....	65
Tabla 4.3 correcciones que se le realizaron a los datos para obtener la anomalía de Bouguer.....	67
Tabla 4.4 Equipo necesario para el levantamiento con georadar.....	70
Tabla 5.1 Calculo del campo magnético en el parque de la Orquídea durante los días 23 y 24 de agosto del 2019.....	101
Tabla 5.2 Identificación de oquedades relacionando gravimetría y georadar.....	110

## ÍNDICE DE ECUACIONES

	<b>Pág.</b>
Ecuación 3.1 Ley de Gravitación Universal.....	30
Ecuación 3.2 Aceleración gravitacional.....	31
Ecuación 3.3 Factor de achatamiento.....	32
Ecuación 3.4 Aceleración de la gravedad para modelo elipsoidal de la Tierra.....	33
Ecuación 3.5 Fórmula internacional de la Gravedad.....	33
Ecuación 3.6 Fórmula internacional de la Gravedad actualizada.....	33
Ecuación 3.7 Equilibrio estático del péndulo de un gravímetro.....	34
Ecuación 3.8 Formula para la aceleración de la gravedad en un péndulo.....	34
Ecuación 3.9 Fórmula de deriva.....	40
Ecuación 3.10 Corrección por deriva.....	40
Ecuación 3.11 Gravedad observada.....	40
Ecuación 3.12 Gravedad teórica elipsoide.....	41
Ecuación 3.13 Efecto atmosférico.....	41
Ecuación 3.14 Corrección de aire libre.....	41
Ecuación 3.15 Corrección de Bouguer.....	42
Ecuación 3.16 Anomalía simple de Bouguer.....	42
Ecuación 3.17 Anomalía completa de Bouguer.....	42
Ecuación 3.18 Anomalía de Aire libre.....	43
Ecuación 3.19 Capa dipolar inclinada.....	44

Ecuación 3.20 Calculo de profundidad o tope de un cuerpo geológico utilizando el espectro radial de potencia.....	45
Ecuación 3.21 Ley de Gauss para el campo eléctrico.....	46
Ecuación 3.22 Ley de Gauss para el campo magnético.....	46
Ecuación 3.23 Ley de Faraday.....	47
Ecuación 3.24 Ley de Ampere-Maxwell.....	47
Ecuación 3.25 Constante dieléctrica.....	48
Ecuación 3.26 Velocidad de fase de la onda electromagnética.....	48
Ecuación 3.27 Velocidad de fase de la onda electromagnética simplificada.....	49
Ecuación 3.28 Vector de desplazamiento eléctrico.....	50
Ecuación 3.29 Permitividad absoluta.....	50

## RESUMEN

El parque de la Cueva de la Orquídea está ubicado en el municipio de Xalapa en el estado de Veracruz; el área de esta zona incluye la entrada superficial a la cueva, una bóveda primaria y otra secundaria. La estructura de la cueva corresponde a un túnel de lava cuya formación está relacionada con la actividad pasada del volcán Macuiltépetl. Posteriormente, los alrededores de la cueva se fueron poblando, se construyeron viviendas y con el tiempo esta zona se convirtió en un importante lugar turístico del municipio de Xalapa antes de cerrarse el acceso al público en general, debido al potencial peligro de colapso ocasionado por el sismo del 19 de septiembre del 2017.

El presente trabajo tiene como objetivo principal la detección de cavidades en la zona del parque de la Cueva de la Orquídea en Xalapa, Veracruz, a través de la aplicación de métodos geofísicos, en este caso, la gravimetría y el georadar, para poder tener una mejor perspectiva acerca del estado en el que se encuentra la cueva. Se propone detectar oquedades en zonas en las que no se tiene conocimiento de la presencia de estas formaciones geológicas.

A través de los métodos mencionados se obtuvieron datos que se analizaron e interpretaron para detectar las oquedades dentro y fuera del parque de la cueva de la Orquídea. Otros resultados que se obtuvieron fueron las posibles profundidades de las diferentes oquedades detectadas y finalmente, un punto de vista respecto a la factibilidad de construcción de infraestructura turística o de casas-habitación.

## ABSTRACT

The Cueva de la Orquídea park is located in the municipality of Xalapa in the state of Veracruz; the area of this zone includes the superficial entrance to the cave, a primary vault and a secondary vault. The structure of the cave corresponds to a lava tunnel whose formation is related to the past activity of the Macuiltépetl volcano. Subsequently, the surroundings of the cave were populated, houses were built and over time this area became an important tourist place in the municipality of Xalapa before access to the general public was closed, due to the potential danger of collapse caused by the earthquake of September 19, 2017.

The main objective of this work is to detect cavities in the Cueva de la Orquídea park area in Xalapa, Veracruz, through the application of geophysical methods, in this case, gravimetry and georadar, in order to have a better vision about the state in which the cave is. It is proposed to detect cavities in areas where there is no knowledge of the presence of these geological formations.

Through the aforementioned methods, data were obtained that were analyzed and interpreted to detect the cavities inside and outside the Orchid cave park. Other results that were obtained were the possible depths of the different cavities detected and finally, a point of view regarding the feasibility of construction of tourist infrastructure or houses-rooms.

## CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción

El Parque de la Cueva de la Orquídea es un área turística ubicada en la ciudad de Xalapa, Veracruz; en tiempos antiguos, la Cueva de la Orquídea fue utilizada para la celebración de ceremonias ya que se encontraron vestigios arqueológicos en el lugar, sin embargo, después de su descubrimiento fue utilizada como relleno sanitario hasta que finalmente este sitio se rescató y fue reconocido como una zona de importancia cultural y turística, lamentablemente después del sismo del 19 de Septiembre del 2017 fue cerrado su acceso al público ya que no se tenía conocimiento de si existía peligro de que colapsara. Lo anterior es una de las razones por las cuales se decidió realizar un estudio geofísico en esa zona para tener un mejor conocimiento de ella, otra razón es que la Ciudad de Xalapa según los censos de población ha ido creciendo con el paso de los años y se han realizado más construcciones alrededor de este Parque, y un punto importante que hay que tener en cuenta es la continuación de la Cueva de la Orquídea o de la existencia de oquedades independientes a ella, ya que si se sobrecarga el área sobre zonas con oquedades en el subsuelo, el techo de la cueva podría colapsar. Los métodos geofísicos que se ocuparon para esta investigación fueron la prospección gravimétrica y el método de georadar. En muchos casos es más eficiente combinar dos métodos para obtener un resultado más fiable. En este caso, la prospección gravimétrica es una técnica geofísica basada en la medición de la aceleración de la gravedad en distintos puntos de la Tierra para comparar las diferentes densidades de los materiales que se encuentran en el subsuelo y de esta manera identificarlos. Esta técnica se ha utilizado junto con otras, para determinar geometrías de diversos cuerpos, límites de cordilleras, detección de cavidades, entre otros. Es un método pasivo, lo cual quiere decir que no es destructivo y, por lo tanto, no alterará la zona de estudio. El segundo método que se utilizó para complementar el trabajo de investigación es el georadar, el cual está basado en la emisión de ondas electromagnéticas de alta frecuencia que se propagan a través del subsuelo y se ven reflejadas en la superficie.

Los límites o interfaces de los diversos tipos materiales presentes en el subsuelo generan diferencias en las propiedades electromagnéticas de cada uno de ellos (Permitividad dieléctrica y conductividad), lo que a su vez permite que el receptor capte respuestas de diferente intensidad, con base en las cuales se puede identificar, desde la presencia de rocas de diferente densidad hasta cuerpos de agua o espacios vacíos (Roa, 2015).

Al igual que la prospección gravimétrica, el georadar es un método no destructivo y no invasivo, además provee información de alta resolución en tiempo real (Basile et al., 2000). Debido a esto, se utilizaron estos dos métodos para la exploración de la zona de la Orquídea.

La estructura de esta tesis se ve reflejada en seis capítulos; el primer capítulo corresponde al planteamiento del problema, introducción, los objetivos de la investigación y justificación. El segundo capítulo se refiere a la zona de estudio, su ubicación, geología e historia de la cueva de la Orquídea. En el tercer capítulo se pueden encontrar todos los fundamentos teóricos para realizar esta investigación. En el capítulo cuatro se expone la metodología, desde la adquisición de datos gravimétricos y con georadar hasta el procesamiento de los mismos. En el capítulo cinco se exponen los resultados. Para finalizar en el capítulo seis se encuentran las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

## 1.2 Planteamiento del problema

La cueva de la orquídea es una zona que no se ha investigado demasiado, sin embargo, es de mucho interés. Debido al sismo del 19 de septiembre del 2017, el acceso a la Cueva de la orquídea fue cerrado al público ya que se desconocía si existía un riesgo de posible colapso de su techo. Otro punto importante de esta investigación es que la población de la ciudad de Xalapa ha crecido según el censo de población y por lo tanto la construcción de viviendas también, y puede ser muy riesgoso que las personas habiten en la zona donde se encuentra el parque de la Cueva de la Orquídea en caso de que las casas se hayan construido sobre ramificaciones de la cueva u oquedades independientes.

### 1.3 Justificación

El estudio de la cueva de la Orquídea es importante porque es una zona que con el paso de los años se ha convertido en un área turística. Las cuevas que se formaron debido al emplazamiento de flujos de lava relacionados con el volcán Macuiltépetl se encuentran ahora en una zona urbana. Sin embargo, existen pocos estudios relacionados con la cueva o el área en general, a pesar de que es de mucho interés. Para su investigación se ha elegido el método gravimétrico porque es un método no invasivo siendo adecuado para el estudio de la zona, ya que según Montes (2019) esta área quedó dañada después de los sismos del 19 de septiembre de 2017, y es importante utilizar métodos que no alteren la zona en la cual se encuentra la cueva. El método gravimétrico detecta las zonas con ausencia o exceso de masa; en este caso, las zonas de interés son cavidades, por lo que se esperan buenos resultados aplicando este método. Por otra parte, se eligió el método de georadar porque no es destructivo, y se utiliza para detectar objetos y estructuras en el subsuelo.. Además, al no contar con el acceso directo a la cueva en zonas externas al área cerrada de la cueva, el método permite tener un análisis del subsuelo a detalle. La utilidad de esta investigación deriva en que dará información previa para investigaciones futuras acerca de las oquedades que se encuentran en esta zona. Otra utilidad puede ser que, con los resultados que se obtendrán, en conjunto con las normas de construcción de viviendas será más fácil determinar la factibilidad de la continuidad de construcción en esa área, al contar con mayor cantidad de datos, se podrá ofrecer información que permita una mejor planeación del desarrollo urbano de Xalapa, Veracruz y a su vez proteger el patrimonio natural de la población local y turística.

### 1.4 Objetivos

#### 1.4.1. Objetivo general

Realizar estudios geofísicos, mediante del método gravimétrico y georadar, para localizar oquedades en el subsuelo de la zona del parque de la cueva de la Orquídea y en sus alrededores, en apoyo al ayuntamiento de Xalapa, Veracruz para toma de medidas de protección civil adecuadas.

#### 1.4.2. Objetivos particulares

- Obtener, a través del método gravimétrico, mapas de anomalías de gravedad para poder identificar oquedades en el subsuelo del área interna y externa del parque de la Cueva de la Orquídea.
- Obtener profundidades aproximadas de oquedades en el subsuelo a través de técnicas como el espectro radial de potencia y la deconvolución de Werner para correlacionarlas con los mapas gravimétricos y los radargramas.
- Adquirir datos electromagnéticos, visualizar y aplicar filtros a los radargramas mediante el software Prism2d para identificar oquedades o posible formación de ellas en el subsuelo del área interna y externa del parque de la Cueva de la Orquídea.
- Mediante estos resultados, Mostrar información que permita al ayuntamiento municipal de Xalapa, Veracruz, determinar la viabilidad de la construcción de casas habitación en la zona cercana a la cueva de la Orquídea.

#### 1.5 Antecedentes

En el momento de elegir prospecciones geofísicas para estudiar una zona es muy importante tener algunas consideraciones, sobre todo si es urbana, ya que varios métodos pueden verse afectados debido a las interferencias que existen en el área, como las producidas por tuberías, vehículos, etc.

Como ya se mencionó anteriormente, los métodos utilizados para estudiar la zona de la cueva de la Orquídea son la prospección gravimétrica y georadar, es por eso que, a continuación, se describen algunos trabajos en los que fueron utilizados estos métodos en cuanto a detección de cavidades o relacionados a ello.

Dentro de la geofísica, la gravimetría se adscribe a los denominados métodos pasivos o de campo natural, a diferencia de los métodos activos o de campo artificial, donde es el propio equipo de medición el que crea el campo, detectándose y midiéndose la distorsión o anomalía que crea la estructura a estudiar sobre éste (Richarte et al., 2007).

La técnica geofísica de gravimetría ha sido utilizada en muchas investigaciones; entre ellos se puede el de Lázaro Salinas (2001), cuyo trabajo fue enfocado al estudio del subsuelo en la ciudad de Barcelona, a través de la prospección gravimétrica, en el cual el objetivo fue obtener un modelo para el basamento de la ciudad. Los autores mencionan que la prospección gravimétrica cumple un papel importante en cuanto a la detección de cavidades, ya que recientemente, se ha empezado a aplicar en zonas urbanas con el fin de localizar cavidades susceptibles a colapsos. También se puede mencionar el trabajo de Camacho et al. (1996) quien aplicó la prospección gravimétrica para detectar la posible existencia de cavidades naturales rellenas de agua o de sedimentos, que pudieran estar ocasionando hundimientos en la zona de Alcalá de Ebro, cerca del río Ebro. También se tiene el estudio de Colley (1963) el cual fue enfocado en el estudio de las cavidades mediante gravimetría, y en el cual se menciona que las cuevas pueden detectarse si en los resultados obtenidos con el gravímetro existen mínimos de gravedad y “si tienen un volumen suficiente en relación con la profundidad”. El autor elabora curvas que muestran las dimensiones que deben de tener las cuevas para que puedan ser detectadas y en su trabajo concluyó que hoy en día la detección de cuevas es muy importante en los ámbitos tanto científicos como culturales, y el uso de la gravimetría para este propósito ha sido muy poco pero que en el futuro podría convertirse en una herramienta muy importante. Otro ejemplo del uso de la gravimetría para la detección de cavidades es el trabajo de Chamon & Dobereiner (1988) quienes estudiaron la presencia de cavernas en el borde de la cuenca del Amazonas, debido a que estas pudieran ocasionar problemas en la zona; los autores utilizaron varios métodos geofísicos, entre los cuales se pueden nombrar a la prospección gravimétrica, magnetométrica, electrorresistividad, etc. y concluyeron que el método gravimétrico fue el más exitoso para la detección directa de la caverna. Fajklewicz (1976) utilizó medidas del gradiente de gravedad vertical para la detección de túneles y cavernas rocosas y concluye en su trabajo que es tan ventajoso este método que ningún otro método podría reemplazarlo para estudios de esta índole.

El Georadar se puede utilizar para complementar los estudios gravimétricos. El georadar ha tenido un gran uso exploratorio, y hay estudios donde demuestran que la combinación de diferentes métodos geofísicos resulta la obtención de mejores resultados. Se tiene como ejemplo el estudio que realizaron Rousset et al. (AÑO), quienes utilizaron métodos como el eléctrico, sísmico y georadar para localizar cavidades cársticas en Francia. Otro ejemplo, en donde se combinó el uso de la gravimetría y el georadar fue en el trabajo de Leucci y De Giori (2010), quienes utilizaron estos métodos para mapear la red de cavidades cársticas poco profundas en la costa de Italia, en Marina Di Capilungo, la cual se ha visto afectada por hundimientos en algunas zonas, haciendo que edificios y carreteras colapsen. Los autores afirman que ambos métodos se complementan ya que con el georadar se determina la profundidad de las cavidades y la gravimetría puede definir con precisión las cavidades poco profundas en un área donde las mediciones con georadar son difíciles. Leucci y De Giori (2010) ofrecen la conclusión que en su trabajo el georadar es una excelente herramienta para detectar las cavidades y que la gravimetría puede ser el método de mapeo más adecuado, aunque más lento que el georadar.

En cuanto al uso individual del georadar para la detección de cavidades, se pueden mencionar trabajos como el de Syaifuddin y Hendro (2014) en una zona de Indonesia, donde era necesario detectar cavidades en la formación rocosa, ya que al construir sobre ellas se pueden originar peligros, y ubicándolas se pueden tomar medidas, y antes de comenzar a edificar darle un tratamiento especial a la zona. Los autores concluyen que el georadar dio resultados positivos, ya que se pudo mapear con éxito la existencia de cavidades en la zona. Otro trabajo es el de Gizzi et al. (2009) quienes realizaron investigaciones con georadar para detectar oquedades en una zona de Italia afectada anteriormente por un terremoto. Gracias al método electromagnético pudieron detectar varias cavidades que fueron construidas por el hombre, las cuales eran utilizadas como bodegas y algunas están abandonadas, concluyendo que las oquedades en el subsuelo tienen un papel muy importante en el incremento del daño sísmico que afecta a los edificios construidos sobre ellas.

Por último, se puede mencionar el trabajo de Lorenzo y Cuéllar (1995), quienes utilizaron la prospección geofísica como herramienta de apoyo para la ingeniería civil y; en este caso, el método utilizado fue el georadar, el cual se empleó en el estudio enfocado a las cavidades y demuestra su utilidad en el caso de su detección bajo superficies rígidas. Utilizaron antenas de alta frecuencia para alcanzar profundidades pequeñas debido a que a ellos les interesaba analizar las cavidades superficiales, teniendo resultados muy favorables en la identificación de ellas.

#### 1.5.1 Historia arqueológica y estado actual del parque de la cueva de la Orquídea

Respecto a la cueva de la Orquídea, esta ha sido poco explorada desde su descubrimiento en 1943 según un blog en internet (Micloth, 2016) hasta la fecha, por lo que se puede decir que se tiene poca información sobre ella, razón que motiva su estudio con las técnicas señaladas para lograr que las detecciones permitan a la sociedad de Xalapa, Veracruz impulsar acciones vinculadas al cuidado de la zona de estudio y anticiparse a situaciones que pongan en peligro a la población, como un posible colapso.

La Cueva de la Orquídea es un atractivo de turismo científico por las investigaciones que en materia de biología y espeleología se han realizado. Se trata de un jardín dentro del cual se encuentra una gruta producto de la formación volcánica del Cerro de Macuiltépetl, con origen en el Pleistoceno superior y de edad cercana a los 30 mil años antes de Cristo y del Holoceno; la lava volcánica del Macuiltépetl dio forma semejante a los pétalos de una orquídea en esta gruta, de ahí que se derive su nombre (SECTUR, 2014).

Fue el investigador José Luis Yáñez García, uno de los primeros en explorar la Cueva de la Orquídea en 1970, y posteriormente la dieron a conocer en 1983 (Yáñez, 2012). De acuerdo a las fechas certificadas por los laboratorios del INAH, en la parte exterior de la Cueva se registran los primeros asentamientos humanos de la ciudad de Xalapa, dando testimonio de la existencia de varios edificios de origen prehispánico, que indican que la zona se desarrolló entre los años 450 a.C. y 150 d.C., por lo que se considera que esta cavidad natural fue utilizada con fines

religiosos y de observación astronómica. En su interior fue hallada una tumba datada aproximadamente del año 1500 a.C. y de acuerdo a los descubrimientos, correspondía a un personaje muy relevante en su época, puesto que su cuerpo se encontraba rodeado de ofrendas como vasijas de barro, flautas, hachas de piedra y un yugo decorado ostentosamente, entre otros objetos (Turismo-Veracruz, 2020). Actualmente, los objetos encontrados son exhibidos en el Museo Arqueológico de Xalapa.

Dentro del Proyecto Macuiltépetl, de la Facultad de Antropología de la Universidad Veracruzana (2017-2018), la Cueva de la Orquídea fue considerada como área de culto religioso. Se ubica en las estribaciones del Cerro Macuiltépetl, desde donde sus habitantes podían tener el dominio del panorama cuando hacían las ceremonias, cultos religiosos o estar en el “lugar de los muertos” (De Luna, 2018).

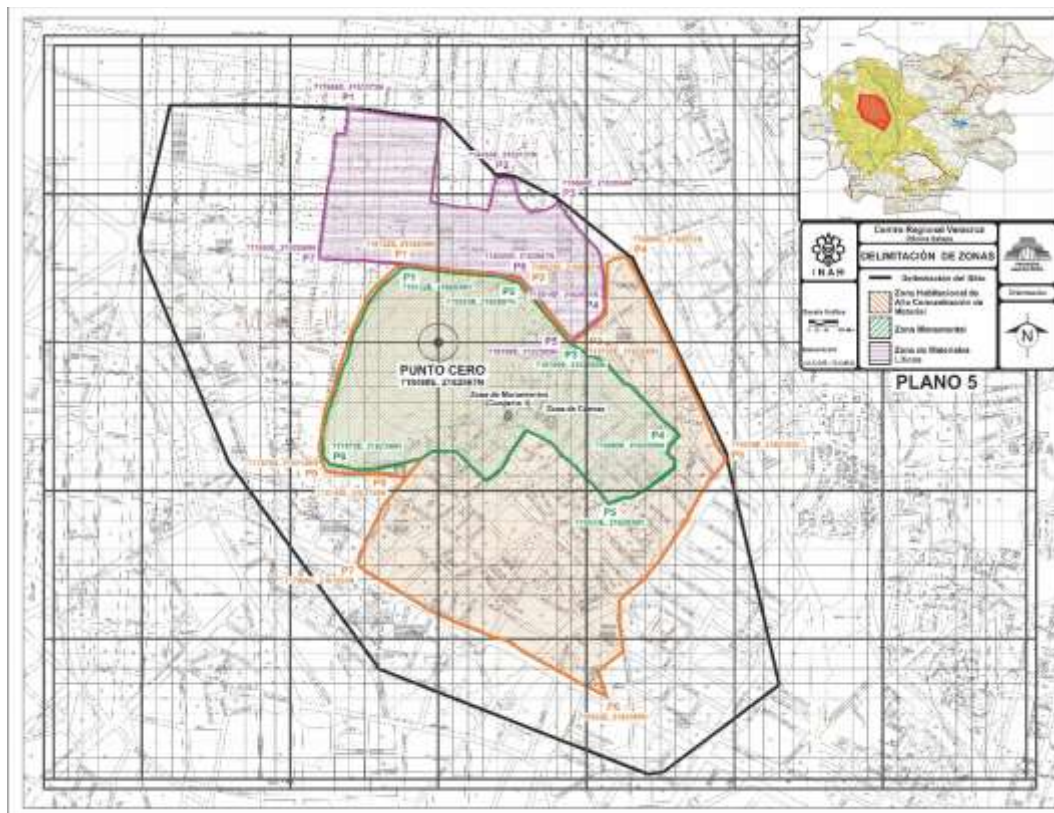


Figura 1.1 Plano 5 Proyecto Macuiltépetl. (De Luna, 2018)

Lamentablemente, con el paso de los años esta zona ha sido muy descuidada por la población que habitó y actualmente habita en los alrededores, puesto que hasta

1996 la cueva era utilizada como vertedero de desechos. Después de eso, una organización de espeleólogos implementó el rescate de la cueva, considerando que además de tener una importancia cultural e histórica, tiene una importancia botánica puesto que en el parque se encuentra gran variedad de plantas, entre ellas, medicinales, alimenticias y ornamentales (La cueva de la Orquídea, 2014). En diciembre de 1996 fue declarada como reserva arqueológica por el alcalde Carlos Rodríguez Velasco (Crónica del Poder, 2020) y a partir de ese acontecimiento, el parque ha sido un lugar turístico donde las personas pueden ir a caminar, o visitar la cueva con las medidas de seguridad correspondientes.

Actualmente, el acceso a la cueva sigue cerrado, pero las actividades en el parque como correr y caminar, entre otras continúan vigentes.

## CAPITULO 2. MARCO GEOLÓGICO

### 2.1 Macrolocalización del área de estudio

Xalapa-Enríquez, Veracruz es el municipio capital del estado, y comúnmente se le conoce como Jalapa (Xalapa). Ubicado en la Región de Las Grandes Montañas, se encuentra en la provincia del Eje Neovolcánico y la subprovincia Chiconquiaco, con 36% de sierra y 64% de lomeríos en el sistema de topofomas, entre los 19°31'37" de latitud norte, y los 96°55'21" de longitud oeste, a una altitud de 1,392 msnm (INEGI, 2017) en las faldas del Cerro Macuiltépetl. Las elevaciones principales del municipio Xalapa son el Cerro Estopa, el Cerro Macuiltépetl, el Cerro Colorado y el Cerro Gordo. Se puede hacer énfasis en que, dentro de la Región de las Grandes Montañas, que es donde se ubica Xalapa, se encuentran las dos elevaciones más altas del estado de Veracruz: el Pico de Orizaba o Citlaltépetl (5,747 metros), que es la montaña más elevada del país; y el Cofre de Perote o Nahucampatépetl (4,282 metros), que ocupa el 7º lugar entre las montañas más altas de México (CONEVYT, s.f.).

Xalapa representa el 0.21% de la superficie del estado y colinda al norte con los municipios de Banderilla, Jilotepec y Naolinco; al este con los municipios de Naolinco y Emiliano Zapata; al sur con los municipios de Emiliano Zapata y

Coatepec; al oeste con los municipios de Coatepec, Tlalnahuayocan y Banderilla (SEFIPLAN, 2016) como se aprecia en la figura 2.1.

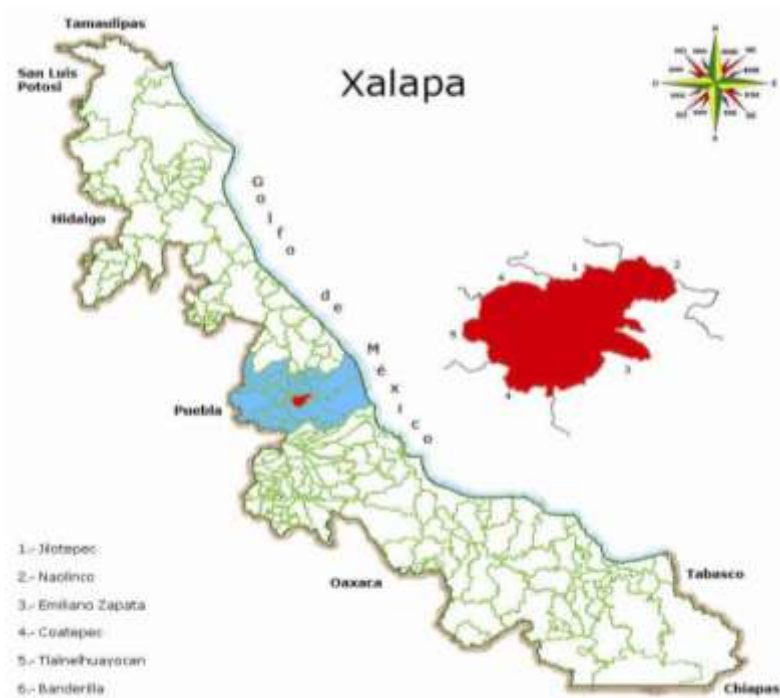


Figura 2.1 Colindancias del municipio de Xalapa-Enríquez, Veracruz (SEFIPLAN, 2016).

Su clima predominante es semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano, y su temperatura anual promedio es de 21°C, con una precipitación pluvial de aproximadamente 1,600 mm anuales. El grupo dominante de suelo es andosol y phaeozem (INEGI, 2017). Su vegetación está generalmente constituida por pastizal en un 17.9% (SEFIPLAN, 2016).

La población total del municipio en 2015 fue de 480,841 personas de acuerdo a la Encuesta Intercensal del INEGI, contando con un 52.9% de mujeres y 47.1% de hombres (INEGI, 2017).

El municipio de Xalapa es visitado anualmente por turistas nacionales y extranjeros. Según el INEGI (2017), entre 2015 y 2016 se recibieron un total de 924,859 visitantes, de los cuales el 98% es residente del país y el 2% restante es extranjero. Entre los principales atractivos turísticos que son visitados en Xalapa se encuentran, contando con registros estadísticos de INEGI, el Jardín de Las

Esculturas, que en 2016 recibió 63,250 visitantes, y el Museo de Antropología de la Universidad Veracruzana, que en el mismo año recibió 76,137 visitantes. La cueva de la Orquídea es otra atracción turística que también es muy popular en la zona de Xalapa.

## 2.2 Microlocalización del área de estudio y vías de acceso

La Cueva de la Orquídea se localiza en la zona urbana central y en la parte más alta de la ciudad de Xalapa, Veracruz. Existen tres vías de acceso a la Cueva, ubicada en la colonia Federal, de las cuales las dos primeras son las más utilizadas: la entrada principal, que está sobre la avenida Miguel Alemán sin número, frente a la subcomisión de Comisión Federal de Electricidad de la localidad,; la segunda entrada se encuentra sobre la calle Adolfo Ruíz Cortínez; finalmente, la tercera entrada y menos utilizada para acceder, puesto que la mayor parte del tiempo se encuentra cerrada al público, está sobre una calle de terracería sin nombre (Fig. 2.2).



Figura 2.2 Vías de acceso al parque de la cueva de la Orquídea. Fuente: Google Earth.

### 2.3 Geología

La cueva de la orquídea es una formación que se deriva de los derrames de lava emitidos por el volcán Macuiltépetl, el cual se localiza en la parte central de la ciudad de Xalapa. Como lo mencionan Bernal y Uruchurtu (2011), a cualquier cavidad de la corteza terrestre en donde no penetra la luz se le da el nombre de cueva, aunque también se conocen como cavernas o grutas.

La formación de algunas cuevas se produce en los flancos de los volcanes, cuando estos hacen erupción y fluye la lava, se forman las coladas. En algunas, principalmente las de composiciones más básicas (basaltos) la superficie del flujo ya se ha enfriado (por estar en contacto con la atmósfera) y por consecuencia, solidificado la lava; lo mismo puede pasar en el contacto inferior con la superficie terrestre. Sin embargo, en el interior sigue fluyendo la lava aún líquida, dando lugar a un sistema de túneles con varias rutas. Entonces, cuando el volcán termina de hacer erupción, la lava sigue fluyendo hasta que cesa, y de este modo da lugar a estas tuberías volcánicas.

Un aspecto importante para que esto suceda es que la lava sea poco viscosa y fluya sin interrupción (Detay y Hróarsson, 2011).

De este modo, el volcán Macuiltépetl, el cual tiene tres cráteres en su cima con dirección Noreste – Suroeste, dio lugar a la formación de la cueva. Durante el flujo de la lava, debido a procesos de desgasificación, se formó una burbuja que explotó (rompiendo la delgada capa ya solidificada en la superficie del flujo) y al solidificarse dejó un “hueco” el cual tiene forma de pétalos; por lo último, la zona fue bautizada como “Cueva de la Orquídea”, en la Figura 2.3 se pueden esta formación que le dio nombre a la zona.



Figura 2.3 Pétalos de la Cueva de la Orquídea. Foto tomada por: Márquez P., Sep. 2019.

De acuerdo con la carta geológica – minera E14-B27 correspondiente a Xalapa en el estado de Veracruz, la geología de la zona del parque de la orquídea está formada por basaltos del Cuaternario, la composición de los derrames de este volcán es de material andesítico y basáltico y se distribuyen de forma radial (fig. 2.4).

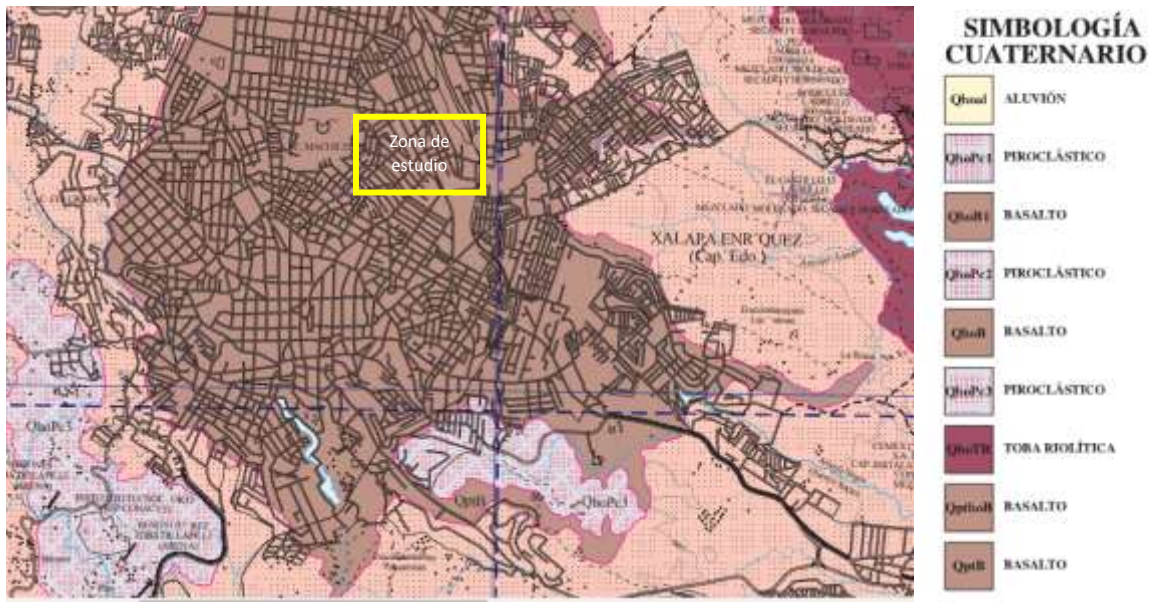


Figura 2.4 Geología de la zona de estudio (Servicio Geológico Mexicano, 2007)

Es importante mencionar que, según el sitio web del Parque Ecológico Macuiltépetl en sitios más lejanos el depósito de lava cambia a bloques; y hacia las partes bajas, estos derrames de lava son cubiertos por depósitos de lahar bien consolidados de espesores que van de 1 a 3 metros (La cueva de la orquídea, 2014). En la Figura 2.5 se puede observar la fotografía del material que se encuentra dentro del Parque de la Cueva de la Orquídea.



Figura 2.5 Material dentro de la Cueva de la Orquídea. Foto tomada por: Sieron K., Marzo. 2021.

## CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO.

### 3.1 La gravimetría

Todo estudio gravitacional está basado en la ley de Newton de la gravitación universal que establece que la fuerza de atracción ( $F$ ) entre las masas de dos puntos ( $m_1$  y  $m_2$ ) separados por una distancia ( $r$ ) viene dada por la ecuación 3.1:

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2} \quad (3.1)$$

Siendo  $G$  una constante de gravitación igual a  $6.67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ Kg}^{-2}$  (Smith, 1975).

La atracción que la Tierra (masa  $M$ ) ejerce sobre una masa exterior es un caso especial de la Ley de Newton. En esta situación, si no hay otra fuerza que se esté ejerciendo, la masa externa caerá verticalmente hacia abajo con una aceleración (representada por  $g$ ) que es aproximadamente igual a  $9.8 \text{ ms}^{-2}$  (Smith, 1975).

Sin embargo, la aceleración debida a la gravedad no es exactamente la misma en todos los puntos de la superficie de la Tierra; hay pequeñas variaciones debidas a la forma de la Tierra y a heterogeneidades de densidad en la Tierra. El interés geofísico por la gravedad se centra particularmente en la medida e interpretación de estas pequeñas variaciones de  $\vec{g}$  en términos de la estructura y forma de la Tierra (Smith, 1975).

Entonces la aceleración gravitacional  $\vec{g}$  sobre la masa  $m$  viene dada por la ecuación 3.2:

$$\vec{g} = G \frac{M}{R^2} \quad (3.2)$$

También se le conoce como atracción gravitacional. La aceleración de gravedad fue primero medida por Galileo en su famoso experimento en Pisa, Italia. El valor numérico de  $g$  sobre la superficie de la Tierra es alrededor de  $980 \text{ (cm/s}^2\text{)}$ . En honor de Galileo la unidad de aceleración de gravedad,  $1 \text{ (cm/s}^2\text{)}$  es llamada el Galileo ó Gal (Telford et al., 1990).

### 3.2 El geoide

El Geoide es una superficie equipotencial que coincide con el nivel medio del mar; esta superficie rodea a la Tierra y su forma está determinada por las capas de roca que se encuentran por encima o por debajo de este nivel, ya sea en un exceso o en un déficit de masa, además, se le considera la forma de la Tierra. La fuerza de gravedad en cualquier punto de la superficie geoidal debe ser perpendicular a la superficie. El Geoide presenta una compleja variación interna de densidades, es por eso que el Geoide se lleva a una superficie lisa, la cual también es una superficie equipotencial que obedece a una rotación y que representa una densidad uniforme. Por la distribución de las fuerzas de gravedad, así como por la rotación, la forma de esta superficie se aproxima a un elipsoide de revolución, es por ello que se le llama elipsoide de referencia. A este elipsoide se le conoce como: la forma geométrica de la Tierra, y sus principales aplicaciones son para referenciar valores de potencial gravitacional considerando a una Tierra de densidad uniforme (Sánchez, 2005).

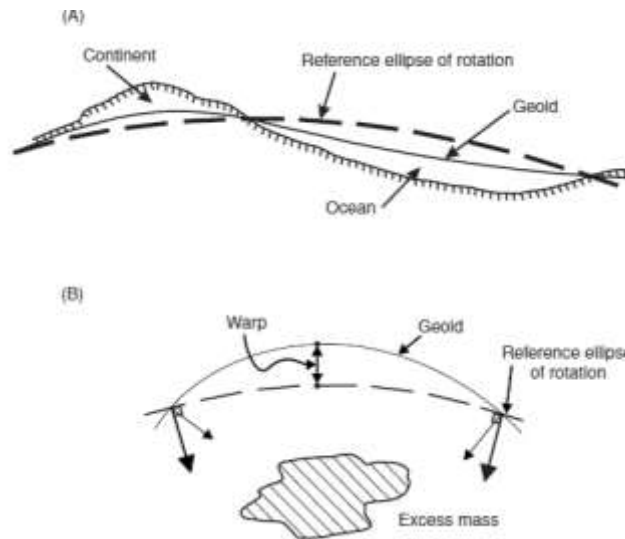


Figura 3.1. Distorsión de un geode: a) efectos de la escala continental, y b) Efectos locales debido a un exceso de masa en el subsuelo (Reynolds, 2011).

Este elipsoide es descrito por un factor de achatamiento:

$$f = \frac{R_e - R_p}{R_e} \quad (3.3)$$

Donde:

$R_e$  = Radio ecuatorial

$R_p$  = Radio polar

La ecuación (3) indica que la Tierra se aproxima a una forma de elipsoide de revolución con un factor de achatamiento o aplanamiento de (1/298.257).

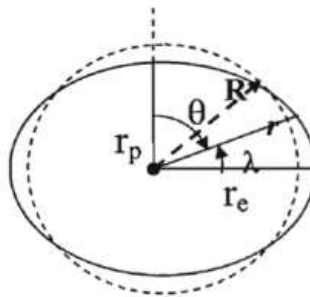


Figura 3.2 Las diferencias entre un elipsoide y una esfera debido al factor de achatamiento (Sánchez, 2012).

Se ha calculado la aceleración de la gravedad para un modelo elipsoidal de la Tierra, y toma la siguiente forma:

$$g_w = A(1 + B\text{sen}^2w - C\text{sen}^22w) \quad (3.4)$$

El valor de la aceleración y del achatamiento depende de los valores de la gravedad en el polo y en el ecuador. Por lo que en 1930 la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica propuso utilizar el valor del metro patrón, medido en París, quedando los siguientes

valores:

A = Gravedad normal en el Ecuador= 978.049 gales

Radio en el ecuador = 6, 378, 049 m.

B = Aplanamiento gravimétrico= 0.0052884

Radio en el polo = 6, 356, 909 m.

C = factor que depende del aplanamiento geométrico= 0.0000059

Achatamiento =  $1/297 = 0.003367$

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$g_w = 978.049(1 + 0.0052884\text{sen}^2w - 0.0000059\text{sen}^22w)\text{Gales} \quad (3.5)$$

Esta fórmula proporciona el valor teórico de la gravedad para cada lugar en función de su latitud. Por lo tanto, para una latitud de  $45^\circ$ , en el sistema mks: se obtiene un valor promedio de 9.81 Gales.

Con la tecnología de los satélites los parámetros se han calculado con mayor precisión , finalmente en 1984 se estableció una fórmula internacional con las siguientes constantes (Sánchez, 2012):

$$g_w = 9.7803267714 \frac{1+0.00193185138639\text{sen}^2w}{\sqrt{1-0.006694337999013\text{sen}^2w}} \frac{m}{s^2} \quad (3.6)$$

### 3.3 Gravímetros

Los gravímetros son aparatos utilizados para las determinaciones relativas de la fuerza de gravedad.

El gravímetro consiste de una masa suspendida en un resorte, el cual se deforma proporcionalmente a la fuerza de la gravedad que actúa en la masa. En condiciones de equilibrio estático se tiene que:

$$kd = m\vec{g} \quad (3.7)$$

en donde "k" es la constante del resorte, "d" es la elongación del resorte para contrarrestar la fuerza " $m\vec{g}$ ", por lo tanto:

$$\vec{g} = \frac{kd}{m} \quad (3.8)$$

La aceleración de la gravedad sólo depende de la deformación "d", considerando que "k" y "d" son fijos (Sánchez, 2012).

Según los principios de medición utilizados, los gravímetros pueden ser dinámicos (inestables) o estáticos (estables).

Los gravímetros dinámicos utilizan como su nombre lo indica métodos dinámicos; en ellos se observa el movimiento de un cuerpo bajo la acción de la gravedad. Durante muchos años el método que obtuvo mucha difusión y fue muy utilizado fue el método pendular el cual estaba basado en las observaciones de las oscilaciones libres del péndulo.

Por otra parte, los gravímetros estáticos utilizan métodos en los que se observa un cambio en la posición de equilibrio de un cuerpo bajo la acción de la fuerza de gravedad y de otra fuerza niveladora de ella. Actualmente en este tipo de gravímetros, esa fuerza es la elasticidad de cuerpos sólidos como pueden ser los muelles, hilos o membranas. Son sensibles con respecto a los cambios de temperatura, presión y pequeñas variaciones sísmicas y magnéticas. Estos últimos gravímetros aparecieron alrededor de los años 30 del siglo pasado y actualmente son aparatos fundamentales para determinaciones relativas de la fuerza de gravedad (Mironov, 1977).

La diferencia entre ambos gravímetros consiste en que el segundo tipo (inestables) en lugar de medir la deformación del resorte, aplica fuerzas externas para equilibrar la fuerza de gravedad, obteniendo de esta manera una mayor aproximación en las lecturas (Sánchez, 2012).

### *3.3.1 Gravímetro estable.*

El gravímetro con el que se trabajó es de marca Scyntrex modelo CG-5; es un gravímetro estable está compuesto por:

- Una Viga, en cuyo extremo lleva una masa, y en el otro extremo se encuentra un par de alambres y soportes finos que actúan como bisagras atenuadoras de la fricción.
- Un hilo muy fino, enlazado en el extremo superior del soporte, y otro en el extremo inferior del mismo. El hilo superior está unido al sistema de nivelación, y el hilo inferior está sujeto al brazo. La longitud efectiva del soporte es la combinación de la longitud del soporte helicoidal y la de los dos hilos finos, proporcionando la resultante una longitud 0 ( $l_0 = 0$ ).

Al gravímetro se le dice de “longitud cero”, porque el desplazamiento del resorte de su posición de equilibrio, originado por el peso del brazo estando en la posición cero (de equilibrio), es contrarrestado por la tensión dirigida en sentido opuesto y que actúa sobre el resorte cuando este se está desplazando, es decir, el sistema se mantiene quieto (Sánchez, 2005).

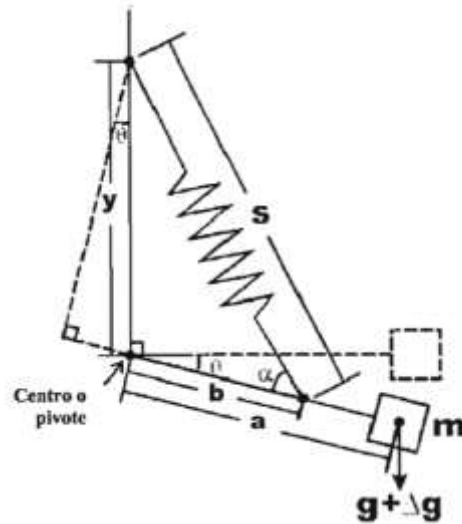


Figura 3.3 Diagrama esquemático del sistema LaCoste & Romberg de longitud cero (Sánchez, 2012).

El gravímetro, posee un sistema de nivelación y un tornillo que son calibrados de forma precisa a lo largo de un rango entero. Los factores de calibración sólo dependen de la calidad del sistema nivelador y del tornillo micrométrico de medida (Sánchez, 2012)

En lo que se refiere a la deriva del instrumento, la casa Lacoste & Romberg conecta el brazo a la carcasa del gravímetro con dos soportes horizontales dispuestos simétricamente, consiguiendo así disminuir la deriva instrumental irregular y aumentar la seguridad del sistema. Los cambios en la presión del aire podrían causar un pequeño cambio aparente en la gravedad, debido a la presión sobre la masa y del brazo, lo que se resuelve sellando el interior del gravímetro con respecto al aire del exterior; además el interior es mantenido a una temperatura constante para evitar dilatación o contracción del sistema (Sánchez, 2005).

### 3.4 Aplicaciones del método gravimétrico

Los estudios de gravedad se utilizan ampliamente en la investigación de estructuras geológicas a gran y mediana escala (Paterson y Reeves 1985). Los primeros estudios marinos, realizados desde submarinos, indicaron la existencia

de grandes anomalías de gravedad positivas y negativas asociadas con arcos insulares y trincheras oceánicas, respectivamente; el trabajo posterior a bordo ha demostrado su lateral continuidad y ha demostrado que la mayoría de las características principales de la superficie de la Tierra se pueden delinear mediante estudios de gravedad. Las anomalías de gravedad también han demostrado que la mayoría de estas principales características de alivio están en equilibrio isostático, sugiriendo que la litosfera no es capaz de soportar cargas significativas y se rinde isostáticamente a cualquier cambio en carga superficial (Reynolds, 2011).

En la escala media, las anomalías de gravedad pueden revelar la forma subsuperficial de intrusiones ígneas como el batolito granítico y macizos de anortosita. Del mismo modo, la topografía por gravedad ha sido ampliamente utilizada en la ubicación de cuencas sedimentarias, y sus estructuras interpretadas han proporcionado información importante sobre los mecanismos de formación de cuencas. El método de la gravedad fue una vez ampliamente utilizado por la industria del petróleo para la ubicación de posibles trampas de hidrocarburos, pero la gran mejora posterior en la eficiencia y la tecnología de la topografía sísmica ha llevado a la desaparición de los estudios de gravedad como exploración primaria herramienta de exploración primaria (Reynolds, 2011).

En aplicaciones comerciales, la topografía por gravedad rara vez es utilizado en exploración de reconocimiento. Esto es porque el método es relativamente lento de ejecutar y, por lo tanto, costoso, debido a la necesidad de determinar con precisión elevaciones y la duración del procedimiento de reducción, sin embargo, los métodos de gravedad sí encuentran aplicación como técnica de seguimiento utilizada en un objetivo definido por otro método más rentable (Reynolds, 2011).

Una importante aplicación de este tipo en la exploración minera es la determinación del tonelaje de mineral por el exceso de masa. El levantamiento por gravedad puede usarse en hidrogeología, por ejemplo, en investigaciones para determinar la geometría del potencial acuíferos (Reynolds, 2011).

La detección de vacíos ha sido posible gracias al desarrollo de técnicas microgravimétricas que pueden detectar cambios de gravedad tan pequeños como un microgal. Arzi (1975) describió una encuesta de microgravedad del sitio propuesto de una torre de enfriamiento que sirve a una planta de energía nuclear, donde se sospechaba que las cavidades de solución podrían estar presentes en el lecho rocoso dolomítico. Las mediciones se realizaron en una cuadrícula de 15 m en puntos cuyas elevaciones se habían determinado a  $\pm 3$  mm, con lecturas de base a intervalos de 40 minutos. El espesor del suelo se había determinado de modo que sus efectos podrían calcularse y "despojarse" de las observaciones para eliminar las variaciones de gravedad causadas por ondulaciones topografía de la roca madre.

Casten y Gram (1989) han descrito encuestas de microgravedad realizado bajo tierra para localizar cavidades que podrían plantear una amenaza para la seguridad de los trabajos mineros (Reynolds, 2011).

Los estudios de microgravedad también encuentran aplicación en investigaciones arqueológicas, donde pueden usarse en la detección de edificios enterrados, tumbas y otros artefactos (Reynolds, 2011).

La técnica también se ha utilizado para estudiar el movimiento de aguas subterráneas a través de una región. Un desarrollo reciente importante en la topografía por gravedad es el diseño de instrumentos portátiles capaces de medir la gravedad absoluta con alta precisión. A pesar de que el costo de tales instrumentos es alto, es posible que se utilizará en el futuro para investigar la masa a gran escala movimientos en el interior de la Tierra y pequeñas variaciones de gravedad cíclica asociadas con fenómenos neotectónicos tales como terremotos y levantamiento posglacial (Reynolds, 2011).

Los estudios gravimétricos tienen diversas aplicaciones relacionadas al estudio del subsuelo; en la siguiente tabla se muestran algunas de ellas.

Tabla 3.1. Aplicaciones de los estudios gravimétricos. Fuente: Elaborada a partir de Reynolds, 2011
---

Exploración de hidrocarburos
Monitoreo de reservas de hidrocarburo
Monitoreo de la contención de CO2 bajo tierra
Estudios geológicos regionales.
Determinación de compensación isostática
Exploración y determinación masiva de depósitos minerales.
Detección de cavidades subterráneas (microgravedad), cuevas, características de soluciones, túneles
Ubicación de valles rocosos enterrados
Determinación del espesor del glaciar.
Oscilaciones de las mareas
Arqueogeofísica (microgravedad), ubicación de tumbas, criptas
Forma de la tierra (geodesia)
Militar (especialmente para trayectorias de misiles)
Posicionamiento satelital
Monitoreo de volcanes
Cambios hidrológicos en el geoide.

### 3.5 Correcciones gravimétricas

Los datos gravimétricos que se obtienen de la medición con el gravímetro necesitan de una serie de correcciones, debido a que estos están expuestos a diversos factores del medio externo o incluso por algunos que afectan directamente al aparato con el que se obtuvieron. Para ello es necesario definir el concepto de anomalía gravimétrica (Sánchez, 2012); es la diferencia entre el valor medido de la gravedad en algún punto y el valor teórico de la gravedad en el mismo punto predicho por la Fórmula Internacional de la Gravedad, después de haber aplicado unos factores de corrección aparte de las variaciones de densidad de la Tierra (Smith, 1975). Las anomalías gravimétricas indican las variaciones laterales de densidad que son causadas por efectos geológicos como: plegamientos de estructuras, fallas, intrusiones, cambios litológicos, etc.

### 3.5.1 Efecto por deriva instrumental

En el desarrollo de un estudio de campo, el gravímetro presenta ciertas variaciones en sus lecturas debido a las alteraciones que sufre este aparato debido a la temperatura o la fatiga de los resortes o mecanismos a lo largo del día.

Para un mismo punto de observación, se tendrán valores de lectura diferentes en distintas horas del día, lo que nos da variaciones aproximadas de 0.02 mGal o incluso menores para esta corrección (Sánchez, 2005).

Una manera para corregir esto es realizando repetidas mediciones en una misma estación, conocida como estación base, en intervalos de tiempos iguales. Las distintas mediciones realizadas en la estación base se grafican con respecto al tiempo transcurrido para cada una y se estima la pendiente, siendo este el factor principal en la corrección de deriva. El principio de este procesamiento es llevar todas las mediciones realizados en el campo a un tiempo cero, simulando que todas las mediciones se realizaron al mismo tiempo (Seigel, 1995).

La deriva se calcula de la siguiente manera:

$$Deriva = \frac{gobs(inicial\ base) - gobs(final\ base)}{tp} \quad (3.9)$$

Donde tp es el tiempo transcurrido en minutos de la toma de datos. Las mediciones se pueden corregir como:

$$Corrección\ por\ deriva = gobs(inicial\ base) - Deriva * t \quad (3.10)$$

Donde t es el tiempo transcurrido entre la lectura inicial (estación base) y la lectura tomada de cada una de los puntos.

Los datos corregidos por deriva instrumental se usan para calcular la Gravedad observada:

$$Gobs = \text{Datos corregidos por deriva instrumental} - \text{lectura de la base} + \text{Gravedad de la zona (gravedad absoluta)} \quad (3.11)$$

El resultado es en miligales.

### 3.5.2 Gravedad teórica elipsoidal o corrección por latitud

Es la gravedad calculada en el elipsoide más adecuado a la Tierra, incluido el efecto atmosférico (Hinze et al., 2005).

$$g_T = \frac{g_e(1+k\sin^2\varphi)}{(1-e^2\sin^2\varphi)^{\frac{1}{2}}} \quad (3.12)$$

$\varphi$  = latitud donde fue tomada la lectura

$g_e = 978032.67715 \text{mGal}$  (gravedad en el ecuador)

$k = 0.001931851353$  (derivada constante)

$e^2 = 0.0066943800229$  (primera excentricidad numérica)

### 3.5.3 Corrección por efecto atmosférico

Es la corrección por el cambio en masa de la atmósfera en función de la altura sobre el elipsoide como el resultado de la inclusión del efecto de la gravedad atmosférica en la gravedad teórica elipsoide. El resultado es en miligales (Hinze et al., 2005).

$$\delta g_{atm} = 0.874 - 9.9 \times 10^{-5}h + 10^{-9}h^2 \quad (3.13)$$

$h$  = altura de la estación en metros

### 3.5.4 Corrección de Aire libre

La corrección de aire libre es la diferencia entre la medición a nivel del mar y la elevación del punto de observación en metros, suponiendo que entre ellos no hay masa atrayente (Hinze et al., 2005).

$$\delta g_h = -(0.3087691 - 0.0004398\sin^2\varphi)h + 7.2125 \times 10^{-8}h^2 \quad (3.14)$$

### 3.5.5 Corrección de Bouguer

Esta corrección evalúa la atracción gravitacional de la capa terrestre comprendida entre el datum vertical (ahora el elipsoide) y la estación (Silvia, 2011).

Dado que las masas topográficas se distribuyen irregularmente, sus efectos son difíciles de calcular con precisión y la aproximación es necesaria. El enfoque más simple asume que la topografía puede ser representada por una placa que se

extiende hasta el infinito en todas las direcciones, con densidad constante y de espesor igual a la altura de la estación de campo de gravedad por encima de la superficie de referencia constante. Esta placa se conoce como placa de Bouguer, la cual produce una gravedad igual a  $2\pi G\sigma h$  donde  $h$  es el espesor de la placa,  $G$  es la constante de gravitación universal y  $\sigma$  la densidad igual a  $2670 \text{ kg/m}^3$  para los materiales de corteza terrestre (Milson, 2003).

Esta corrección es necesaria para aislar el efecto de gravedad de la masa de la Tierra entre el dato vertical y el sitio de observación; se debe de restar de la gravedad observada (Hinze et al., 2005).

$$\delta g_{BC} = 2\pi G\sigma h = 4.193 \times 10^{-5} \sigma h \quad (3.15)$$

$$G = \text{constante gravitacional} = 6.673 \times 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{Kgs}^2}$$

$$\sigma = \text{densidad de la corteza terrestre} = 2670 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

### 3.3.6 Anomalía de Bouguer

La anomalía de Bouguer refleja “masas anómalas”, masas con densidad arriba o debajo de la densidad de referencia, por ejemplo,  $2.67 \text{ g/cm}^3$ . La elección de este valor es una densidad promedio de la corteza apropiada para la mayoría de las situaciones geológicas (Torres, 2002).

$$\text{Anomalía de Bouguer} = Gobs - gT + \delta g_h - \delta g_{BC} \quad (3.16)$$

A la fórmula anterior se le conoce como Anomalía de Bouguer simple, si se agrega la corrección por terreno (CT) se obtiene la anomalía de Bouguer completa:

$$\text{Anomalía de Bouguer completa} = Gobs - gT + \delta g_h - \delta g_{BC} + CT \quad (3.17)$$

### 3.3.7 Anomalía de aire libre o corrección por altitud

Se le llama aire libre porque la anomalía teórica se calcula como si la medición gravimétrica fuera hecha a la elevación de la estación, pero sin tomar en cuenta la atracción de material entre esa elevación y el nivel de referencia, es decir, como si el gravímetro estuviera suspendido en el aire (Torres, 2002).

Se puede definir una anomalía gravitatoria como la diferencia entre el valor medido de la gravedad en algún punto y el valor teórico de la gravedad en el mismo punto predicho por la Fórmula Internacional de la Gravedad (IGF), después de haber aplicado unos factores de corrección aparte de las variaciones de densidad de la Tierra (Smith, 1975).

Para calcular la anomalía de Aire libre se aplica la siguiente fórmula:

$$\text{Anomalía de Aire Libre} = G_{obs} - g_T + \delta g_h \quad (3.18)$$

El resultado es en miligales.

### 3.6 Filtrado de anomalías gravimétricas

A los datos gravimétricos se pueden aplicar filtros para eliminar el ruido, separar componentes tanto residuales como regionales y atenuar ciertas características, estos filtrados tienen como objetivo enfatizar las anomalías de interés para interpretar con mayor facilidad los datos.

#### 3.6.1 Primera y segunda derivadas

Cuando el espaciamiento de las lecturas es pequeño, y su precisión elevada, el método de las segundas derivadas es particularmente apropiado para resolver y acentuar las anomalías de una extensión superficial pequeña. En los mapas de gravedad observada, tales anomalías pueden ser oscurecidas, y hasta cierto punto totalmente ocultas por las anomalías regionales, así como por los efectos de otras pequeñas características muy próximas (Dobrin, 1952).

En cuanto a la primera derivada vertical, esta operación matemática se aplica sobre la malla original de anomalías de Bouguer y obtenemos un equivalente a un mapa de anomalías residuales. Esta operación nos permite acentuar y mejorar las anomalías de alta frecuencia o de baja longitud de onda debidas generalmente a fuentes someras que quedan enmascaradas por las anomalías de larga longitud de onda (regionales) que son debidas generalmente a fuentes más profundas (Granja, 2005).

La segunda derivada vertical, como relación del cambio vertical de la variación de la gravedad con la profundidad, aumenta el efecto de la gravedad de las

estructuras más pequeñas y más someras con respecto al de las características de mayor escala, que usualmente, se encuentran a mayores profundidades y, de esta manera, las estructuras geológicas de mayor interés en las exploraciones petrolíferas y mineras son acentuadas a expensas de las grandes estructuras regionales (Dobrin, 1952).

### 3.7 Deconvolución de Werner

La deconvolución de Werner (Werner 1953) es una técnica muy útil y simple para interpretaciones preliminares de datos de campos potenciales para cuerpos aislados. Esta técnica está basada en la hipótesis de que la fuente es un cuerpo delgado vertical en forma de dique, pero puede ser aplicado para otros tipos de cuerpos asumiendo que ese cuerpo está formado por diques verticales de diferentes tamaños. Lo más útil de este método se basa en el hecho de que el gradiente horizontal del campo total causado por el borde de una interfase es equivalente al campo total de un dique delgado. Esta técnica es muy usada, ya que no se requiere de un modelo inicial de interpretación (Harnold, 2012).

Al igual que la deconvolución de Euler, este método es apropiadamente un método de inversión. El campo potencial es analizado y se resuelven los parámetros asociados a la fuente. Es asumido inicialmente que para un análisis del campo total se utilizan cuerpos delgados laminares. Pero esa anomalía es igual al gradiente horizontal de la anomalía del campo total sobre un espacio semi infinito. Sin embargo, la deconvolución de Werner es aplicada a diques y capas, pero ha sido extendida a polígonos (Blakely, 1995).

La ecuación sobre una capa dipolar inclinada es:

$$\Delta T(x) \frac{A(x-x_0)+B^{\neq}d}{(x-x_0)^2+d^2} \quad (3.19)$$

Donde:

$x_0$  = localización de la fuente

d = profundidad de la fuente

A & B son una combinación de constantes, magnetización y buzamientos.

Si se reescribe lo anterior como una matriz de ecuaciones y, dado cuatro puntos observados en un perfil magnético, se obtienen cuatro soluciones con cuatro incógnitas. La deconvolución de Werner se convierte entonces en un método de “ventana deslizante”, en donde el operador se mueve a través del perfil y continuamente genera soluciones para las incógnitas. Longitudes de ventanas muy cortas o muy largas generan soluciones falsas, o no adaptadas al cuerpo que genera la anomalía estudiada, por ende, se debe elegir el tamaño de ventana que mejor genere respuestas para la inversión (Harnold, 2012).

### 3.8 Espectro radial de potencia

En el año 1970, Spector y Grant exponen un método para la determinar las profundidades de los eventos generadores de respuestas aeromagnéticas a través del análisis espectral (González, 2006).

Para la descomposición espectral en los métodos potenciales, se utiliza la Transformada Rápida de Fourier (FFT) la cual es utilizada para obtener el espectro radial, que se basa en un gráfico de número de ondas vs logaritmo de potencia (Spector y Grant, 1970).

Una vez obtenido el grafico mencionado se procede a calcular la profundidad o tope de un cuerpo geológico mediante la ecuación:

$$h = -\frac{m}{4\pi} \quad (3.20)$$

Donde:

h es la profundidad del tope del cuerpo geológico

m es la pendiente seleccionada para el espectro de potencia.

El logaritmo del espectro de potencia de una distribución irregular de masas a profundidad constante genera una gráfica aproximadamente lineal, por lo tanto, al ajustar la curva (obtenida por mínimos cuadrados) mediante una recta de máximo ajuste, se puede lograr una estimación de la profundidad y magnitud de la masa

causante. Cuanto mayor es la pendiente de la recta, más profundas son las masas que originan el campo de gravedad (Spector y Grant, 1970).

Para este método se supone que los cuerpos generadores de anomalías, son un conjunto de paralelepípedos. La superposición de los mismos origina una respuesta de atracción gravitatoria (Blakely, 1995).

Aunque estos estudios fueron realizados por Spector y Grant para datos aeromagnéticos, su aplicación puede ser extendida a la gravimetría. Esto es así debido a que el modelado de ambos tipos de datos se hace a partir de la superposición de efectos de diversos prismas que simulan a cuerpos geológicos (Harnold, 2012).

### 3.9 Método de georadar

El método del georadar también conocido como GPR por sus siglas en inglés (Ground Penetration Radar) es un método electromagnético de reflexión. Está basado en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas y mediante eso se pueden obtener imágenes del subsuelo y saber qué es lo que lo compone. La propagación de las ondas mencionadas está regida por las ecuaciones de Maxwell y depende de las propiedades electromagnéticas de los materiales que componen el subsuelo como: la conductividad, la permitividad dieléctrica y la permeabilidad magnética. Es un método no invasivo, lo que quiere decir que no afecta al área en donde se hace la prospección, no se requiere ningún tipo de excavación, y debido a eso, se puede utilizar en casi todos los tipos de suelos.

### 3.10 Ecuaciones de Maxwell

La base teórica de este método de prospección son las 4 ecuaciones Maxwell, las cuales fueron publicadas en el “Tratado de electricidad y magnetismo” por James Clerk Maxwell en el año de 1873:

Ley de Gauss para el campo eléctrico

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3.21)$$

Ley de Gauss para el campo magnético

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.22)$$

Ley de Faraday

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{-\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.23)$$

Ley de Ampere – Maxwell

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.24)$$

Donde,

$\vec{E}$  es el campo eléctrico en voltios/m,

$\vec{H}$  es la intensidad del campo magnético en Amperios/m,

$\vec{D}$  es el desplazamiento del campo eléctrico en Culombios/m<sup>2</sup>,

$\vec{B}$  es el flujo del campo magnético en Weber/m<sup>2</sup> ó Tesla,

$\vec{J}$  es la densidad de corriente en Amperios/m<sup>2</sup>,

$\rho$  es la densidad de carga en culombios/m<sup>3</sup>,

(Gómez-Esteban, 2012).

### 3.11 Constante dieléctrica

La constante dieléctrica es una constante ( $\epsilon$ ) que da una medida de la polarización de un material en presencia de un campo eléctrico. Proporciona un valor de la respuesta estática del medio cuando está en presencia de un campo eléctrico externo. La constante dieléctrica del vacío es 1. Para la mayoría de los materiales que se pueden encontrar en el subsuelo al realizar una prospección electromagnética, los valores de la constante dieléctrica se encontrarán entre 1.00051 (la del aire) y 81, siendo esta última la constante dieléctrica del agua a 20° de temperatura (Pérez, 2001).

Permite calcular la profundidad de una discontinuidad y está definido por la expresión:

$$\varepsilon = \frac{c^2}{V_r^2} \quad (3.25)$$

Donde,

c es la velocidad de la luz en el vacío (3x10<sup>8</sup> m/s)

V<sub>r</sub> es la velocidad de las ondas electromagnéticas en el medio considerado (Pérez, 2001).

### 3.12 Conductividad

La conductividad ( $\sigma$ ) de un medio proporciona una medida de la respuesta de sus cargas libres en presencia de un campo eléctrico externo, siendo el factor de proporcionalidad entre el campo libre aplicado y la densidad de volumen de corriente debido al movimiento de aquellas cargas libres; es decir, proporciona una medida de la capacidad de un material de conducir corriente eléctrica. En general se puede distinguir entre materiales conductores, semiconductores y aislantes. La mayor parte de las rocas y subsuelos en los que se realizan estudios, pueden ser considerados como aislantes. En estos medios, la conducción eléctrica se debe básicamente a la existencia de fluido en poros y fisuras; es decir, cuando mayor sea el contenido de agua, el porcentaje de iones disueltos y la porosidad del medio, mayor será su conductividad (Pérez, 2001).

Para definir la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en un medio material se puede partir de las cuatro ecuaciones que conforman las leyes de Maxwell (Roa, 2011). Una vez desarrolladas dichas formulaciones se obtiene la siguiente expresión:

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{\omega}{\frac{\omega}{c} \Re \sqrt{\varepsilon \mu}} \cong \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2} + 1 \right)}} \quad (3.26)$$

Donde,

V es la velocidad de fase de la onda electromagnética

$\beta$  es la constante de fase

$\mu$  es la permeabilidad magnética

$c$  es la velocidad de propagación de una onda electromagnética en el vacío

$\epsilon$  es la constante dieléctrica

$\omega$  es la pulsación del campo electromagnético externo

Sin embargo, dado que los suelos corresponden en su mayoría a medios no magnéticos, la permeabilidad magnética es próxima a 1, por lo que la expresión puede ser simplificada obteniendo el siguiente resultado (Pérez, 2001):

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (3.27)$$

Investigaciones orientadas a la evaluación de las propiedades electromagnéticas de los materiales que conforman el subsuelo han determinado los parámetros electromagnéticos para diferentes tipos de suelos y rocas; se presenta la Figura 3.6 que muestra el valor medio de constante dieléctrica y velocidad de propagación de onda en función del tipo de material.

*Tabla 3.2 Parámetros electromagnéticos para diferentes tipos de materiales. (Pérez, 2001).*

<b>Rocas</b>	<b>Arenisca</b>	<b>6-8</b>	<b>10<sup>-5</sup>-10</b>	<b>10,6-11,2</b>
	Basalto	8	-	10,6
	Caliza	4-9	10 <sup>-5</sup> -25	14
	Carbón	4-5	-	-
	Cuarzo	4,3	0,001-3,3	-
	Granito	5-15	10 <sup>-5</sup> -1	10 <sup>-5</sup> -0,6
	Mármol	8,3-13	-	8,3-10,4
	Roca ígnea extrusiva	4-7	-	-
<b>Suelos</b>	Aluvial	9-23	10-100	6,3-10

	Arcilla	3-15	0,25-1000	11-17,3
	Arcilla limosa	30-50	>1000	-
	Arena	3-30	0,01-1	5,5-17
	Limos	3-40	1-100	7-9,5
	Gravas	<8	<0,8	>10,6
	Gravas arenosas	15-22	<0,8	6,4-7,7
	Turba	50-78	1-2	3,4-4,2

### 3.13 Permitividad eléctrica

La permitividad dieléctrica absoluta es una constante de proporcionalidad entre la intensidad del campo eléctrico externo aplicado y el vector de desplazamiento eléctrico  $\vec{D}$ .

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (3.28)$$

La permitividad absoluta,  $\varepsilon$  (medida en el S.I. en Faraday/metro), se define como el producto entre una permitividad relativa del material ( $\varepsilon_r$ ), que es constante, y la permitividad dieléctrica del vacío ( $\varepsilon_0=8.854 \times 10^{-12}$  F/m):

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (3.29)$$

### 3.14 Permeabilidad magnética

La permeabilidad magnética ( $\mu$ ) es un parámetro que relaciona la inducción magnética con la intensidad del campo magnético, el cual se puede describir como el producto entre la permeabilidad magnética del vacío ( $\mu_0$ ) y la permeabilidad relativa de la materia ( $\mu_r$ ). En la mayoría de los materiales sobre los que se realizan estudios mediante GPR, con excepción de aquellos que contienen componentes ferromagnéticos, se determina que la permeabilidad magnética es próxima a 1 (Roa, 2011).

### 3.15 Velocidad de propagación

El conocimiento de la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el medio investigado es esencial para la conversión de los tiempos de retraso en profundidades. En lo referente a las antenas de los georradars, las que se usan actualmente suelen ser de tipo mono-estático (misma posición para los dispositivos de transmisión y recepción) con apantallamiento. Éste es esencial tanto para la recepción de señales “limpias” así como para la seguridad de los operadores en cuanto a emisiones electromagnéticas.

La velocidad puede determinarse empíricamente, es decir interceptando un objetivo ubicado a profundidad conocida, mediante técnicas de análisis electromagnético de la señal (Ajuste de hipérbola) o estimarse en función de las características litológicas del subsuelo (tabla 3.3).

*Tabla 3.3 Valores estimativos de constante dieléctrica y atenuación para diferentes materiales y litologías a 100 MHz (Daniel, 1996).*

<b>Material</b>	<b>Atenuación</b>	<b>Constante dieléctrica</b>	<b>Material</b>	<b>Atenuación dB/m</b>	<b>Constante dieléctrica</b>
<b>Aire</b>	0	1			
<b>Asfalto seco</b>	2-15	2-4	Sal de roca seca	0.01-1	4-7
<b>Asfalto húmedo</b>	2-20	6-12	Arena seca	0.01-1	4-6
<b>Arcilla</b>	10-100	2-40	Arena saturada	0.03-0.3	10-30
<b>Carbón seco</b>	1-10	3.5-9	Arenisca seca	2-10	2-3
<b>Carbón húmedo</b>	2-20	8-25	Arenisca mojada	10-20	5-10

<b>Concreto seco</b>	<b>2-12</b>	<b>4-10</b>	<b>Agua de mar</b>	<b>1000</b>	<b>81</b>
<b>Hormigón mojado</b>	10-25	10-20	Hielo de agua de mar	10-30	4-8
<b>Agua dulce</b>	0.1	80	Esquisto saturado	10-100	6-9
<b>Hielo de agua dulce</b>	0.1-2	4	Nieve	0.1-2	8-12
<b>Granito seco</b>	0.5-3	5	Suelo arenoso seco	0.1-2	4-6
<b>Granito mojado</b>	2-5	7	Suelo arenoso húmedo	1-5	15-30
<b>Caliza seca</b>	0.5-10	7	Suelo limoso seco	0.5-3	4-6
<b>Caliza mojada</b>	10-25	8	Suelo limoso húmedo	1-6	10-20
<b>Permafrost</b>	0.1-5	4-8	Suelo arcilloso seco	0.3-3	4-6

### 3.16 El georadar.

La técnica de prospección con georadar permite averiguar, de forma indirecta, la estructura del subsuelo a partir de la transmisión de impulsos electromagnéticos y

de la posterior recepción de las reflexiones generadas por discontinuidades presentes en el subsuelo. En términos físicos, la técnica georadar es sensible a todas aquellas variaciones de conductividad, permitividad eléctrica y permeabilidad magnética que pueden producirse en un medio, sean debidas bien a cambios litológicos o bien por la presencia de estructuras enterradas (Daniels, 2004; Conyers, 2004). El GPR se define como “una serie de técnicas electromagnéticas diseñadas principalmente para la ubicación de objetos o interfaces enterrados bajo la superficie de la tierra o ubicados dentro de una estructura visualmente opaca” (Salucci et al., 2014, p. 1)

### 3.17 Historia del georadar

El primer uso de señales electromagnéticas (EM) para localizar objetos enterrados se atribuyen a Hulsmeyer en una patente alemana en 1904, pero la primera descripción publicada de tales investigaciones fue de Leimbach y Löwy (1910), también en patentes alemanas.

Los sistemas utilizados en estas investigaciones emplearon transmisión continua de onda (CW). Hülsenbeck & Co. desarrolló el primer uso de radar pulsado para investigar la naturaleza de objetos enterrados. Las técnicas pulsadas se desarrollaron sustancialmente sobre las siguientes cinco décadas. Su desarrollo civil temprano fue en radio ecosonda de capas de hielo polar (Cook, 1960; Evans, 1965; Swithinbank, 1968).

El primer uso del radar de impulso para fines glaciológicos fue a principios de la década de 1970 (Watts et al., 1975); y desde entonces ha habido una amplia aceptación del método de radar en ciertas áreas de ingeniería civil, como mapeo de servicios públicos, análisis de pavimento de carreteras, pruebas de balasto ferroviario y detección de huecos detrás de revestimientos de túneles (Reynolds, 2011).

También ha habido un papel expansivo para el método en aplicaciones geológicas, particularmente en la evaluación rápida de depósitos superficiales, ubicación de cavidades, etc. GPR se ha utilizado en investigaciones de secuencias sedimentológicas que podrían ser útiles para el modelado de

yacimientos de hidrocarburos en 3D; también en cuanto a la investigación de sedimentos eólicos y fluviales (Bristow y Jol, 2003).

Para investigaciones regionales y a gran escala, mediciones de radar se han hecho desde aviones y satélites.

### 3.18 Descripción de los componentes del georadar

El Georadar es un equipo que está compuesto por una antena transmisora de ondas electromagnéticas, una antena receptora, una unidad de control y almacenamiento de datos y en algunos casos de dispositivos de visualización.

#### 3.18.1 Las antenas

La frecuencia central de una emisión es uno de los parámetros más importantes de las antenas. Ésta determina la penetración de la señal emitida en los materiales del medio a estudiar.

Otra de las características de las antenas es el ancho de banda de la emisión, centrada en la frecuencia que caracteriza al equipo. Ya que se requiere que el pulso emitido por la antena sea de corta duración, el ancho de banda de la frecuencia debe ser amplio. El ancho de banda de este tipo de antenas provoca una pérdida de energía por dispersión. La atenuación de la señal para una misma frecuencia central aumenta cuando la banda de frecuencias es más ancha, haciendo que la sensibilidad del aparato y el alcance disminuyan (Roa, 2015).

La frecuencia central de la emisión depende del dipolo de la antena. Este parámetro limita, tanto el alcance del método como su resolución. Las emisiones a bajas frecuencias se atenúan en menor medida que las emisiones a frecuencias altas, pudiendo alcanzar con las primeras profundidades mayores de estudio. Por otro lado, debido a que tienen una longitud de onda mayor que las emisiones a más alta frecuencia, la resolución obtenida es menor (Roa, 2015).

La profundidad de investigación del método depende de la frecuencia de la antena, así como también de la capacidad de absorción del material; existe una relación inversa entre la frecuencia de las ondas emitidas y la profundidad de investigación ya que, a mayor frecuencia, menor será la profundidad de análisis;

sin embargo, la resolución de la señal de análisis será mayor y viceversa en el caso de utilizar una frecuencia menor para las ondas. Otro aspecto importante es que mientras más conductivo sea el subsuelo, más se reduce la profundidad de penetración. En la figura 3.4 se muestra la relación que existe entre la frecuencia de la antena y la profundidad de investigación que se logra explorar con ella.

Antena	Profundidad (m)
100 MHz	15-20
500 MHz	5-6
800 MHz	1-2

Figura 3.4 Profundidad de investigación con georadar GPR. Fuente: Universidad católica de Murcia.

#### 3.18.1.1 Tipos de antenas

Las antenas del georadar se clasifican en dos tipos, y esto depende de si la antena emisora y la antena receptora se encuentran en una misma unidad o no:

- Antenas monoestáticas: se utiliza un mismo dispositivo de antena como emisor y receptor de las ondas electromagnéticas.
- Antenas biestáticas: se usan dos antenas separadas, una se usa como emisora de las ondas electromagnéticas y otra se usa como receptora de ellas.

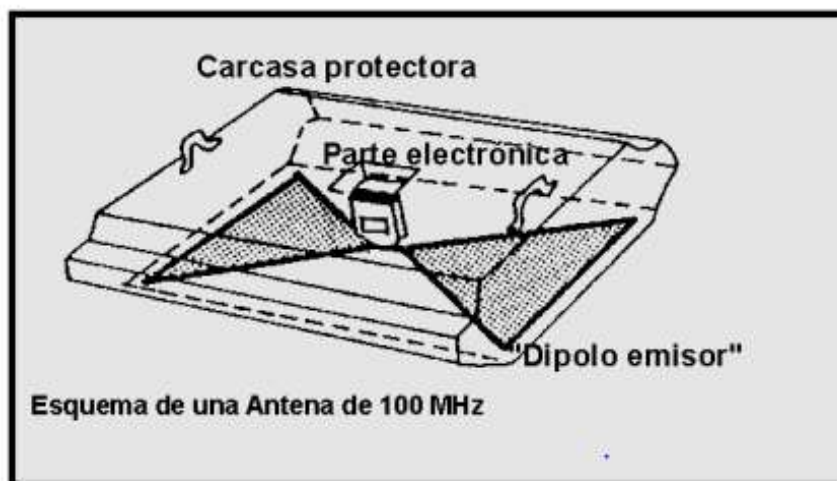


Figura 3.5 Esquema de una antena de 100 MHz de "GGSI" (Según Hännien et al., 1992). La espira que hace de dipolo emisor es del tipo mariposa (Pérez, 2001).

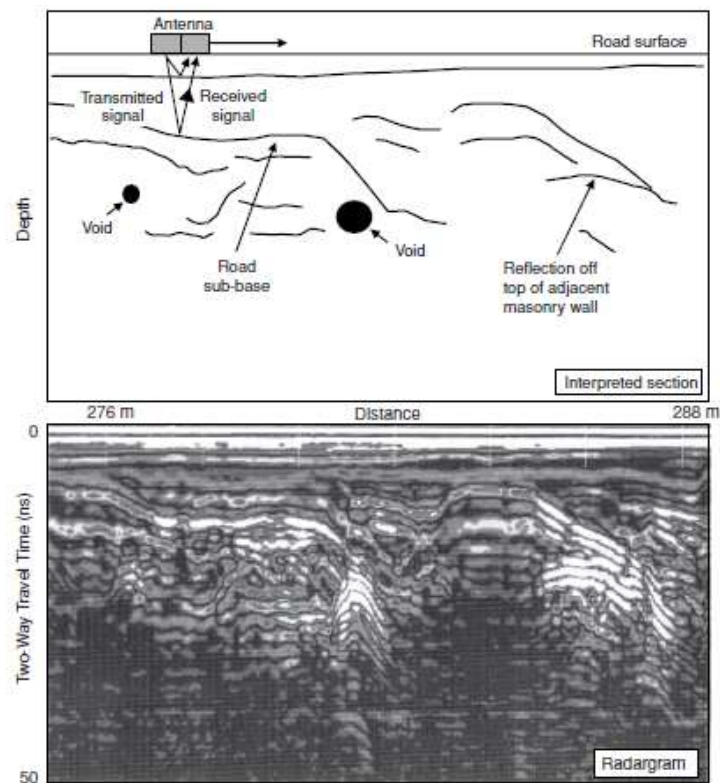
### 3.18.2 Unidad de control

La unidad central o unidad de control de un georadar es donde se realiza la coordinación y control de las antenas, de los diversos accesorios que se pueden añadir al equipo básico y de la señal emitida.. Esta unidad lleva implementado un programa informático que realiza el procesado básico de la señal e incorpora utilidades que permiten actuar sobre la señal emitida y sobre los registros que se adquieren, como son por ejemplo los filtrados y la modificación de la ganancia del registro, entre otros (Pérez, 2001).

La unidad de control suele ir conectada a un monitor para visualizar la señal que se está adquiriendo. Se puede seleccionar la forma de visualización del registro en campo, optando por un registro de trazas de amplitud o bien por una serie de escalas de colores o de tonos de gris, donde cada tono engloba un intervalo de amplitudes de la onda registrada. En los casos de radares más sencillos únicamente se puede visualizar la señal, sin poder efectuar ningún tratamiento que mejore la calidad de la imagen durante la adquisición de datos de campo. En otros equipos, esta unidad central es un ordenador personal portátil al que se le ha cargado un programa para efectuar el control de las antenas y procesado básico de las señales (Pérez, 2001).

### 3.19 Funcionamiento del georadar

El georadar funciona a través de la emisión de pulsos electromagnéticos hacia el subsuelo con una determinada frecuencia, los cuales se reflejan hacia la antena receptora cuando se encuentran con materiales con propiedades diferentes al material que lo antecede. Como se muestra en la figura 3.6, esto sucede mientras desplazamos el georadar longitudinalmente sobre la zona de estudio. Es necesario contar con un ordenador portátil y este a su vez debe de tener instalado un software de registro de la señal electromagnética, que la procesa y permite visualizar la señal en tiempo real.



*Figura 3.6 Funcionamiento del georadar. En los radargramas el eje horizontal representa la distancia recorrida por la antena emisora/receptora, mientras que el eje vertical representa la escala temporal, la cual se convierte a profundidad después de determinar la velocidad de propagación de las ondas en el medio investigado (Reynolds, 2011).*

Al momento de entender el funcionamiento de un georadar es necesario tener en cuenta que las propiedades físicas de los suelos inciden en la forma como se comportan ante los fenómenos eléctricos y magnéticos; esas diferentes

propiedades de las rocas, del aire y del agua que componen los suelos, como elementos sólidos, gaseosos y líquidos, son las que hacen posible la utilidad del GPR. Específicamente las propiedades que tienen incidencia en los resultados son la constante dieléctrica, la conductividad y la permeabilidad magnética (Roa, 2015).

### 3.20 Los radargramas

Los equipos georadar almacenan los datos en forma de perfiles denominados radargramas, es decir que se encargan de yuxtaponer y correlacionar en dos dimensiones todas las trazas registradas a lo largo de un perfil. El tiempo de llegada a superficie de las señales (tiempo de retraso, está directamente relacionado con la velocidad de transmisión de las ondas electromagnéticas en el terreno investigado, y con la profundidad de la discontinuidad que las ha generado, el eje de tiempo se convierte en eje de profundidad tras conocer la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el medio investigado. Por otra parte, la intensidad de la señal recibida depende del contraste, en términos de parámetros electromagnéticos, entre la estructura o el material enterrado y su entorno (Catanzariti, 2010).

El GPR tiene diversas aplicaciones, ya que es utilizado con diferentes objetivos, por ejemplo, para aplicaciones geológicas, donde la penetración en profundidad tiende a ser más importante que muy buena resolución, se utilizan antenas con frecuencias menores o igual a 500 MHz, para ingeniería no destructiva, antenas con frecuencias de 500 MHz y superiores se utilizan, típicamente hasta 900 MHz o 1 GHz, y en algunos casos tan altos como 2.5 GHz (Reynolds, 2011).

El método de georadar tiene diversas aplicaciones en diferentes áreas; en la siguiente tabla se pueden observar algunas de ellas.

Tabla 3.4 Aplicaciones del método de Georadar. Fuente: Elaboración propia a partir de Reynolds, 2011.
DetECCIÓN DE CAVIDADES Y FISURAS NATURALES
Mapeo de hundimiento

Mapeo de depósitos superficiales
Mapeo de estratigrafía del suelo
Investigaciones geológicas glaciales
Mapeo de fracturas en sal de roca
Ubicación de fallas, diques, vetas de carbón, et.
Mapeo de sedimentos de lagos y ríos
Ambiental
Mapeo de plumas contaminantes y remediación de monitoreo
Investigaciones de aguas subterráneas

## CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

El capítulo 4 está enfocado a la adquisición y procesamiento de los datos obtenidos con la prospección gravimétrica y con georadar.

### 4.1 Adquisición de datos gravimétricos

En agosto del 2019 se realizó una visita al Parque de la Orquídea donde se aplicó el método gravimétrico durante dos días. Se utilizó el gravímetro de marca SCYNTREX modelo CG-5 AUTOGRAV (figura 4.1) para adquirir los valores gravimétricos, un GPS con el cual se obtuvieron las coordenadas de los puntos en donde se tomaron las lecturas (figura 4.2), y cintas métricas (figura 4.3). Todo el equipo utilizado está descrito en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Equipo necesario para el levantamiento gravimétrico. Fuente: elaboración propia.	
Cantidad	Descripción
1	Gravímetro SCYNTREX CG5
2	Cintas de 50 metros
1	GPS



Figura 4.1 Gravímetro utilizado para la adquisición de datos gravimétricos. Foto tomada por: Márquez P., Sep. 2019.



Figura 4.2 GPS y libreta de campo utilizados para obtener y registrar coordenadas. Foto tomada por: Márquez P., Sep. 2019.



Figura 4.3 Equipo utilizado para el levantamiento gravimétrico. Foto tomada por: Márquez P., Sep. 2019.

Para el estudio gravimétrico, se definió una estación base, la cual tiene como coordenadas 2162519 N y 14718643 O. Se tomaron las lecturas gravimétricas de 107 puntos. El espaciamiento entre los puntos de cada perfil fue de 5 metros y en cada punto se tomaron dos lecturas en intervalos de 30 segundos cada una. Durante el día 23 de agosto se adquirieron datos de 5 tendidos gravimétricos (Figura 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7).



Figura 4.4 L1 de puntos gravimétricos. Fuente: Google Earth.



Figura 4.5. L2 de puntos gravimétricos. Fuente: Google Earth



Figura 4.6. L3 y L4 de puntos gravimétricos. Fuente: Google Earth.



Figura 4.7. L5 de puntos gravimétricos. Fuente: Google Earth.

Durante el 24 de agosto de 2019 se adquirieron datos de más puntos a los que se nombraron “puntos aleatorios” (Figura 4.8) y de 3 líneas más dentro del Parque de la Orquídea (Figura 4.9 y 4.10), siendo la línea 8 la de mayor longitud (Figura

4.10); también se tomaron lecturas de puntos sobre la cima de la cueva (Figura 4.11).

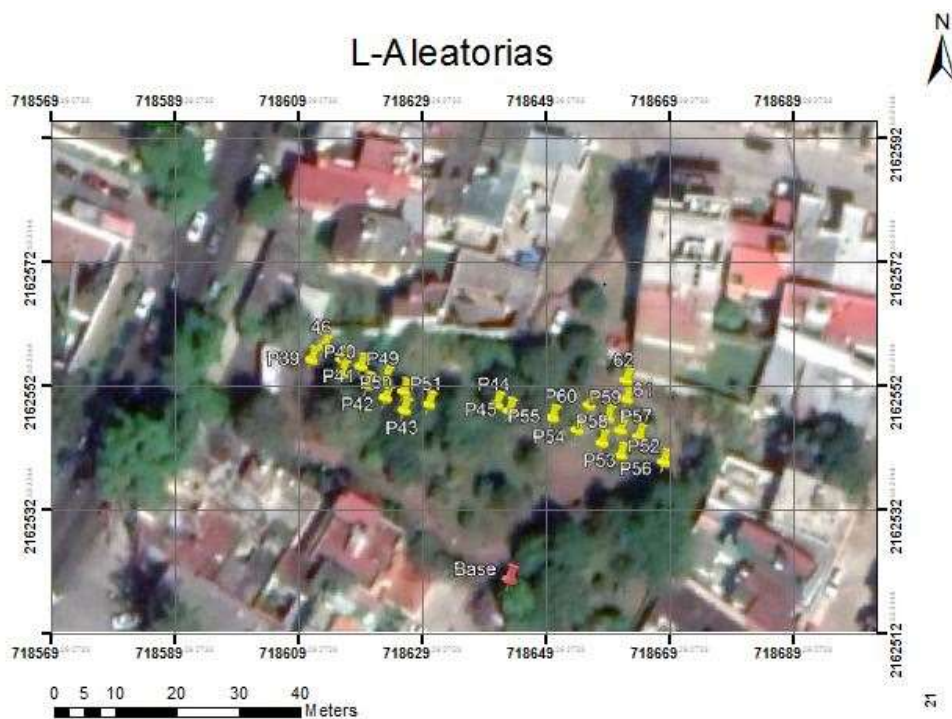


Figura 4.8. L-Aleatorias. Fuente: Google Earth.



Figura 4.9 L6 Y L7 de puntos gravimétricos. Fuente: Google Earth.



Figura 4.10 L8 de puntos gravimétricos. Fuente: Google Earth.



Figura 4.11 Puntos sobre cima de la cueva. Fuente: Google Earth.

Para finalizar la adquisición de datos gravimétricos se realizó la lectura de un punto fuera del parque (Figura 4.12).



Figura 4.12 P107 afuera del parque de la Orquídea. Fuente: Google Earth.

Los datos obtenidos en campo son valores de aceleración de la gravedad en miligales (mgal); estos valores se colocan en una tabla donde se relacionan con sus respectivas coordenadas UTM. Además, se registra la hora en la que fueron tomados y se calcula la desviación estándar (Tabla 4.2). Con los datos obtenidos se elaboraron 2 tablas, las cuales se encuentran en los anexos 1 y 2.

Tabla 4.2 Lecturas gravimétricas obtenidas el día 23 de agosto de 2019					
Punto	Coordenada N	Coordenada E	Hora	Lectura	Desviación estándar
Base	2162519	14718643	12:23:00	4123.189	0.016
			12:29:04	4123.155	0.016
1	2162522.81	718638.91	12:43:04	4123.147	0.019
			12:45:23	4123.167	0.019
2	2162525.9	718635.63	12:48:47	4123.146	0.017
			12:50:21	4123.137	0.016

<b>3</b>	2162529.39	718631.94	12:53:16	4123.106	0.021
			12:54:57	4123.109	0.018
<b>4</b>	2162532.54	718628.14	12:58	4123.091	0.016
			13:00:35	4123.04	0.016
<b>5</b>	2162535.87	718624.36	13:04:52	4123.124	0.017
			13:06:39	4123.131	0.017
<b>6</b>	2162538.66	718620.59	13:10:25	4123.175	0.021
			13:13:19	4123.198	0.02
<b>7</b>	2162542.07	718616.48	13:15:32	4123.195	0.016
			13:17:06	4123.229	0.02
<b>8</b>	2162545.01	718612.78	13:19:40	4123.211	0.015
			13:21:36	4123.203	0.017
<b>9</b>	2162547.41	718609.22	13:25:40	4123.168	0.015
			13:28:36	4123.179	0.017
<b>10</b>	2162550.38	718605.84	13:30:28	4123.241	0.02
			13:33:21	4123.266	0.017
<b>Base</b>	2162519	14718643	13:37:23	4123.166	0.016
			13:39:36	4123.219	0.017

*Fuente: elaboración propia.*

#### 4.2 Procesamiento de datos gravimétricos

Para comenzar con el procesamiento de los datos obtenidos y obtener los mapas de anomalías gravimétricas es necesario hacer las debidas correcciones, es importante mencionar que, para realizar los cálculos se utilizó Excel.

Como primer paso se obtuvo la altitud de los puntos donde se tomaron las lecturas de gravimetría, para ello se utilizó Google Earth™. Después, se procedió a realizar la corrección por deriva instrumental y los datos obtenidos son expresados en miligales.

En la Red Geodésica Nacional Pasiva se obtuvo el valor de la gravedad absoluta del municipio de Altotonga (Figura 4.13), el cual tiene la estación gravimétrica más cercana al municipio de Xalapa, ya que este último no cuenta con una; el valor

utilizado es: 978107.2320 mGal. Este valor de gravedad absoluta fue utilizado para la obtener el valor de la gravedad observada en cada punto.

**Red Geodésica Nacional Pasiva**

Denominación:	30583	Latitud:	19°43'40.89774" N	Condición de la marca:	BUENA
Estación Geodésica:	Gravimétrica	Longitud:	97°14'49.16760" W	Fecha de establecimiento:	04-01-2006
Dependencia:	INEGI	Gravedad:	978107.2320 mGal	Fecha de medición:	20-08-2015
Entidad federativa:	Veracruz de Ignacio de la Llave	Desv. Estándar del valor de gravedad:	0.0230 mGal	Fecha de verificación:	23-01-2020
Municipio:	Altotonga	Marco Geodésico de Referencia Gravimétrica:	IGSN71	Anomalia del Aire Libre:	139.7170 mGal
Carta Esc. 1:50 000:	E14B26	Clasificación:	Segundo Orden	Anomalia de Bouguer simple:	-97.3480 mGal
Proyecto:	F14D96-K	Corrección Topográfica:	0.1600 mGal	Anomalia de Bouguer completa:	-88.2700 mGal

Figura 4.13 Gravedad absoluta en el municipio de Altotonga, Veracruz. Fuente: INEGI.

Una vez obtenidos los valores de la gravedad observada, se realizaron más correcciones a estos valores como la gravedad teórica, corrección atmosférica, corrección de aire libre y finalmente, la corrección de Bouguer, utilizando las fórmulas descritas en el marco teórico de esta tesis.

Mediante las correcciones hechas a las lecturas gravimétricas se pueden obtener los valores de la anomalía de aire libre y la anomalía de Bouguer (Tabla 4.3).

Tabla 4.3 correcciones que se le realizaron a los datos para obtener la anomalía de Bouguer. Fuente: elaboración propia.

Punto	X	Y	Elevación	Anomalía de Aire libre	Anomalía de Bouguer
<b>Base</b>	19.5455056	96.9161029	1448.33	0	0
<b>1</b>	19.545534	-96.91615	1448.628052	0.069330921	0.035971056
<b>2</b>	19.54557	-96.916172	1448.628052	0.049214235	0.01585437
<b>3</b>	19.545602	-96.916207	1448.629028	0.011253613	-0.022215548
<b>4</b>	19.545631	-96.916243	1448.844727	0.031822179	-0.025789317
<b>5</b>	19.545661	-96.916279	1448.5	-0.01692986	-0.035957348
<b>6</b>	19.545687	-96.916314	1448.531494	0.047774574	0.025222064
<b>7</b>	19.545718	-96.916353	1448.5	0.059381992	0.040354504
<b>8</b>	19.545745	-96.916388	1448.5	0.050847987	0.031820499
<b>9</b>	19.545767	-96.916421	1448.5	0.013403321	-0.005624167
<b>10</b>	19.545794	-96.916453	1448.6	0.120729231	0.090509103

En el software Surfer 11, se genera un archivo en formato binario, el cual incluye las coordenadas de los puntos en que se tomaron las lecturas gravimétricas, su altitud y el valor de la anomalía de Bouguer, posteriormente, haciendo uso del software Oasis Montaj™ se importa este archivo y se genera el mapa de anomalía de Bouguer (Figura 4.14), al cual se le aplicaron filtros como la primera, segunda derivada vertical y la primera derivada horizontal, esto para resaltar diferentes características de ellos y cuyos valores se ven reflejados en una base de datos (figura 4.15).

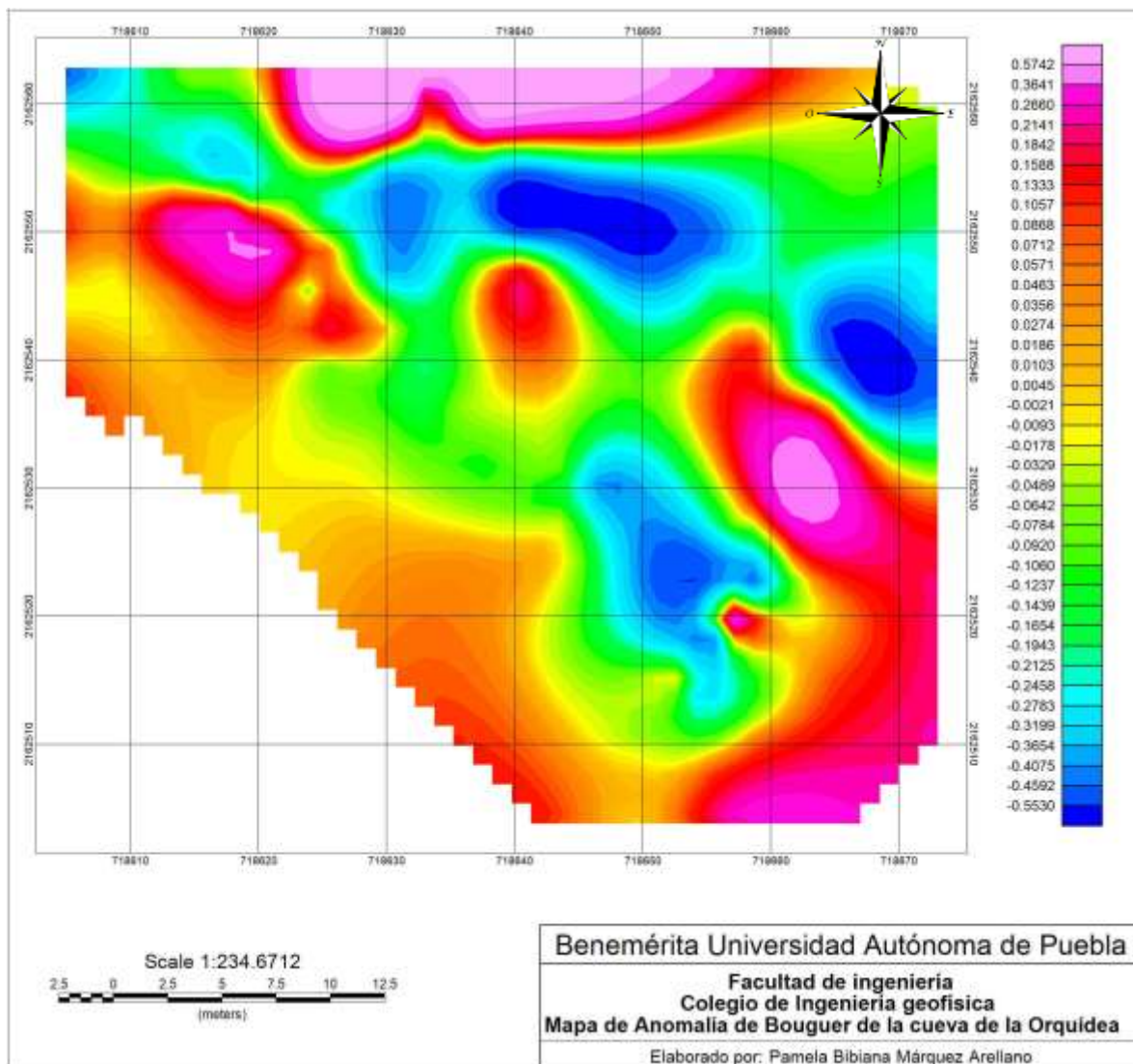


Figura 4.14 Mapa de anomalía de Bouguer. Fuente: elaboración propia utilizando el software Oasis Montaj.

✓ D0:0	X	Y	Y	AnonaliaA	AnonaliaB	Primeraderivadavertical	aderivadavderivadhor	derivadhor
0.00								
1.0718638		2162522	0.069330920973991	0.035971055986452		-0.02	-0.01	-0.03
2.0718636		2162526	0.049214235088432	0.015054370100893		-0.00	0.00	-0.00
3.0718632		2162529	0.011253613462919	-0.022215547654217		-0.00	0.00	0.00
4.0718628		2162533	0.031822178763542	-0.025789316558713		-0.01	-0.00	-0.01
5.0718624		2162536	-0.016929859616672	-0.03595734761668		-0.01	-0.00	0.01
6.0718621		2162539	0.047774573618342	0.025222064384103		0.00	-0.00	0.03
7.0718616		2162542	0.059381992374606	0.040354504374598		0.01	0.01	-0.03
8.0718613		2162545	0.05084798718289	0.031820499182882		-0.02	-0.01	0.02
9.0718609		2162547	0.013403320933765	-0.0056241670662435		0.02	0.01	0.01
10.0718606		2162550	0.12072923121909	0.090509103219097		0.03	0.01	-0.04
11.0718610		2162555	-0.094094926560332	-0.11312241456034		-0.07	-0.03	0.04
12.0718613		2162552	0.26674816704626	0.21572218605458		0.05	0.02	0.05
13.0718617		2162548	0.39997720991449	0.28776881134968		0.02	-0.00	-0.00
14.0718621		2162545	0.26598826612694	0.17259366567926		0.04	0.01	-0.01

Figura 4.15 Base de datos hecha con el software Oasis Montaj. Fuente: elaboración propia utilizando el software Oasis Montaj.

### 4.3 Adquisición de datos con georadar

En el mes de septiembre del 2019 se realizó otra visita al Parque de la Orquídea para la adquisición de datos con georadar. Para ello, se utilizó una antena monoestática de 300 MHz, una batería como fuente de energía para la antena, una computadora portátil para visualizar los radargramas y cintas métricas para trazar y medir la distancia de los perfiles (Figura 4.16, Figura 4.17). En la tabla 4.3 se desglosa el equipo necesario para realizar la exploración con georadar.



Figura 4.16 Equipo de GPR con antena de 300 MHz. Foto tomada por: Ortigoza J., sep. 2019



Figura 4.17 Adquisición de datos con georadar. Foto tomada por: Sieron K., sep. 2019.

Tabla 4.4 Equipo para el levantamiento con georadar.

Cantidad	Descripción
1	Antena de 300 MHz
2	Cintas de 50 metros
2	Baterías
1	GPS

Fuente: elaboración propia.

Dentro del parque de la Orquídea se tomaron 29 perfiles sin contar los del interior de la cueva, todos los perfiles fueron tomados en una sola dirección, pero en dos sentidos: toward y backward (reversa), en las líneas 1-9 y 16 (Figura 4.18) el sentido de toward fue de NO-SE teniendo como contrario el sentido de backward, SE-NO; mientras que en las líneas H1-H7 el sentido de toward fue SO-NE.

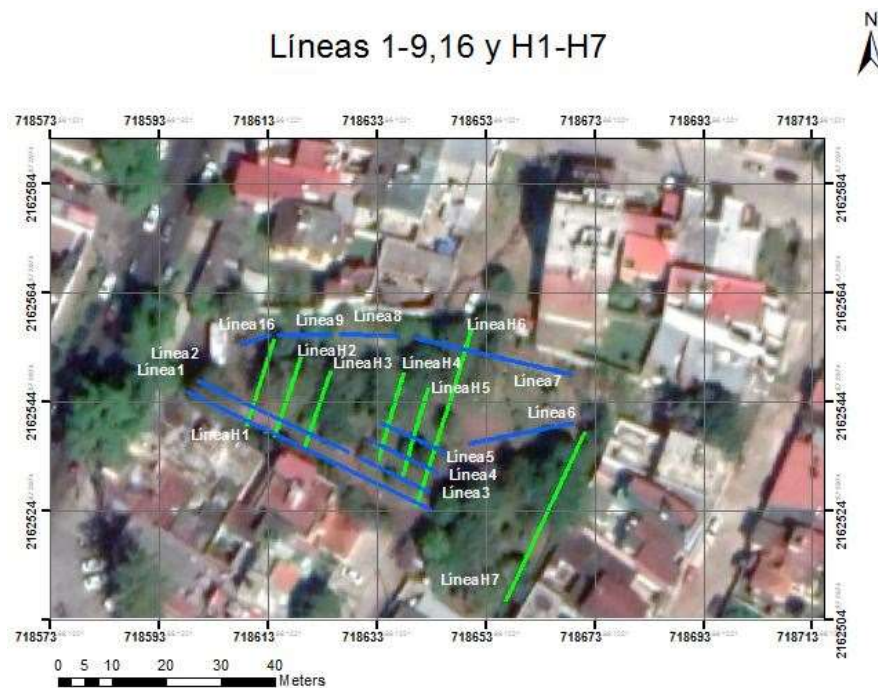


Figura 4.18 Perfiles 1-9 y H1-H7 con georadar. Fuente: Google Earth.

Respecto a las líneas 10, 11 y 14 el sentido toward fue NE-SO, en las líneas 9 y 12, toward fue tomado de Oeste a Este, en la línea 13 toward tuvo el sentido de SE-NO y finalmente en la línea 15 fue tomada de SE-NO (Figura 4.19).



Figura 4.19 Perfiles con georadar en las partes altas del parque de la Orquídea. Fuente: Google Earth.

En el exterior al parque de la cueva se realizaron 6 perfiles con el georadar, 5 de ellos con una longitud de 50 metros, y el sexto con una longitud de 100 metros (Figura 4.20 y Figura 4.21); el sentido toward de las líneas 17,19, 20 y 21 fue NE-SO, mientras que el de las líneas 18 y 22 fue SO-NE.

## Líneas 17 - 22 con georadar

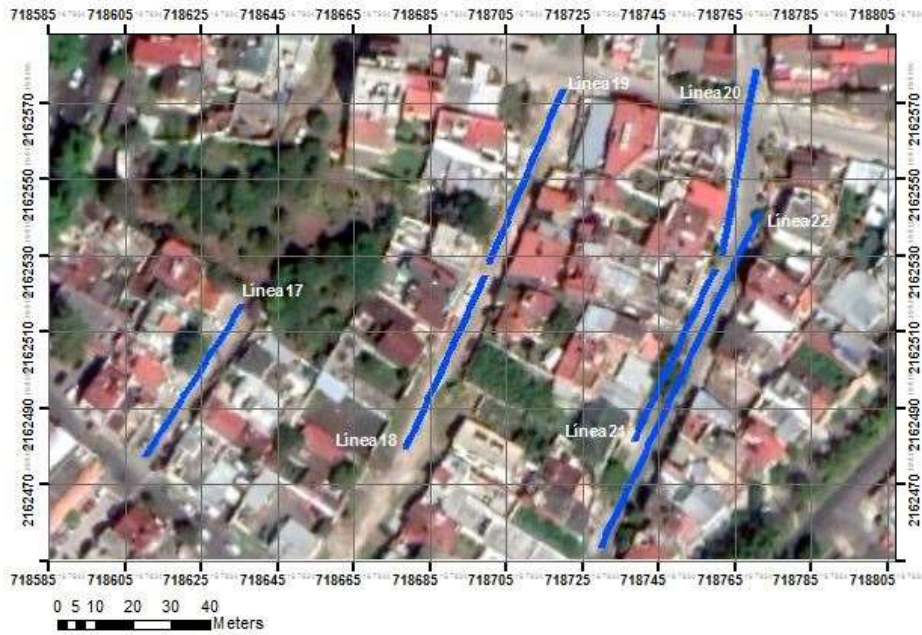


Figura 4.20 Líneas 17-22 con georadar. Fuente: Google Earth.



Figura 4.21 Adquisición de datos con el georadar en el exterior del parque de la cueva de la Orquídea. Foto tomada por: Sieron K., sep. 2019.

Mientras que en el interior de la cueva se realizaron 4 perfiles (Figura 4.22 y Figura 4.23). Para la líneacueva1 el sentido toward fue de O-E, para la líneacueva2 fue de N-S, para la líneacueva3 el sentido fue NE-SO y finalmente para la líneacueva4 el sentido fue SO-NE.



Figura 4.22 Adquisición de datos con el georadar en el interior de la cueva de la Orquídea. Foto tomada por: Márquez P., sep. 2019.

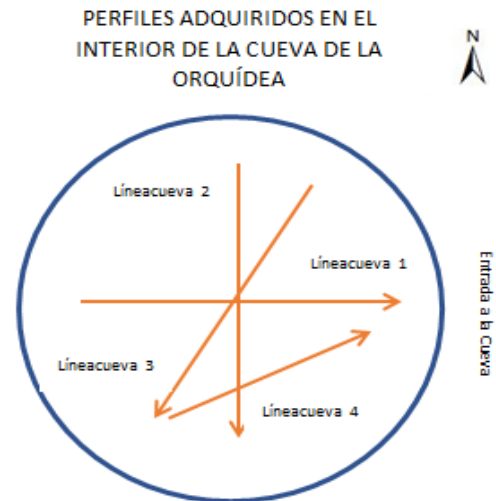


Figura 4.23 Perfiles adquiridos con el georadar en el interior de la cueva de la Orquídea. Fuente: elaboración propia

Dentro del parque ecológico Macuiltépetl se tomaron 5 perfiles de 50 metros cada uno (Figura 4.24), el sentido toward de todos ellos fue NE-SO.

## Zona volcán

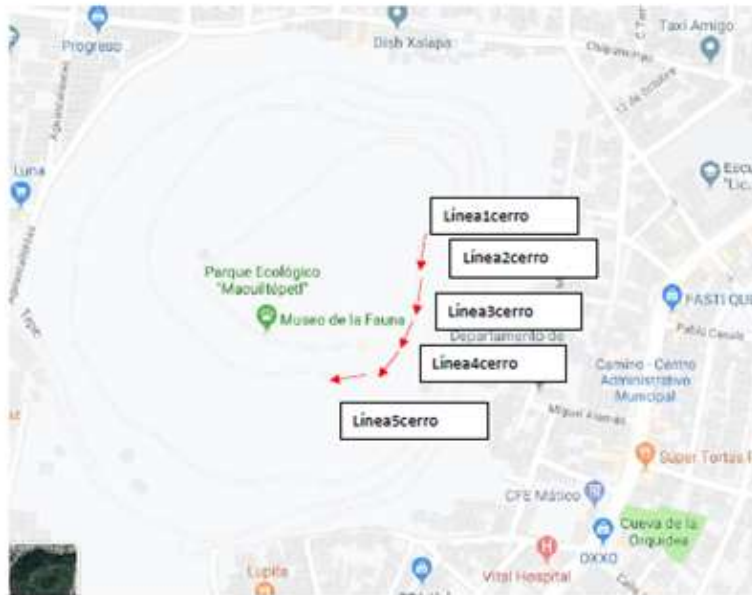


Figura 4.24 Lecturas con georadar en volcán Macuiltépetl. Fuente: Google maps.

Los datos obtenidos con el georadar son reflejados en radargramas mediante una computadora portátil (Figura 4.25).



Figura 4.25 Visualización de datos obtenidos con el georadar. Foto tomada por: Sieron K., sep. 2019.

#### 4.4. Procesamiento de datos con georadar

Después de haber realizado los recorridos con el georadar, se obtuvieron los radargramas, a los cuales se les aplicó con el programa Prism2d, la herramienta de “Eliminación de ruido de fondo”, también se utilizó la “Corrección dinámica” para compensar los efectos ocasionados por el retraso en los tiempos de llegada de la reflexión, se ajustó la frecuencia de la antena utilizada que fue de 300 MHz. Finalmente, con la herramienta Time-depth conversion se obtiene el radargrama en el dominio de la distancia como se puede observar en la figura 4.28.

En la figura 4.26 se puede observar uno de los radargramas obtenidos antes de las correcciones, mientras que en la figura 4.27 se puede visualizar el mismo radargrama, pero con las correcciones aplicadas.

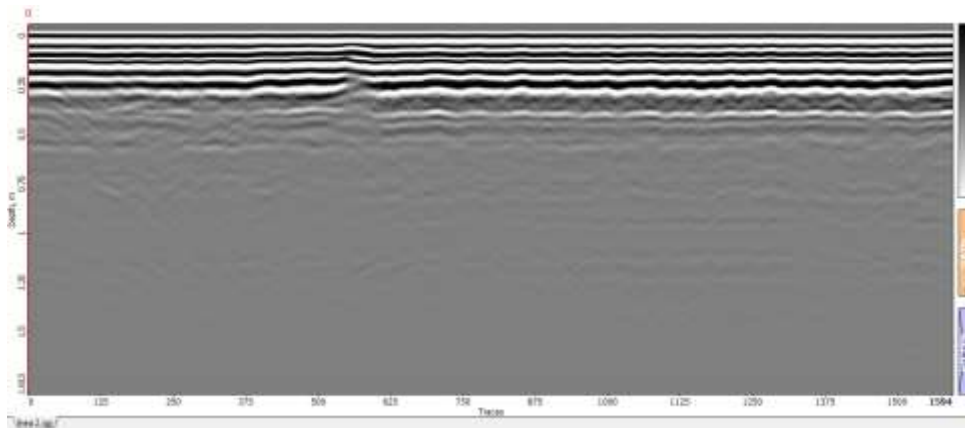


Figura 4.26 Radargrama de la línea 2 antes de aplicarle background removal y moveout correction con el software Prism2d.

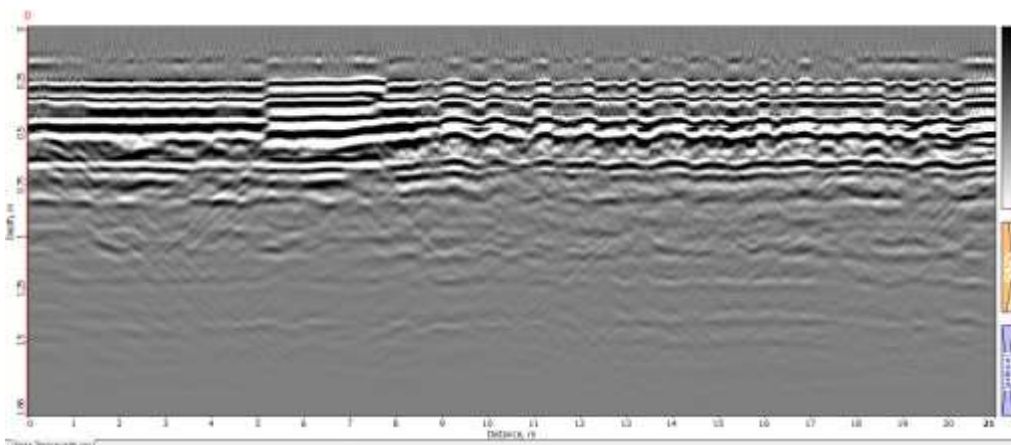
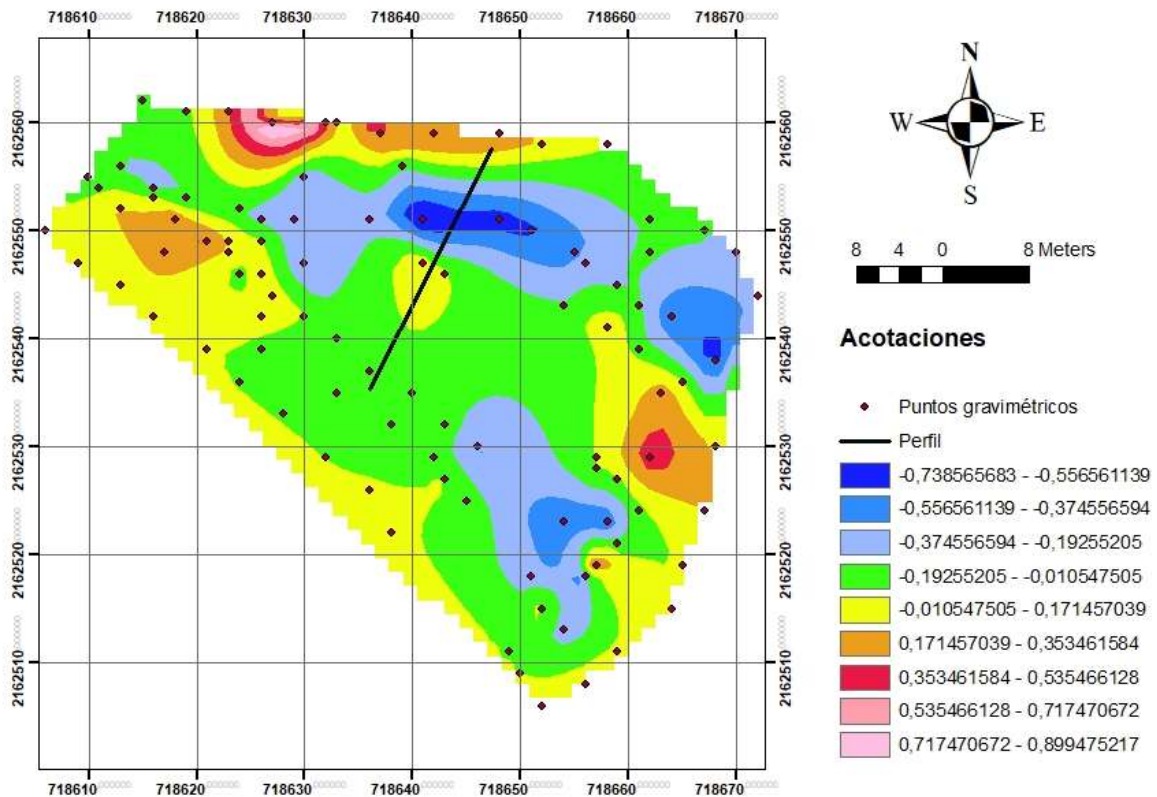


Figura 4.27 Radargrama de la línea 2 filtrado.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Resultados del método gravimétrico

Como resultado del procesamiento de datos gravimétricos se obtuvieron diversos mapas utilizando diferentes programas, en la figura 5.1 se puede observar el resultado de los datos en un mapa elaborado con Arcmap, en él se ven reflejados los diferentes valores de la anomalía de Bouguer, en tonalidades azules, verdes y amarillas se encuentran las zonas con anomalías gravimétricas negativas, al contrario de las zonas con tonalidades naranjas, rojas y rosadas. La línea negra que se encuentra sobre este mapa es un perfil que fue trazado sobre una zona que contiene un bajo gravimétrico.



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
Facultad de Ingeniería  
Colegio de Ingeniería geofísica  
Perfil obtenido del mapa de la anomalía de Bouguer de la Cueva de la Orquídea  
Elaborado por: Pamela Bibiana Márquez Arellano

Figura 5.1 Mapa de la anomalía de Bouguer del Parque de la Cueva de la Orquídea con ArcMap. Fuente: elaboración propia.

Con el software GravMag se realizó un modelamiento aproximado de la cueva, en la Figura 5.3 se observan en la parte superior dos curvas, una que señala los puntos con triángulos que son los datos de gravedad que fueron observados en el mapa de anomalía de Bouguer, y otra curva que fue realizada con la gravedad calculada la cual había que ajustar para que se acoplara con la curva de gravedad observada, este software utiliza el contraste de densidades para el modelamiento por esta razón en la parte inferior de la imagen se añadió un cuerpo de color azul de una densidad negativa, en este caso  $-2.6 \text{ g/cm}^3$ , ya que si se le suma la placa de Bouguer cuyo valor es de  $2.6 \text{ g/cm}^3$  (valor de densidad de la corteza terrestre) da como resultado 0 debido a que una cueva no tiene densidad si la comparamos con el medio que la rodea, respecto a las dimensiones, a través de una foto del interior de la cueva (Figura 5.2) y con la exploración previa de la cueva se calcularon sus dimensiones, y para el modelo realizado en GravMag, en la base se utilizó un valor de 12 metros de ancho, en el techo un valor de 5 metros y de alto de 15 a 17 metros; a los alrededores de este cuerpo que se está simulando es la cueva, se colocaron cuerpos con valores de densidad diferentes, por ejemplo, los cuerpos cafés tienen una densidad de  $0.3 \text{ g/cm}^3$  y los cuerpos negros una densidad de  $0.4 \text{ g/cm}^3$  que al sumarlos la placa de Bouguer dan como resultado densidades de  $2.9 \text{ g/cm}^3$  y  $3 \text{ g/cm}^3$  aproximadas a la del basalto, ya que este material es parte de la geología del lugar, y la variación en su valor de densidad puede deberse a la meteorización que ha afectado a esta roca.



*Figura 5.2 Cueva a la que se obtuvo acceso en el Parque de la cueva de la Orquídea.*

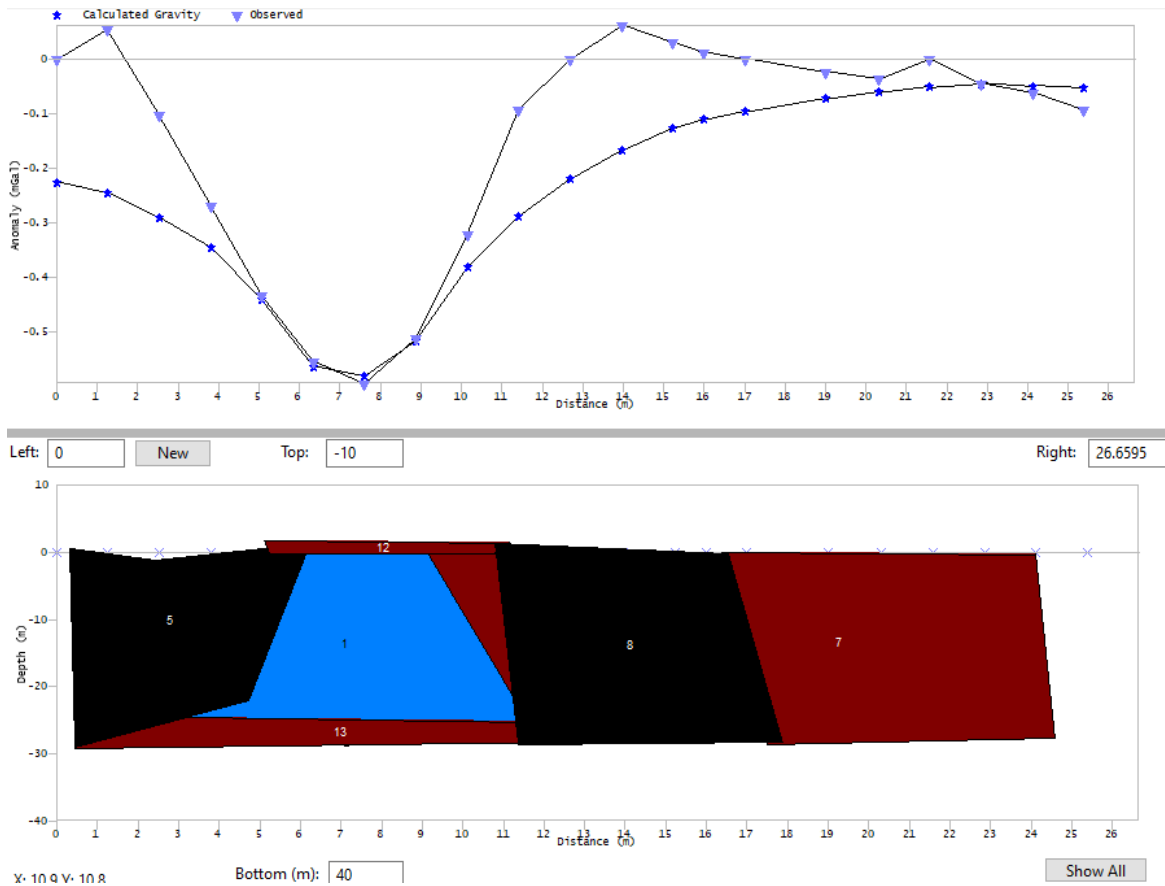


Figura 5.3 Modelo de la anomalía elaborado en GravMag. Fuente: elaboración propia.

El error obtenido en el anterior modelamiento fue de 0.1349 Miligales. En conclusión, un cuerpo que no tiene densidad, en este caso una cueva, genera una anomalía de Bouguer negativa, y esta herramienta es la que se utilizó para localizar las cavidades en los mapas que a continuación se presentan.

Después de haber realizado este análisis y haber comprendido la importancia que tienen las zonas con bajos gravimétricos dentro del parque de la Cueva de la Orquídea, se realizaron otros mapas utilizando el software de Oasis Montaj, uno de ellos fue el mapa de anomalía de Bouguer (Figura 5.4) en el cual se puede observar que las partes azules nos indican mínimos de gravedad, y que tienen una tendencia NO-SE; comparados con las partes rojas y rosadas que tienen valores mayores gravimétricos. Las zonas azules coinciden con las partes en donde se pudieron observar las cavidades, la zona señalada con el círculo rojo coincide con

el área de la cueva a la que se pudo acceder, mientras que la zona señalada con el círculo verde indica la zona en donde se encuentra la parte en donde entraba la luz a la cueva, encerradas en un círculo morado se puede observar la presencia de posibles extensiones de la cueva.

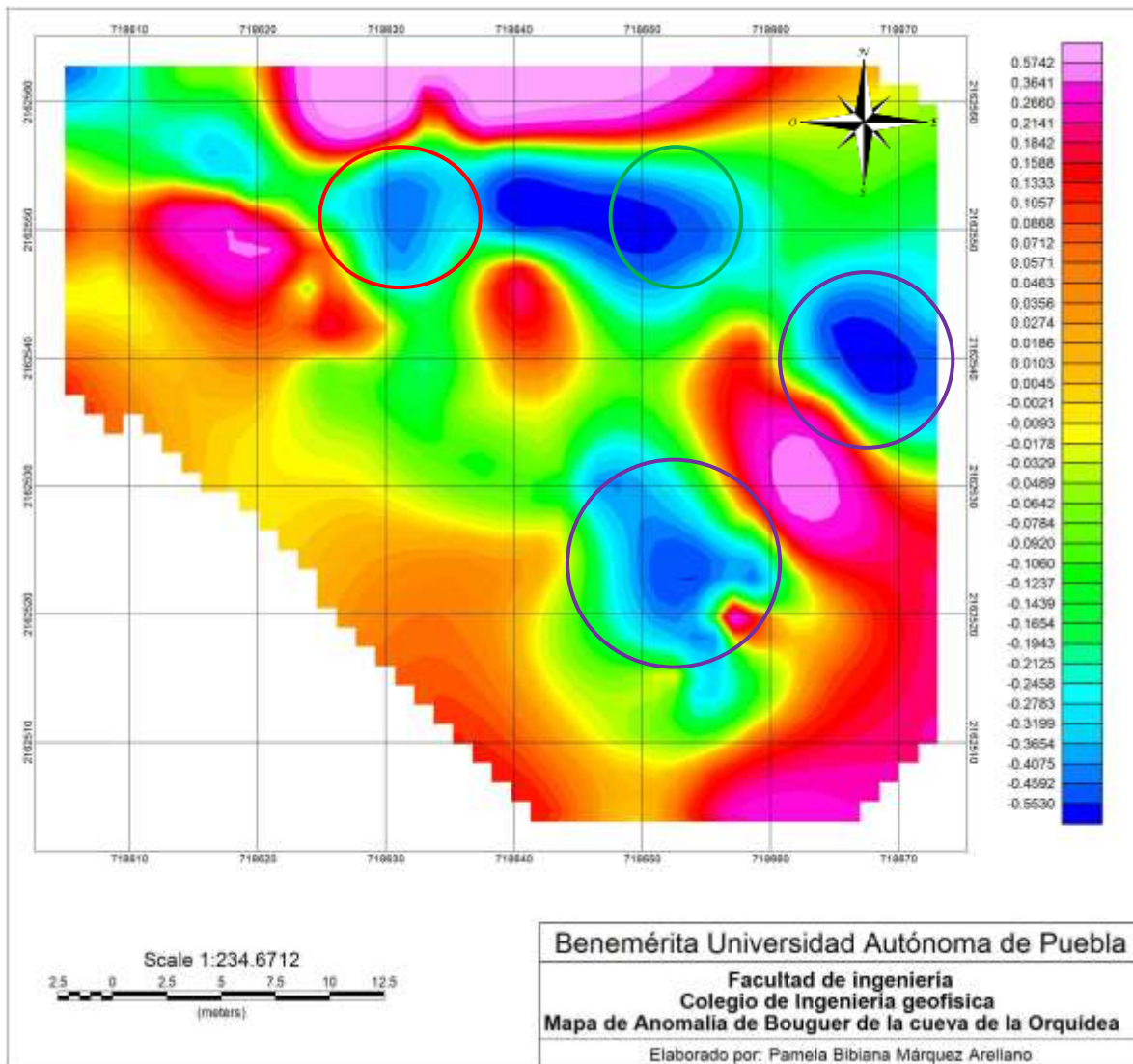


Figura 5.4 Mapa de anomalía de Bouguer del Parque de la Cueva de la Orquídea. Fuente: elaboración propia.

Al mapa de la anomalía de Bouguer se le aplicó la primera derivada vertical y se obtiene un mapa de anomalías residuales (Figura 5.5), como ya se mencionó anteriormente, este filtro permite acentuar las anomalías de alta frecuencia espacial ocasionadas por fuentes someras, y debido a ello, en el mapa se puede

observar el contraste entre valores máximos, señalados con colores cálidos y valores negativos con tonalidades azules y verdes, los cuales son los mínimos de gravedad. En el extremo noroeste del mapa aparece un mínimo de gravedad al cual se le puede atribuir a una posible cavidad. La primera zona señalada en el NO del mapa con el círculo rojo es la cueva a la que se pudo acceder, comparándola con la imagen del Parque de la Cueva de la Orquídea que se obtuvo con dron, se observa que coincide, mientras que la segunda zona señalada con el círculo morado se infiere que es el lugar en el cual se encontraba el mirador hacia el interior de la cueva, y de la misma manera en la Figura 5.6 se puede observar que coincide con esta zona.

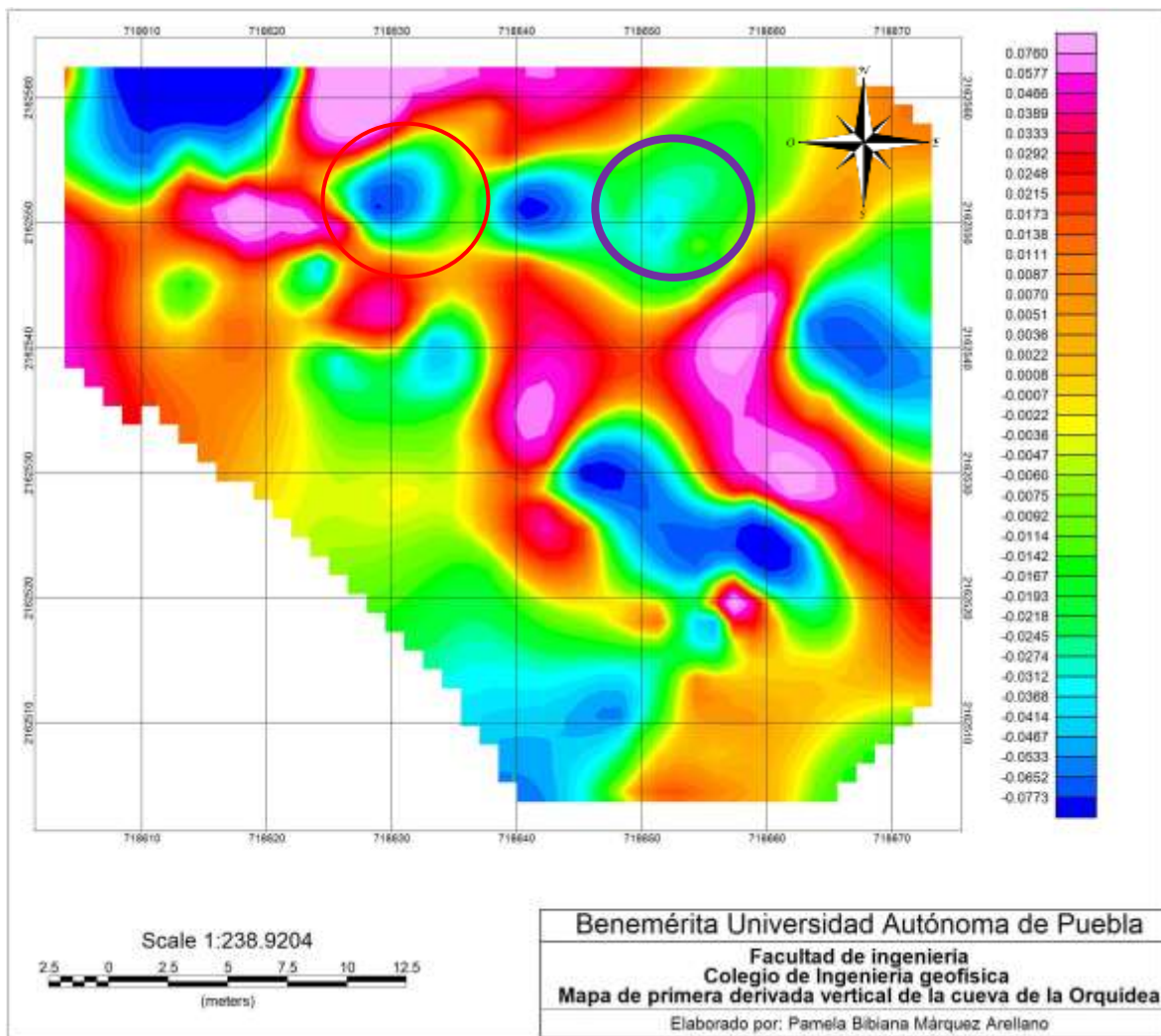


Figura 5.5 Mapa de la primera derivada vertical del Parque de la Cueva de la Orquídea. Fuente: elaboración propia.



*Figura 5.6 Imagen obtenida con dron del Parque de la Cueva de la Orquídea.*

Respecto al mapa de la segunda derivada vertical (Figura 5.7) los contornos de los bajos gravimétricos se definen aún más, junto al bajo gravimétrico que se encontraba en el extremo NO del mapa de la primera derivada aparecen otras dos pequeñas áreas con valores negativos, en el centro del mapa se puede observar la aparición de otros dos bajos gravimétricos; como se mencionó anteriormente, la segunda derivada acentúa las anomalías más someras y más pequeñas, marca los contactos entre esos cuerpos superficiales.

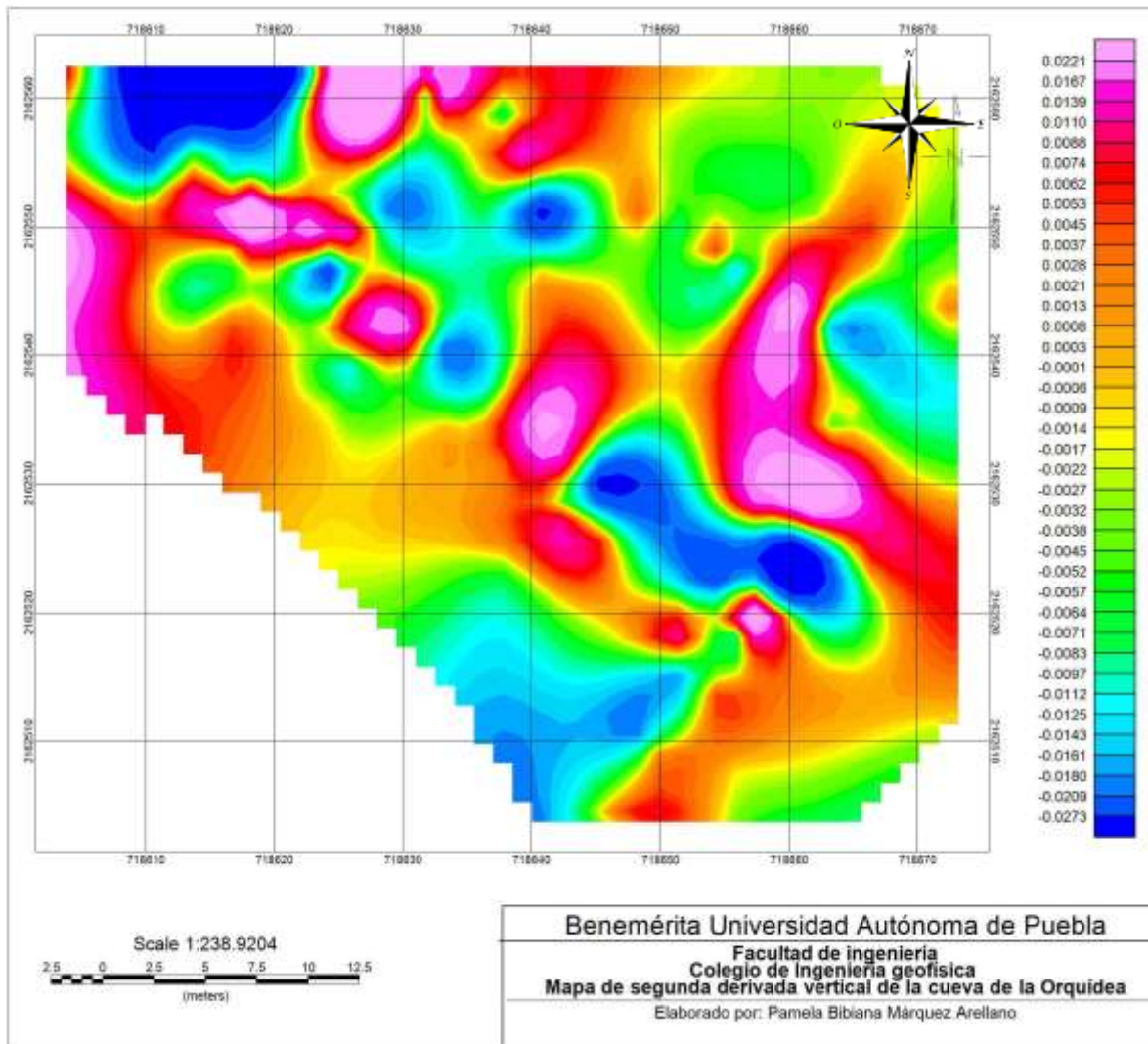


Figura 5.7 Mapa de la segunda derivada vertical del Parque de la Cueva de la Orquídea. Fuente: elaboración propia.

## 5.2 Resultados del método con georadar

Como resultado del procesamiento de los radargramas en el programa Prism2 se obtuvo una mejor visualización de las reflexiones, la mayoría de los radargramas resultantes de perfiles realizados en los pasillos del parque de la Cueva de la Orquídea no mostraron alguna anomalía de interés, sin embargo, hay radargramas en los cuales se observan reflexiones hiperbólicas lo cuales son indicativos de que existen oquedades en esa zona. En los radargramas que se realizaron en calles exteriores al parque de la Cueva de la Orquídea, se observaron hipérbolas de una amplitud significativa, que de igual manera se pueden atribuir a la presencia de cuevas.

### 5.2.1 Líneas con georadar dentro del Parque de la Cueva de la Orquídea

Se realizaron 23 perfiles con georadar dentro del parque de la Cueva de la Orquídea, de los cuales los radargramas de las líneas 2, 10, 12, 14, 16, H2, H3, H4 y H5 presentaron reflexiones de interés para uno de los objetivos de este trabajo de investigación que es la localización de oquedades, los radargramas de las líneas que no se encuentran en este apartado se pueden visualizar en anexos D.

En el radargrama de la línea 2 (figura 5.9) se puede observar que la profundidad máxima de alcance de investigación fue de 1.8 metros, la línea punteada señala la presencia de una hipérbola, la cual se le atribuye a la presencia de una oquedad.



Figura 5.8 Línea 2 obtenida con georadar. Fuente: elaboración propia.

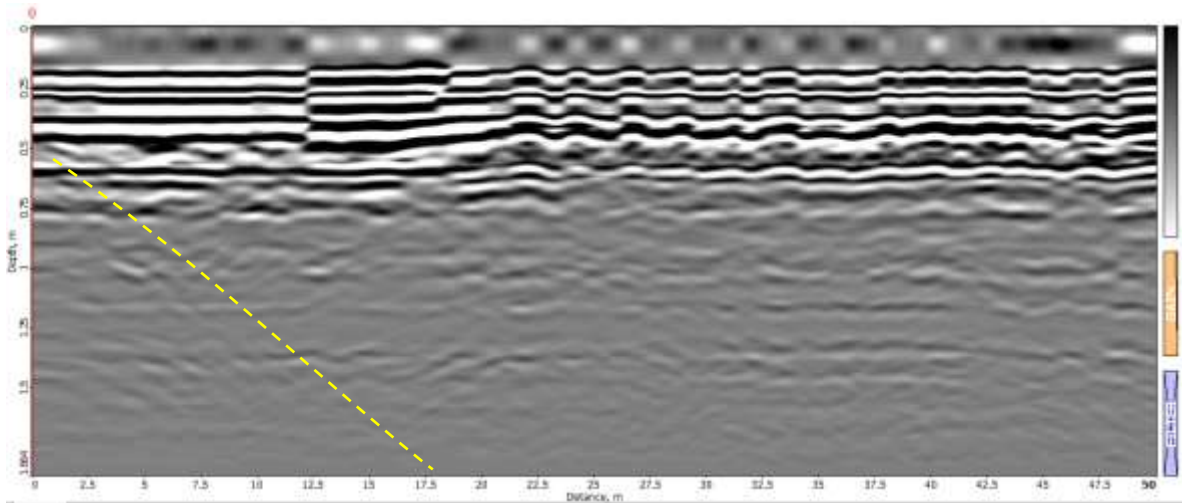


Figura 5.9 Radargrama de la línea 2 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.

En el radargrama de la línea 10 (figura 5.11) se puede observar que la profundidad máxima de alcance de investigación fue de 7.4 metros, la línea punteada señala la presencia de una hipérbola, la cual se le atribuye a la presencia de una oquedad.



Figura 5.10 Línea 10 obtenida con georadar. Fuente: elaboración propia.

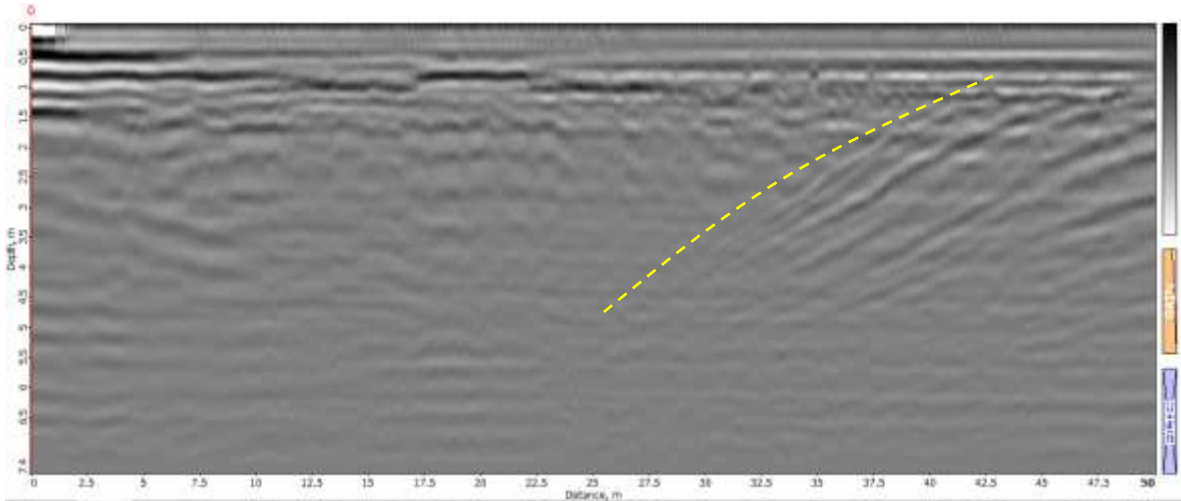


Figura 5.11 Radargrama de la línea 10 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.

En el radargrama de la línea 12 (figura 5.13) se puede observar la presencia de una hipérbola señalada con una línea amarilla punteada, la cual indica que en esa zona existe una oquedad.



Figura 5.12 Línea 12 obtenida con georadar. Fuente: elaboración propia.

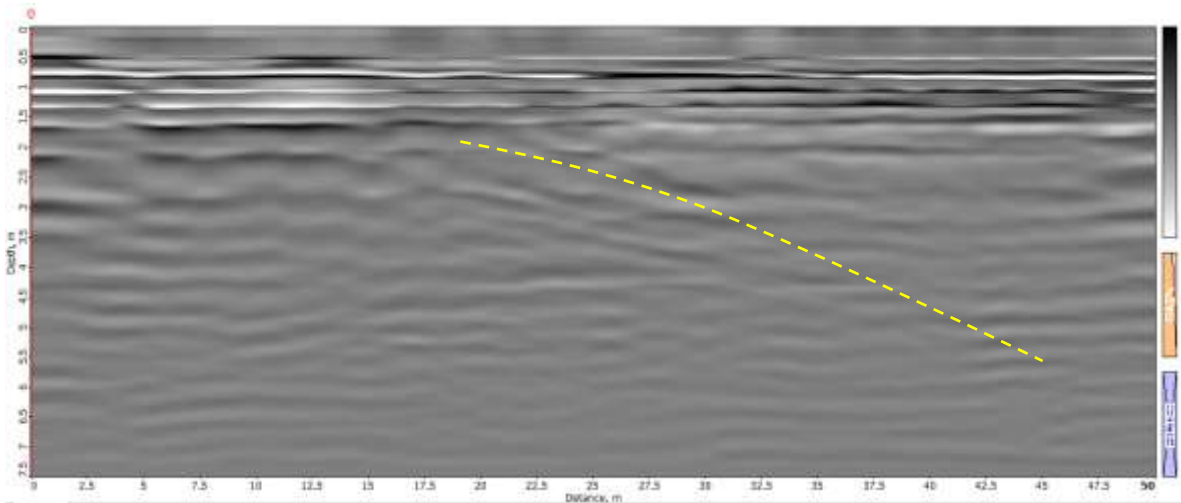


Figura 5.13 Radargrama de la línea 12 obtenida con georadar con una antena de 300MHz.

En el radargrama de la línea 14 (figura 5.15) se puede observar la presencia de una hipérbola señalada con una línea amarilla punteada, la cual indica que en esa zona existe una oquedad.



Figura 5.14 Línea 14 obtenida con georadar. Fuente: elaboración propia.

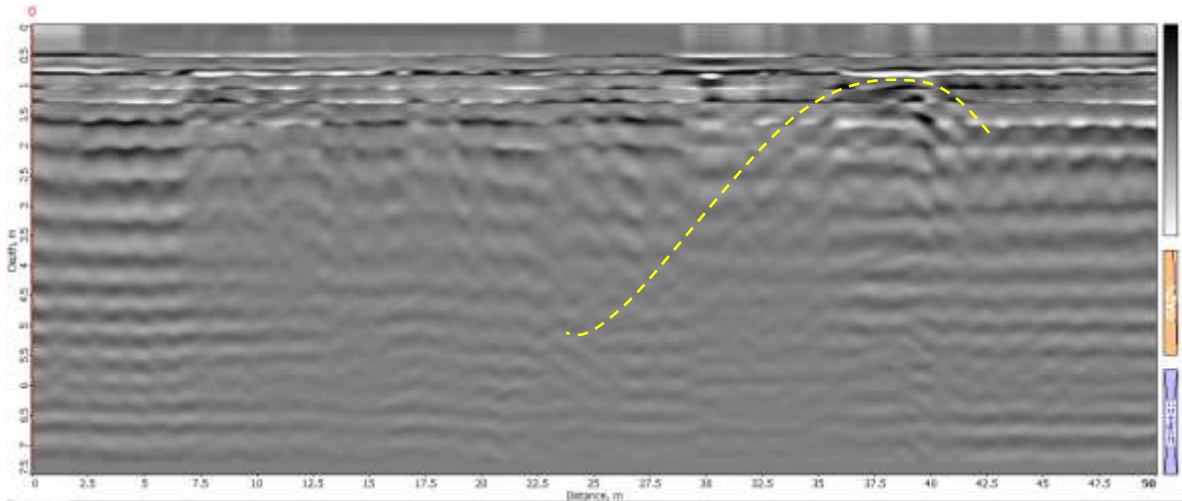


Figura 5.15 Radargrama de la línea 14 obtenida con georadar con una antena de 300MHz.

En el radargrama de la línea 16 (figura 5.17) se puede observar la presencia de una hipérbola señalada con una línea amarilla punteada, la cual indica que en esa zona existe la posible presencia de una oquedad.



Figura 5.16 Línea 16 obtenida con georadar. Fuente: elaboración propia.

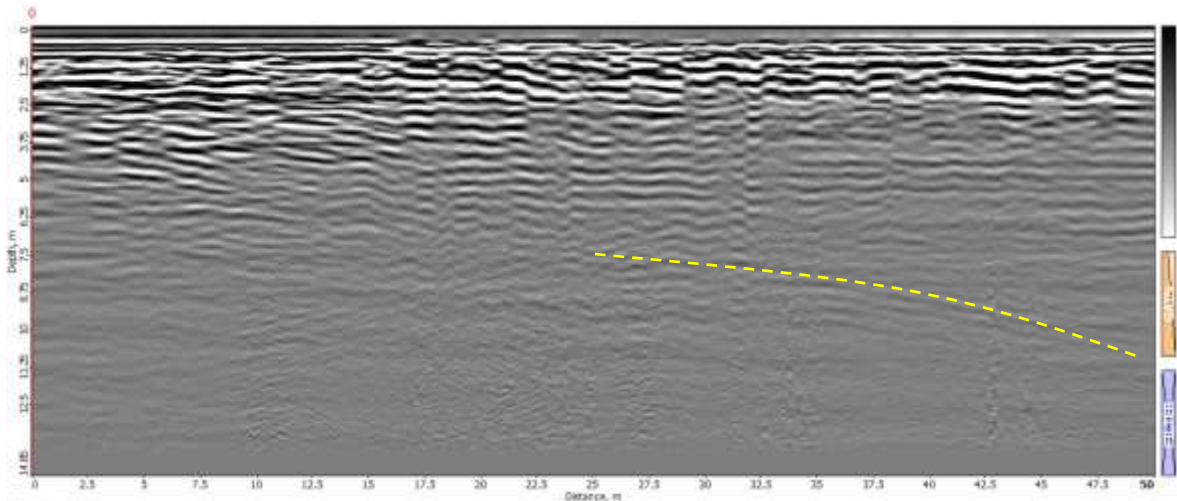


Figura 5.17 Radargrama de la línea 16 obtenida con georadar con una antena de 300MHz.

Los perfiles H2-H5 presentaron cambios en la inclinación de los estratos y presencia de material menos consolidado, también la existencia de hipérbolas asociadas a oquedades.

El radargrama de la línea H2 (figura 5.19) muestra cambios en la inclinación de los estratos, en las zonas punteadas se puede observar la presencia de reflexiones en forma de hipérbolas que se atribuyen a la presencia de oquedades.



Figura 5.18 Línea H2 obtenida con georadar. Fuente: elaboración propia.

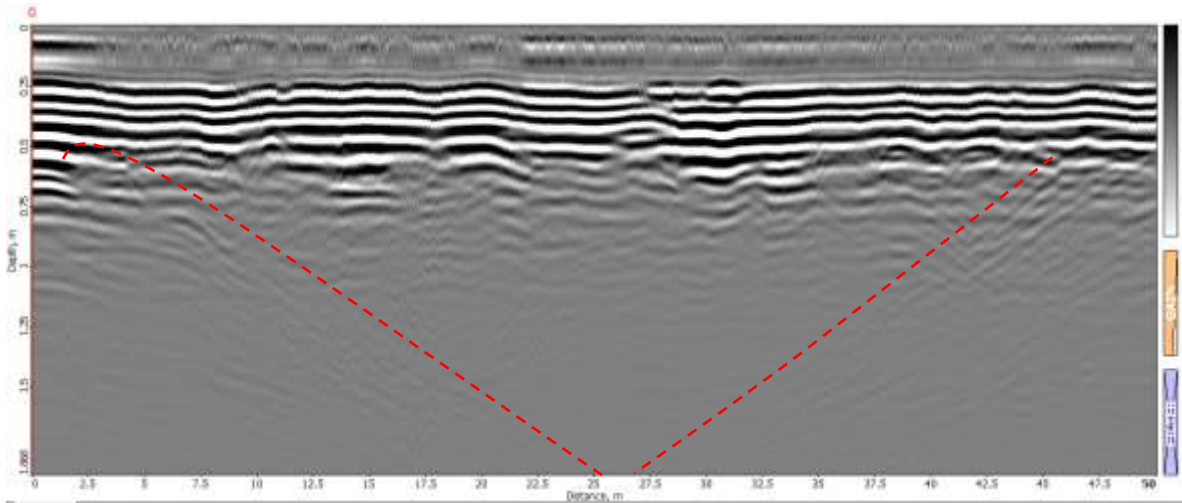


Figura 5.19 Radargrama de la línea H2 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.

El radargrama de la línea H3 (figura 5.21) muestra cambios en la inclinación de los estratos, también el levantamiento de ellos, y zonas con material poco consolidado, la línea punteada señala una hipérbola de gran tamaño a la cual se le atribuye la presencia de una oquedad.



Figura 5.20 Línea H3 obtenida con georadar. Fuente: elaboración propia.

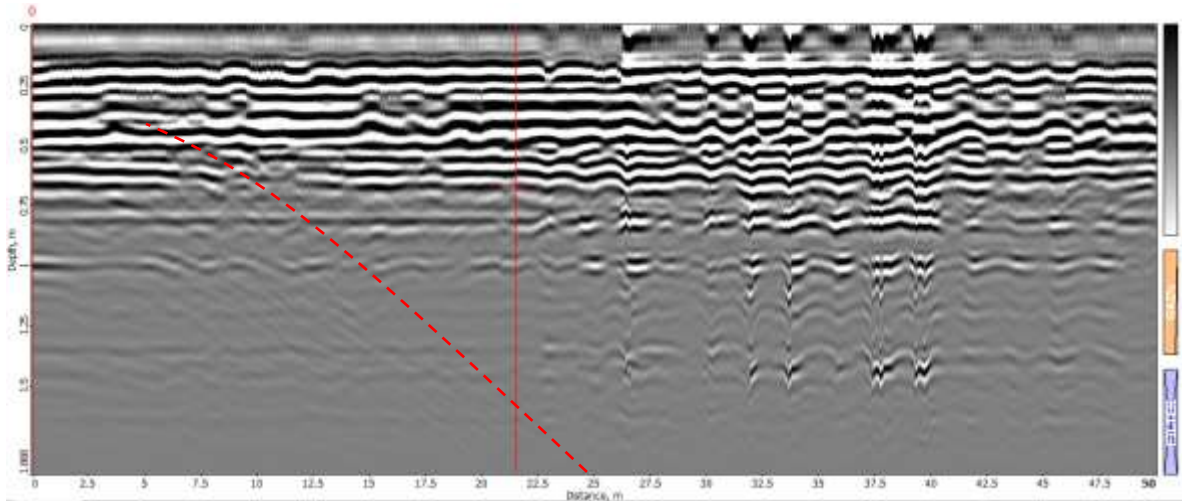


Figura 5.21 Radargrama de la línea H3 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.

El radargrama de la línea H4 (figura 5.23) muestra cambios en la inclinación de los estratos, también el levantamiento de ellos, y zonas con material poco consolidado, la línea roja punteada indica la presencia de una hipérbola, atribuyéndose a la presencia de una oquedad.



Figura 5.22 Línea H4 obtenida con georadar. Fuente: elaboración propia.

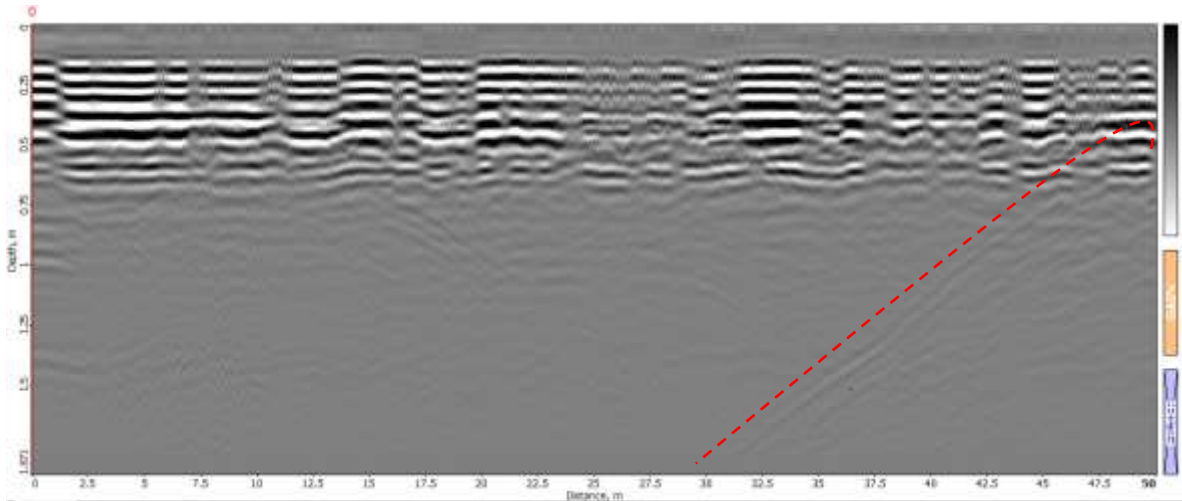


Figura 5.23 Radargrama de la línea H4 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.

La figura 5.25 corresponde al radargrama obtenido de la línea H5 con georadar, se observan levantamientos en el estrato, y material poco consolidado en esas zonas. Hay dos líneas punteadas que señalan la presencia de hipérbolas, una se encuentra señalada por una línea amarilla y se puede observar que es de gran amplitud, la segunda hipérbola señalada con la línea roja no se puede apreciar de manera completa, sin embargo, se infiere que es de un tamaño similar a la otra.



Figura 5.24 Línea H5 obtenida con georadar. Fuente: elaboración propia.

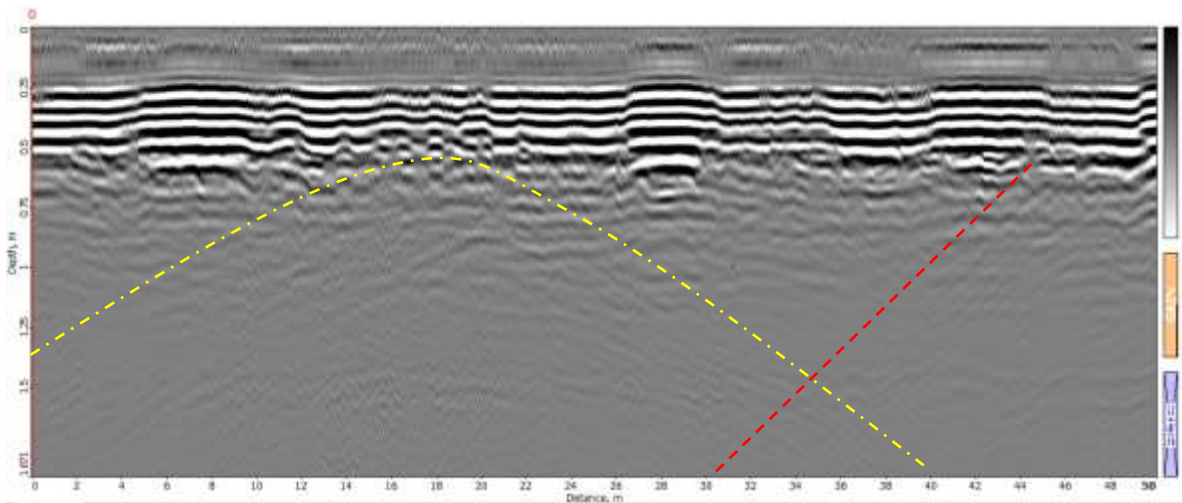


Figura 5.25 Radargrama de la línea H5 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.

### 5.2.2 Líneas externas al parque de la cueva de la orquídea

En los perfiles realizados con georadar en calles paralelas al parque de la cueva de la Orquídea se puede observar que la profundidad de alcance fue de casi 15 metros y cambios en la inclinación de los estratos como en el caso de la línea 17 (figura 5.27), se puede observar la presencia de material menos consolidado como el que está señalado con un círculo.



Figura 5.26 Línea 17 obtenida con georadar. Fuente: elaboración propia.

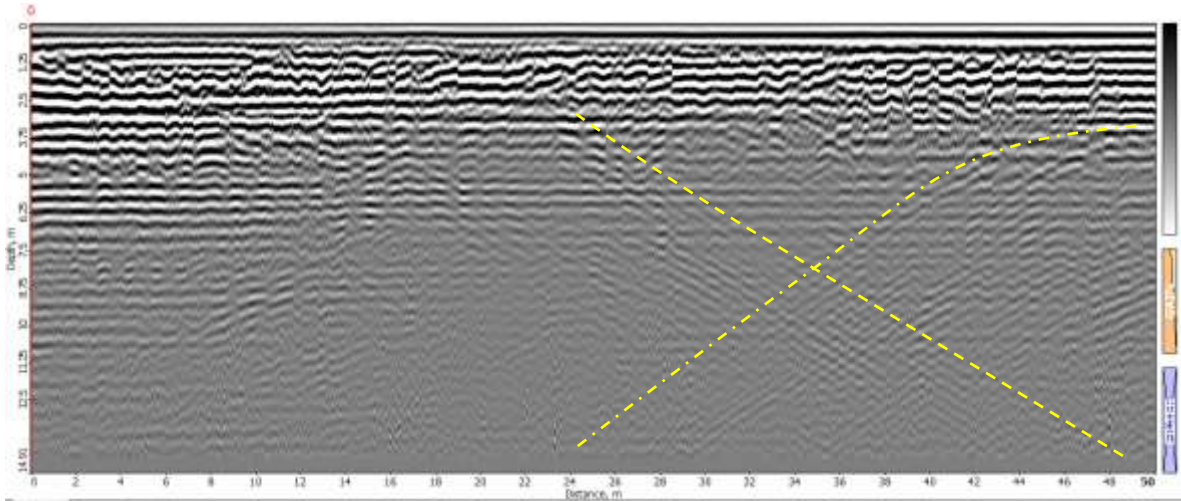


Figura 5.27 Radargrama de la línea 17 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.

En el radargrama de la línea 18 (figura 5.29) se puede observar que existen cambios en la inclinación de los estratos y zonas con material menos consolidado, la línea amarilla señala la presencia de una hipérbola que se atribuye a la presencia de una oquedad.

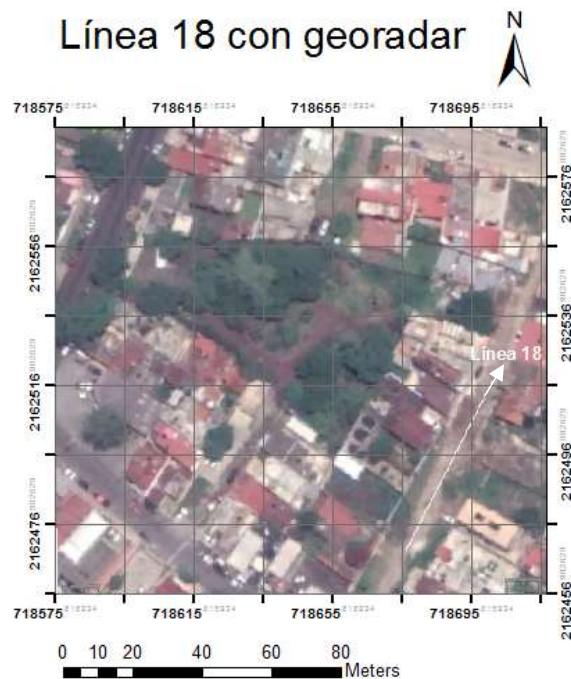


Figura 5.28 Línea 18 obtenida con georadar. Fuente: elaboración propia.

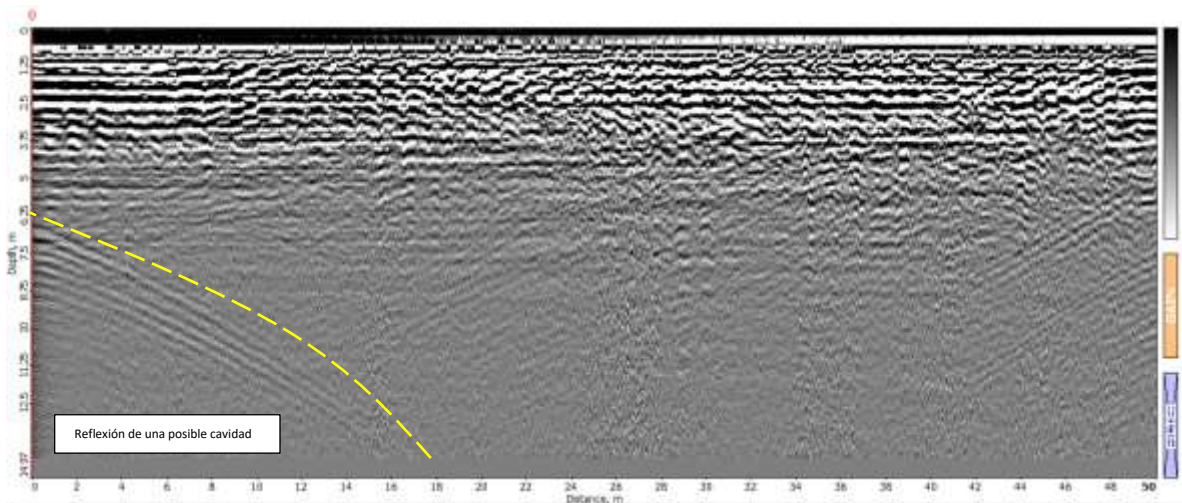


Figura 5.29 Radargrama de la línea 18 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.

En el radargrama de la línea 19 (figura 5.31) se puede observar la presencia de cambios en la inclinación de los estratos, con líneas punteadas se señalan hipérbolas de gran tamaño, las cuales indican la presencia de oquedades.



Figura 5.30 Línea 19 obtenida con georadar. Fuente: elaboración propia.

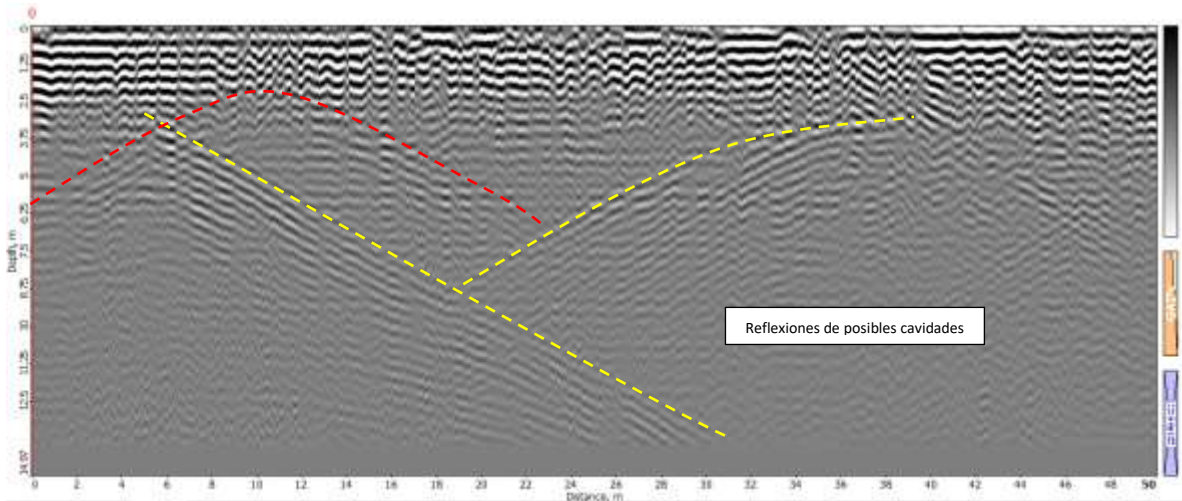


Figura 5.31 Radargrama de la línea 19 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.

En el radargrama de la línea 20 (figura 5.33) se pueden observar muchas anomalías puntuales, inclinación de los estratos y material menos consolidado, teniendo la posible formación de una caverna.



Figura 5.32 Línea 20 obtenida con georadar. Fuente: elaboración propia.

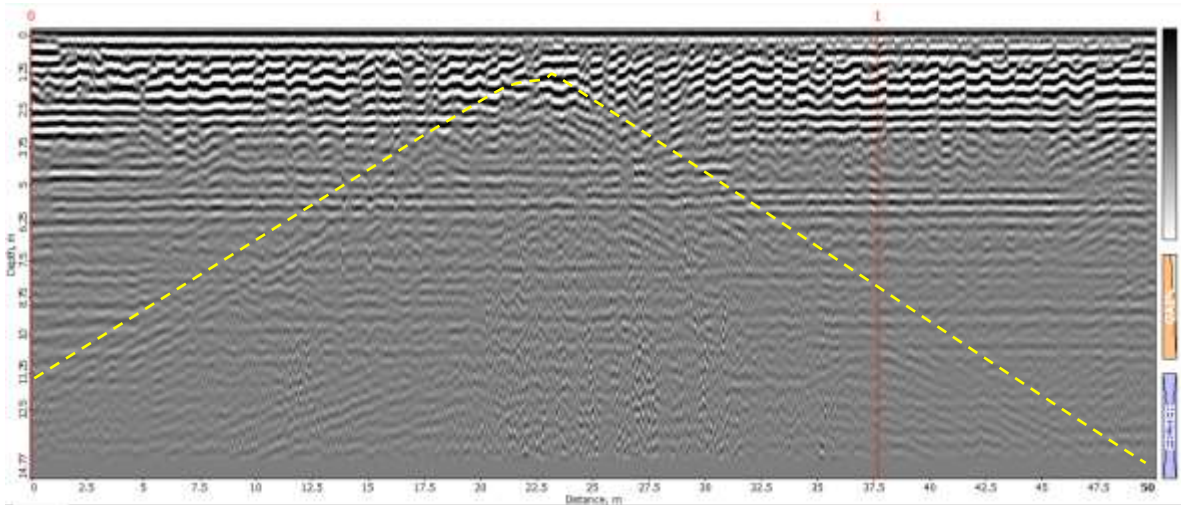


Figura 5.33 Radargrama de la línea 20 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.

En el siguiente radargrama correspondiente a la línea 21 (figura 5.35) se observa el cambio en la inclinación de los estratos, la presencia de material menos consolidado que da lugar a la posible formación de cavidades; y señalada con una línea punteada amarilla se encuentra una hipérbola de gran tamaño, la cual puede atribuirse a la presencia de una oquedad.



Figura 5.34 Línea 21 obtenida con georadar. Fuente: elaboración propia.

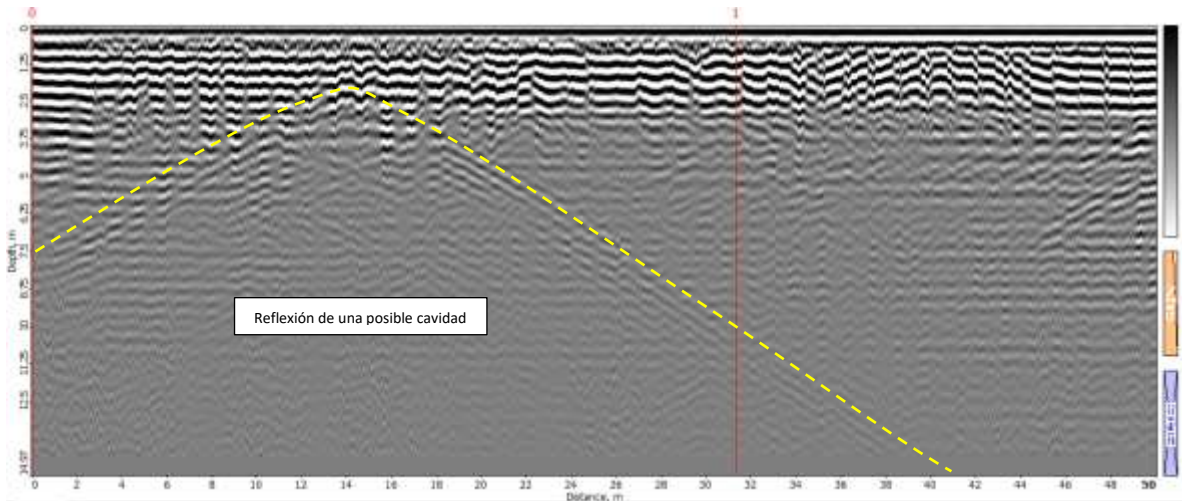


Figura 5.35 Radargrama de la línea 21 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.

En la línea 22 (figura 5.37) la cual tuvo una longitud de estudio mayor que las anteriores, presenta varios cambios en la inclinación de los estratos, muchos formando hipérbolas, debajo de ellas se observa la presencia de material poco consolidado, el cual, como ya se mencionó anteriormente, es un antecedente para la formación de cavernas.



Figura 5.36 Línea 22 obtenida con georadar. Fuente: elaboración propia.

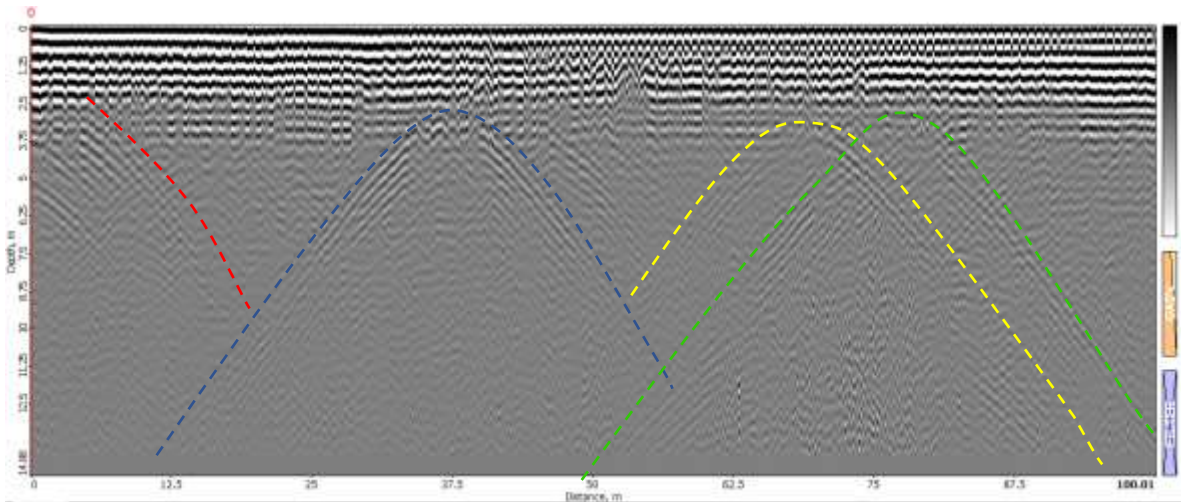


Figura 5.37 Radargrama de la línea 22 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.

### 5.2.3 Líneas obtenidas dentro de una de las cuevas en el parque de la Cueva de la Orquídea

Dentro de un acceso de la cueva, se realizaron 4 perfiles con el método de georadar y en los radargramas resultantes se pueden observar cambios en la inclinación de los estratos, también hubo cambios en la profundidad de alcance ya que fue mayor, una razón de esto puede ser que dentro de la cueva existía mucha humedad.

En la figura 5.38 se puede observar la línea 1, la cual presenta cambios en la inclinación de los estratos y zonas con material poco consolidado, pudiendo ser áreas propensas a la creación de cavernas si es que no existen ya.

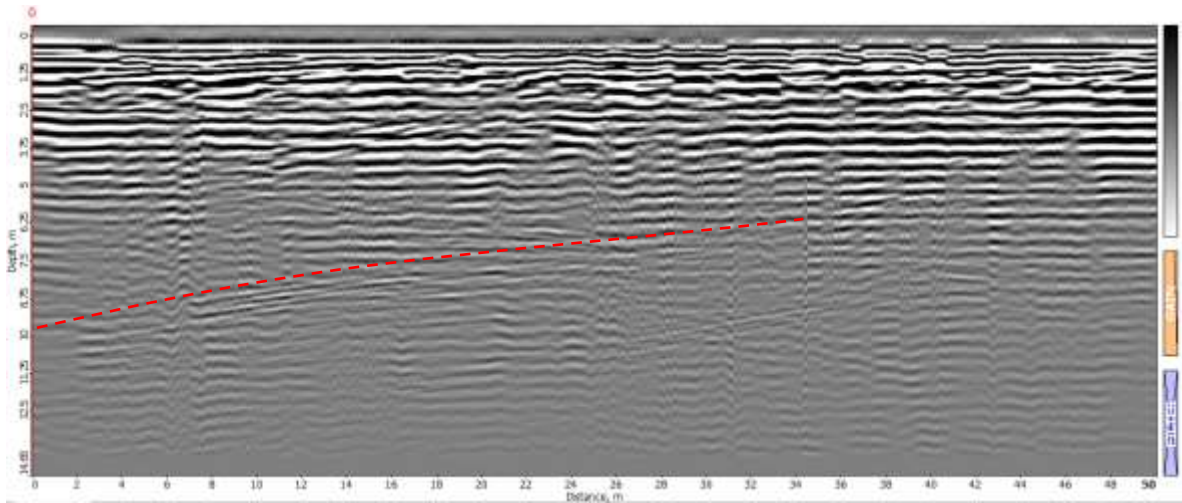


Figura 5.38 Radargrama de la línea cueva 1 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.

En la figura 5.39 se puede apreciar el radargrama de la línea cueva 2, en el cual se observa la inclinación de los estratos y debajo de ellos un material de menor compactación, lo cual puede indicar la formación de oquedades en estas zonas.

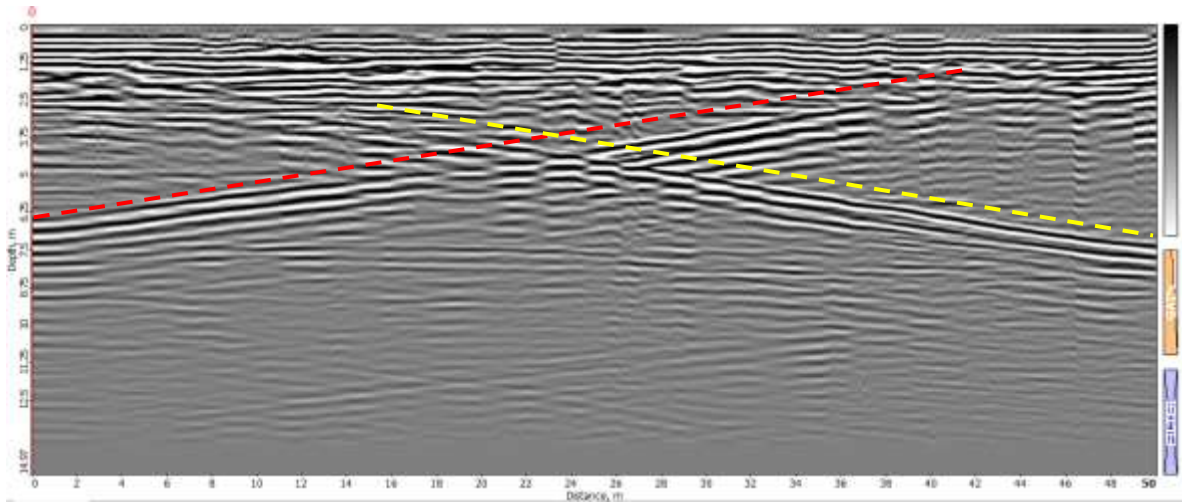


Figura 5.39 Radargrama de la línea cueva 2 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.

En la figura 5.40 se puede observar el radargrama de la línea cueva 3, en el cual también se puede observar la presencia de los estratos inclinados y debajo de ellos material menos compactado.

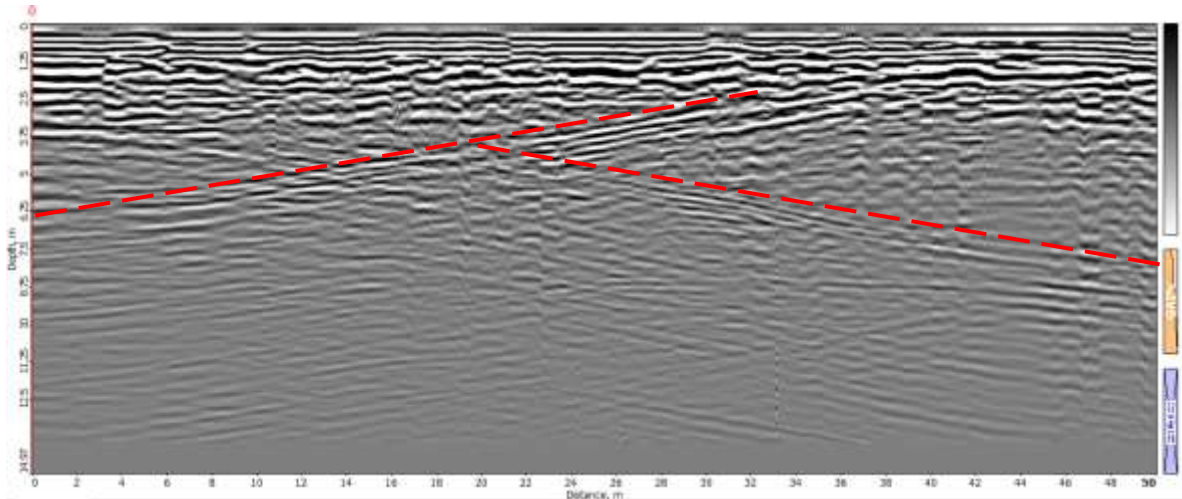


Figura 5.40 Radargrama de la línea cueva 3 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz

Nuevamente, en la figura 5.41, correspondiente al radargrama de la línea cueva 4, se observa la inclinación de los estratos.

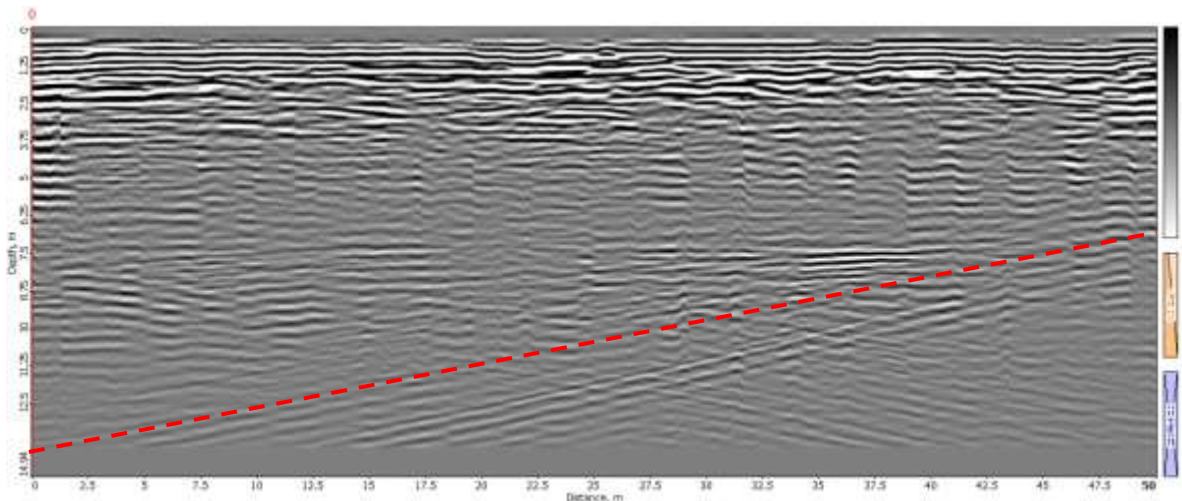


Figura 5.41 Radargrama de la línea cueva 4 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.

#### 5.2.4 Líneas obtenidas en el cerro del Macuiltépetl

Se realizaron 5 perfiles en el cerro en el cerro del Macuiltépetl, los radargramas presentan profundidades de entre 7 y 8 metros, no se observan anomalías que se relacionen con la presencia de cavidades, por esta razón, no se hizo un análisis profundo de los radargramas y se pueden encontrar en la sección de anexos.

### 5.3 Estimación de la profundidad de los cuerpos anómalos

Para la estimación de la profundidad de cuerpos anómalos, se utilizaron 2 métodos: la deconvolución de Werner y el espectro radial de potencia y se obtuvieron los siguientes resultados:

#### 5.3.1 Resultados de la deconvolución de Werner

El método de deconvolución de Werner fue realizado utilizando el software Oasis Montaj. Se utilizó la base de datos inicial para llenar algunos de los parámetros que la herramienta de deconvolución necesitaba como los datos de coordenadas, altitud, primera derivada vertical y horizontal. Como segundo paso se estiman los tamaños de ventanas, en este caso, como tamaño mínimo se utilizaron 10 km y como valor máximo 30 km, también se elige el valor de 10 para el tamaño de la ventana que se va a ir desplazando por todo el mapa. Otro parámetro importante es el cálculo del campo magnético durante los días del levantamiento, así como la inclinación y declinación magnética; para ello se utilizó una página de internet de los Centros Nacionales de información ambiental la cual dio como resultados los datos de la tabla 5.1 que posteriormente fueron utilizados para el cálculo de la deconvolución (Figura 5.42).

*Tabla 5.1. Cálculo del campo magnético en el parque de la Orquídea durante los días 23 y 24 de agosto del 2019. Fuente: elaboración propia.*

<b>Campo magnético</b>							
<b>Modelo usado: IGRF2020</b>							
<b>Latitud:</b>	<b>19.54550661831264°N</b>						
<b>Longitud:</b>	<b>96.9161029700974° W</b>						
<b>Elevación:</b>	<b>0.0 Km sobre el nivel del mar</b>						
<b>Fecha</b>	<b>Declinación</b>	<b>Inclinación</b>	<b>Intensidad horizontal</b>	<b>Componente Norte</b>	<b>Componente Este</b>	<b>Componente vertical</b>	<b>Campo total</b>
<b>23 de Agosto del 2019</b>	3.5339°	47.5829°	27,220.7 nT	27,168.9 nT	1,677.9 nT	29,792.6 nT	40,355.5 nT

<b>Cambio/ año</b>	-0.1146° /año	- 0.0331°/año	-42.2 nT/año	-43.8° nT/año	-57.3 nT/año	-86.2 nT/año	-95.5 nT/año
------------------------	------------------	------------------	-----------------	---------------	--------------	--------------	--------------

Figura 5.42 Parámetros iniciales para la realización del cálculo de la deconvolución de Werner. Fuente: elaboración propia.

Una vez realizada la deconvolución de Werner se obtiene la figura 5.43 en la cual se muestra una tabla que contiene datos como las coordenadas, la altitud y la profundidad a la que se encuentra alguna anomalía.

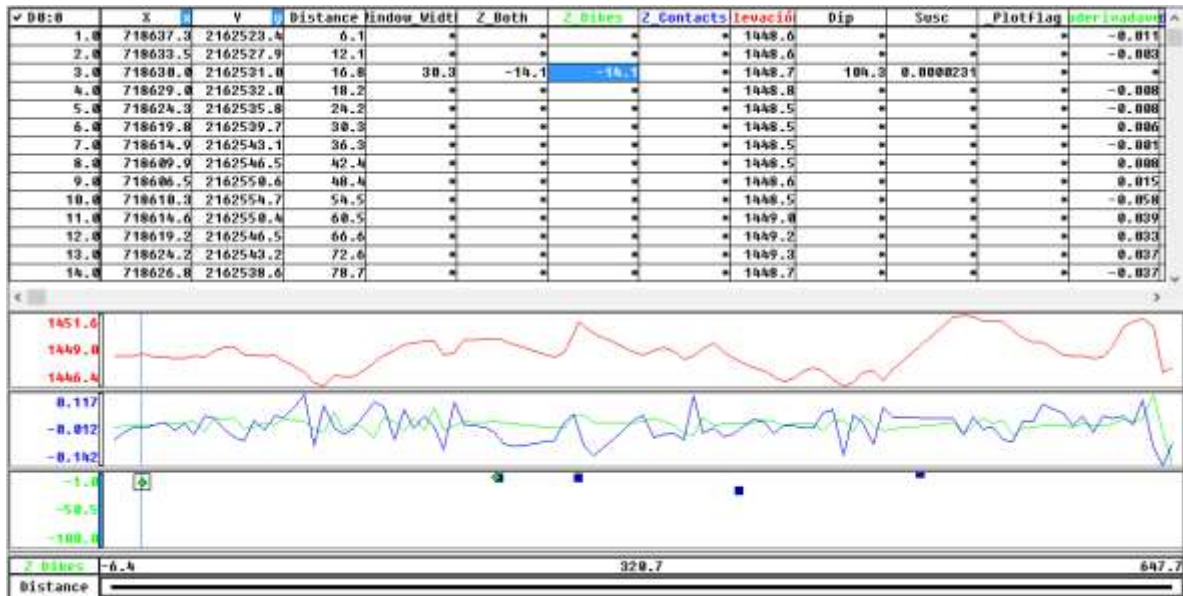


Figura 5.43 Datos obtenidos con la deconvolución de Werner. Fuente: elaboración propia.

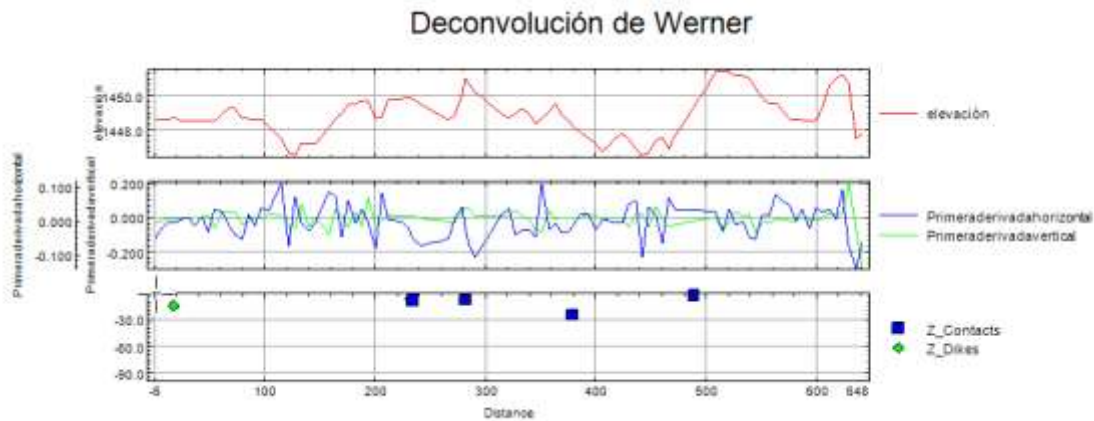


Figura 5.44 Modelo obtenido a través de la deconvolución de Werner. Fuente: elaboración propia.

En el radargrama de la línea 2 (figura 5.8) se puede observar la presencia de una reflexión de forma hiperbólica a 0.5 m de profundidad, con la deconvolución de Werner se visualizó 1 anomalía a una a 14.1 m (figura 5.45), la cual coincide con valores gravimétricos negativos en el mapa de la primera derivada vertical.



Figura 5.7 Línea 2 obtenida con georadar. Fuente: elaboración propia.

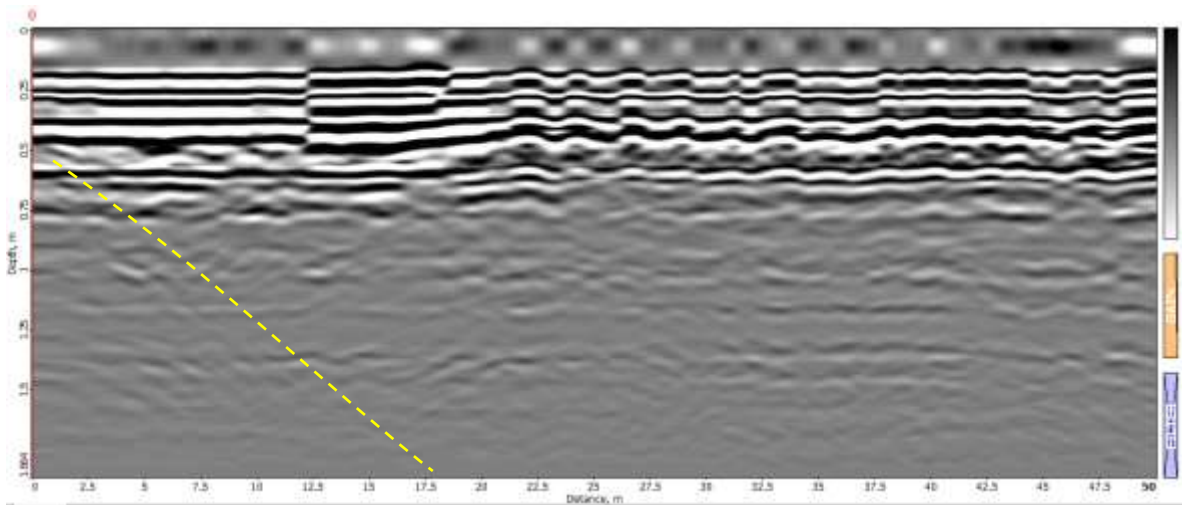


Figura 5.8 Radargrama de la línea 2 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.

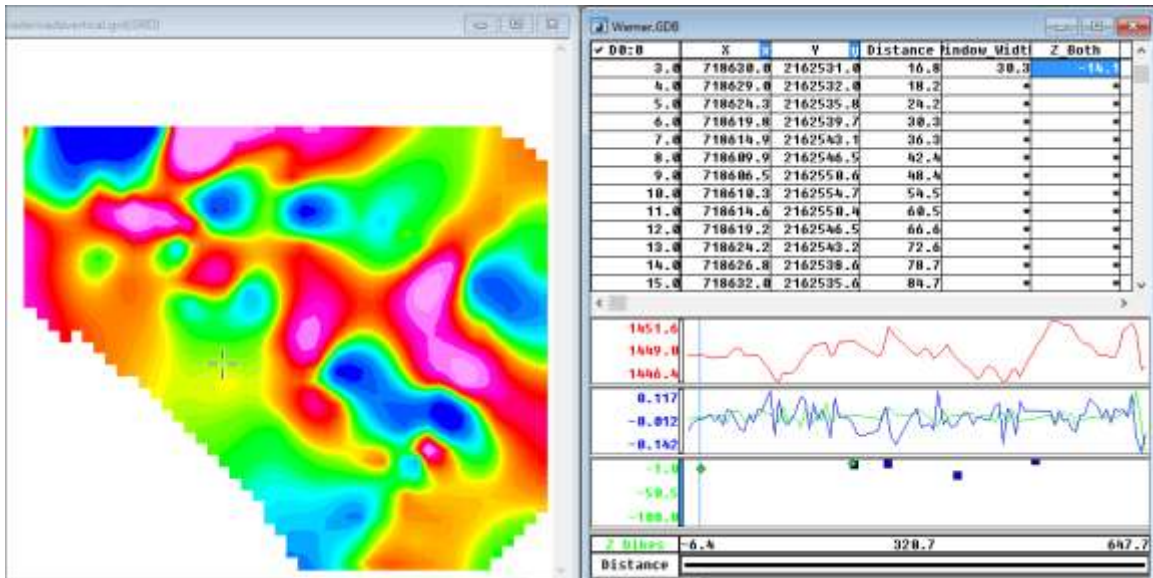


Figura 5.45 Profundidad de la primera anomalía relacionada con la línea 2 obtenida con georadar. Fuente: elaboración propia.

En el radargrama de la línea H4 (figura 5.23) se puede observar la presencia de una reflexión de forma hiperbólica, la cual se encuentra a 0.75 m de profundidad, con la deconvolución de Werner se visualizó una anomalía a 2.9 metros de profundidad, sin embargo, en el mapa de la primera derivada vertical (Figura 5.46) se observa que la anomalía está ubicada en un zona de valores gravimétricos positivos.



Figura 5.22 Línea H4 obtenida con georadar. Fuente: elaboración propia.

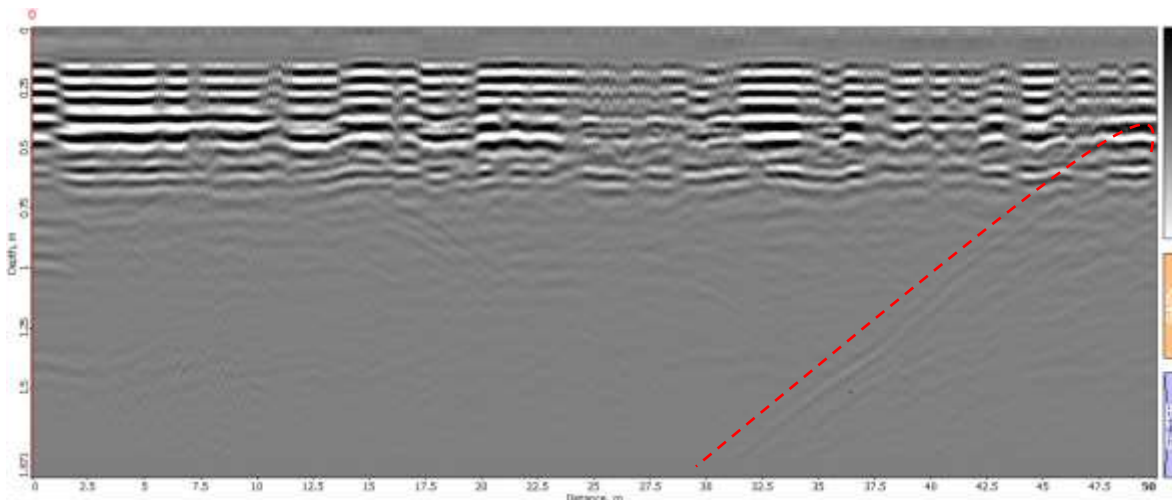


Figura 5.23 Radargrama de la línea H4 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz. Fuente: elaboración propia.

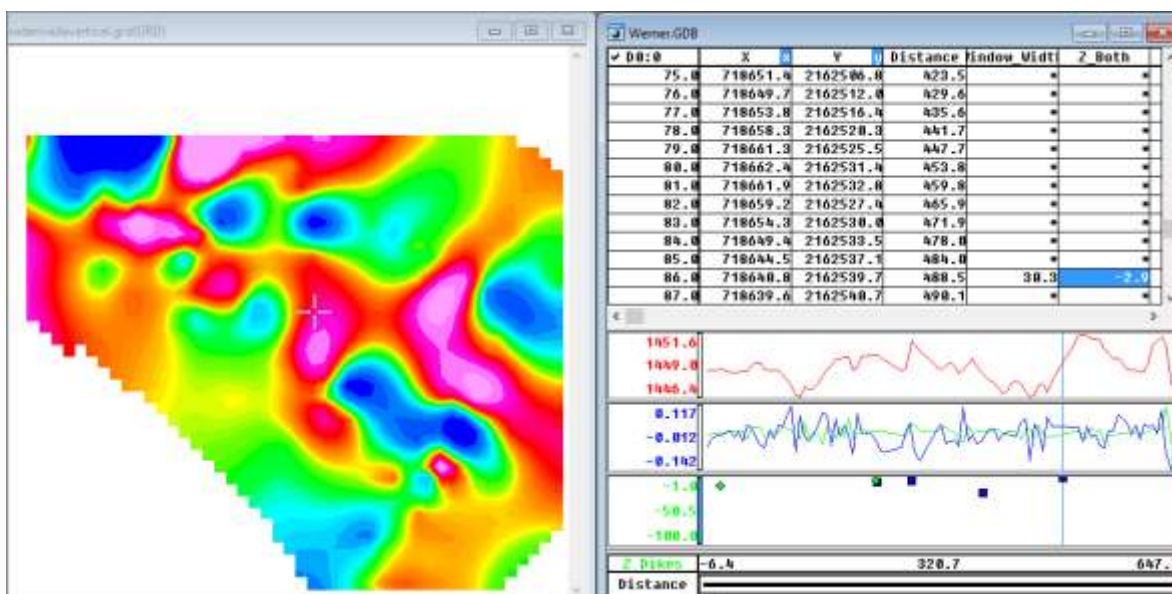


Figura 5.46 Profundidad de la primera anomalía relacionada con la línea H4 obtenida con georadar. Fuente: elaboración propia.

En el radargrama de la línea 10 (figura 5.11) se puede observar la presencia de una reflexión de tipo hiperbólica, con la deconvolución de Werner se visualizó una anomalía la cual se encuentra a una profundidad de 6.1 metros, y se encuentra en una zona de valores gravimétricos positivos.

# Línea 10 con georadar



Figura 5.10 Línea 10 obtenida con georadar. Fuente: elaboración propia.

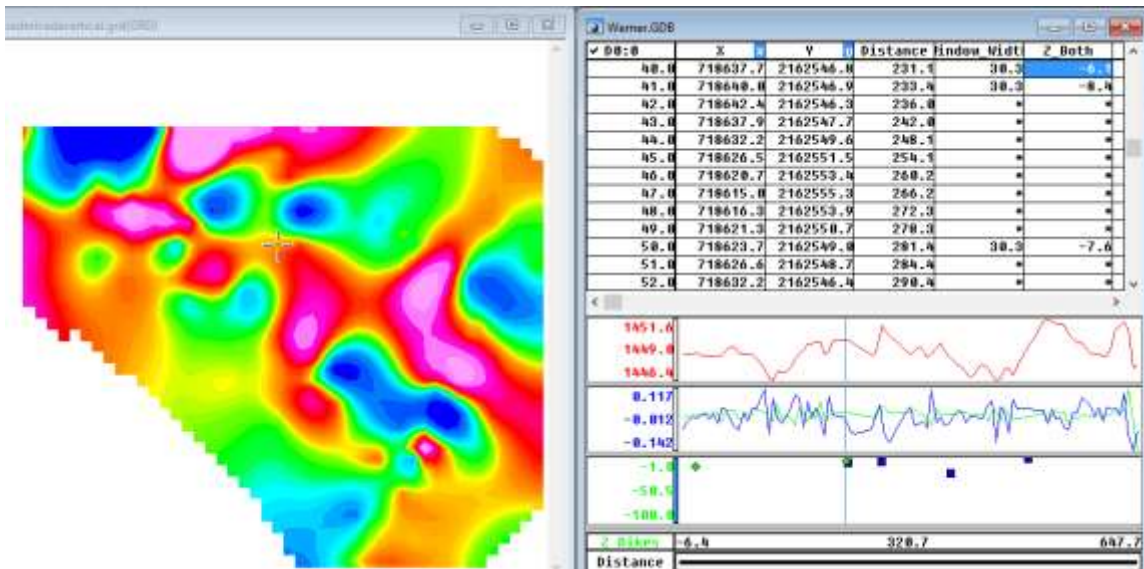


Figura 5.47 Profundidad de la primera anomalía relacionada con la línea 10 obtenida con georadar. Fuente: elaboración propia.

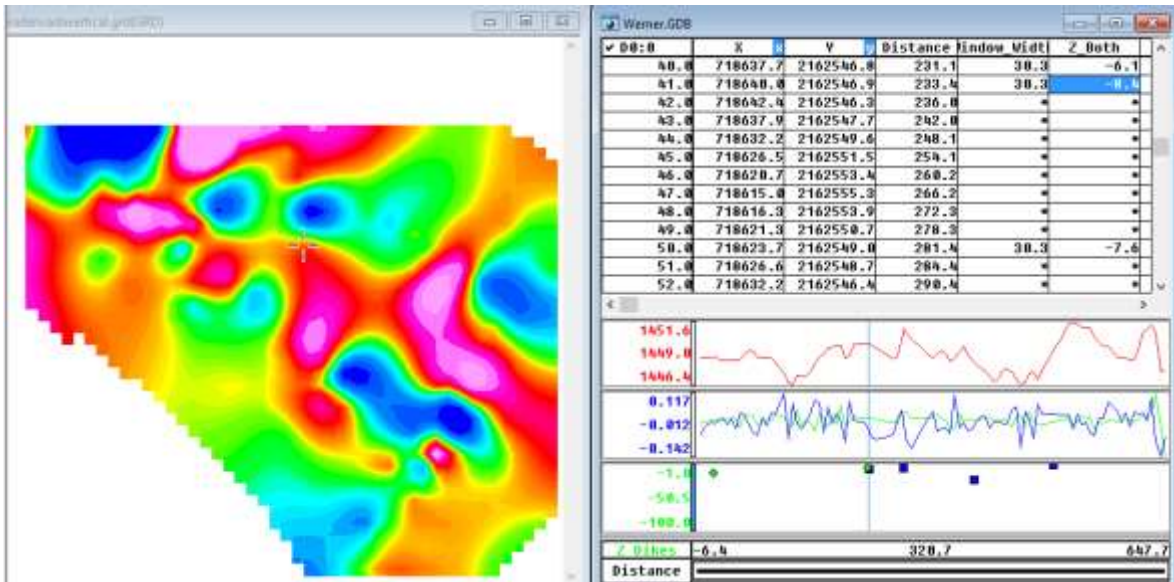


Figura 5.48 Profundidad de la segunda anomalía relacionada con la línea 10 obtenida con georadar. Fuente: elaboración propia.

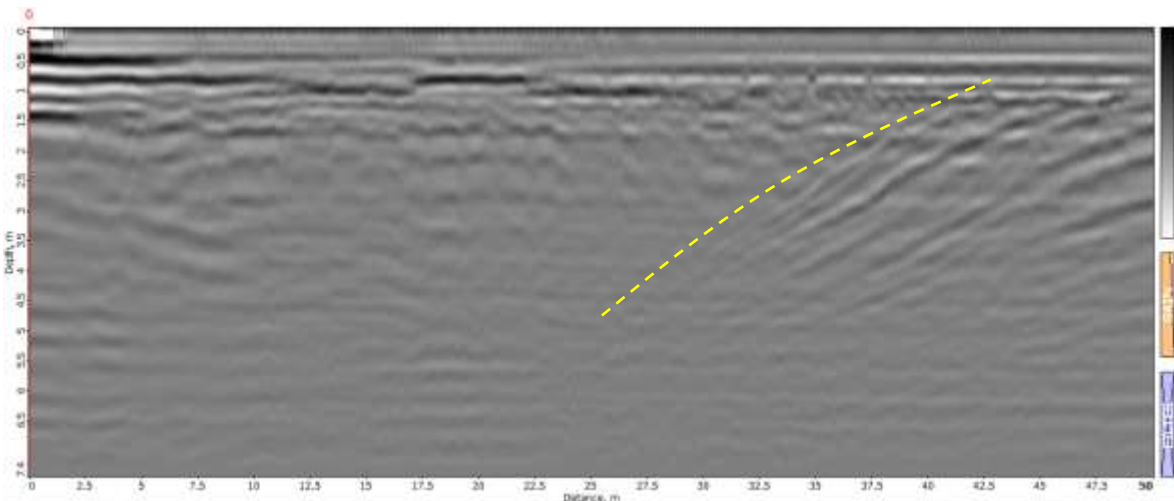


Figura 5.11 Radargrama de la línea 10 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.

Se obtuvieron otras anomalías a una profundidades de 7.4 y 24.7 metros, sin embargo, ningún perfil de georadar está asociado a esas zonas.

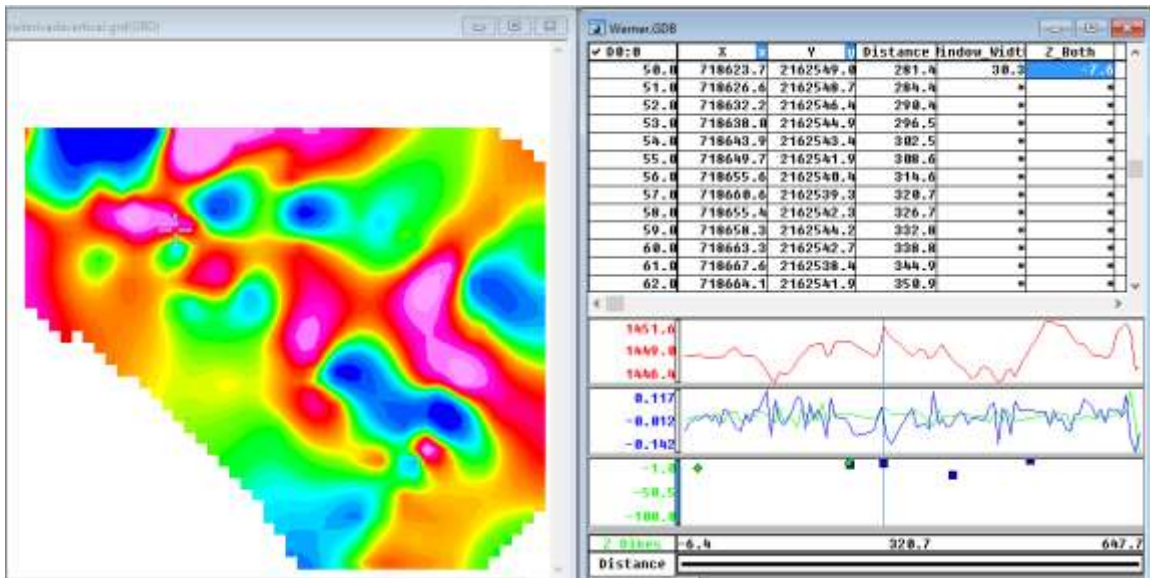


Figura 5.49 Profundidad de la primera anomalía no correlacionada. Fuente: elaboración propia.

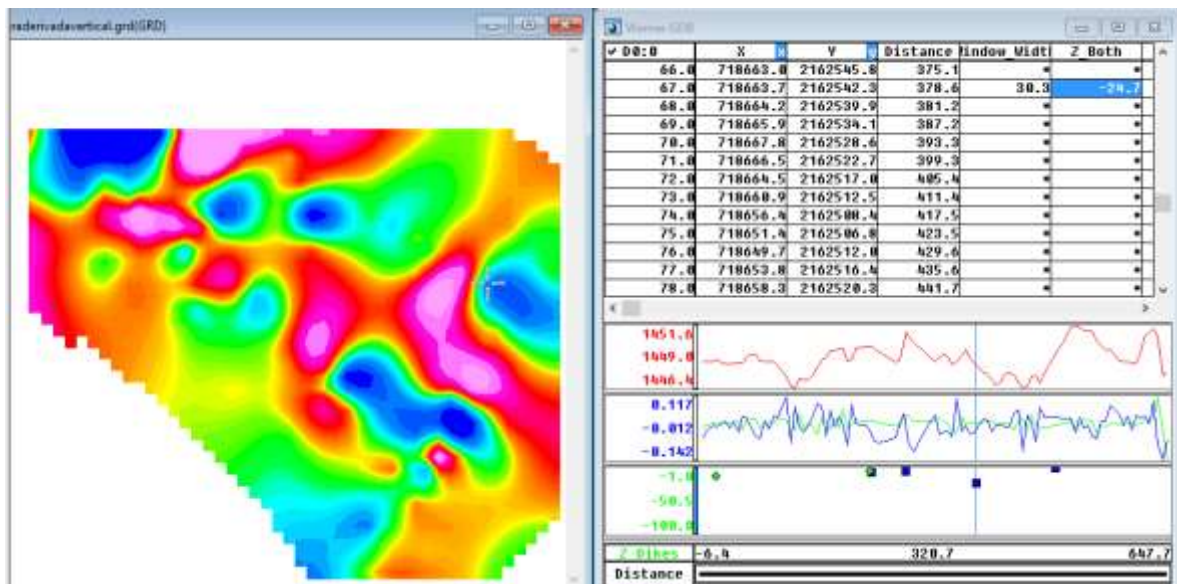


Figura 5.50 Profundidad de la segunda anomalía no correlacionada. Fuente: elaboración propia.

Para visualizar mejor la profundidad de los cuerpos anómalos se correlacionó el mapa gravimétrico de la primera derivada vertical junto con las líneas de georadar, en la figura 5.51 se puede observar que los puntos marcan el lugar donde se presentó la anomalía junto con la profundidad.

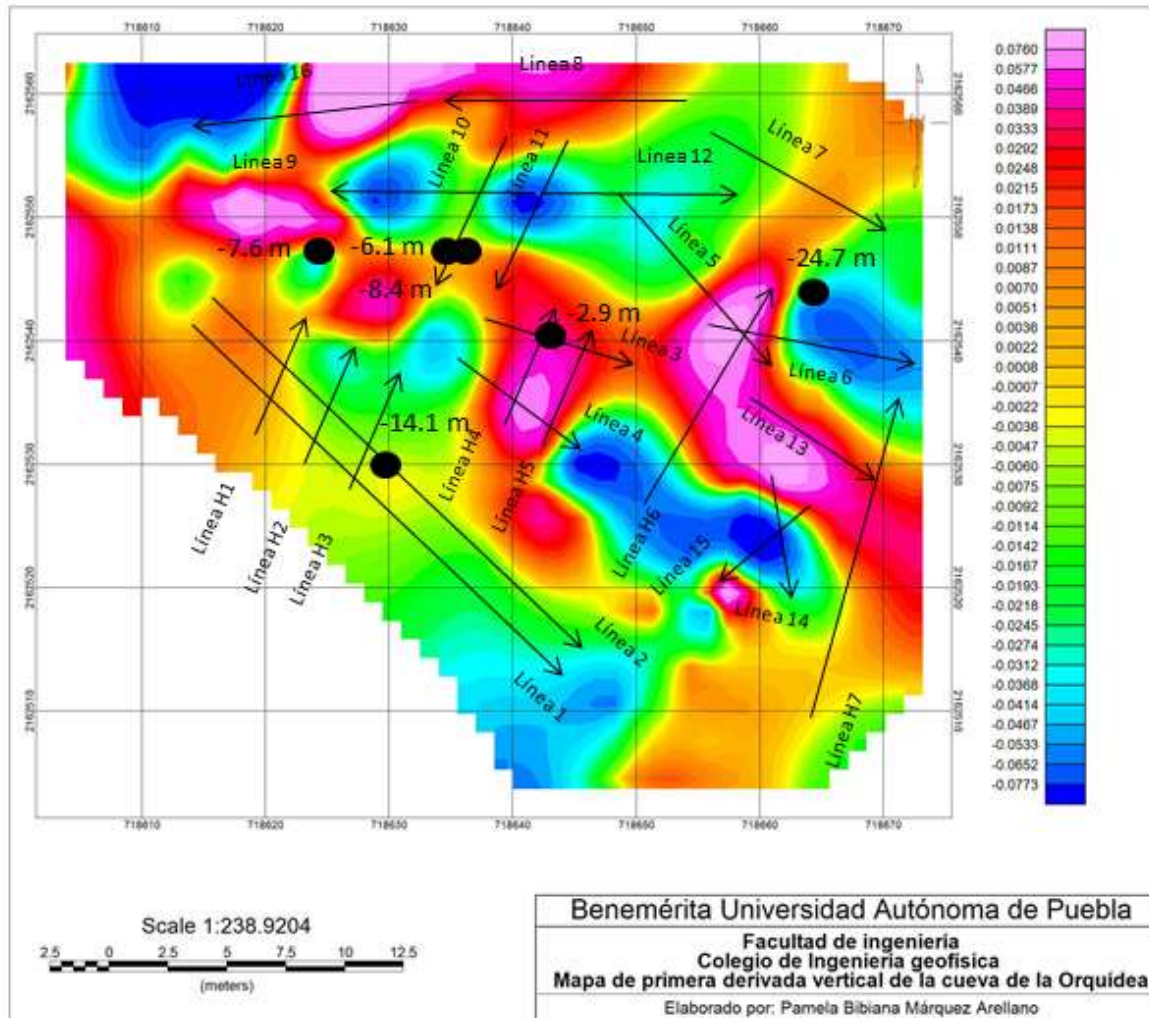


Figura 5.51 Mapa de profundidades obtenidas con la deconvolución de Werner. Fuente: elaboración propia.

En la tabla 5.2 se puede visualizar una correlación de los datos obtenidos con georadar, el mapa gravimétrico de la primera derivada vertical y la profundidad de las anomalías encontradas con la deconvolución de Werner.

Tabla 5.2 Identificación de oquedades relacionando gravimetría y georadar. Fuente: elaboración propia.

Línea obtenida con georadar	Presencia de hipérbolas en radargramas	Profundidad de las anomalías gravimétricas	Polaridad gravimétrica en donde se encuentra la anomalía
1	x	No hay anomalías	
2	X	-14.1	Negativo

<b>3</b>		No hay anomalías	
<b>4</b>		No hay anomalías	
<b>5</b>	X	No hay anomalías	
<b>6</b>		No hay anomalías	
<b>7</b>	x	No hay anomalías	
<b>8</b>		No hay anomalías	
<b>9</b>	X	No hay anomalías	
<b>10</b>	X	-6.1, -8.4	Negativo, Positivo
<b>11</b>		No hay anomalías	
<b>12</b>	X	No hay anomalías	
<b>13</b>	x	No hay anomalías	
<b>14</b>	X	No hay anomalías	
<b>15</b>	X	No hay anomalías	
<b>16</b>	X	No hay anomalías	
<b>H1</b>		No hay anomalías	
<b>H2</b>		No hay anomalías	
<b>H3</b>	x	No hay anomalías	
<b>H4</b>		-2.9	Positivo
<b>H5</b>	x	No hay anomalías	
<b>H6</b>	x	No hay anomalías	
<b>H7</b>		No hay anomalías	

### 5.3.2 Resultados del espectro radial de potencia

El análisis espectral de los datos fue realizado a través del software Oasis Montaj. Es necesario filtrar los datos que se tienen de la primera derivada para ello se hizo uso de la opción MAGMAP de Oasis y se obtuvo la Transformada de Fourier 2D, posteriormente se obtuvo el espectro radial de potencia (Figura 5.52).

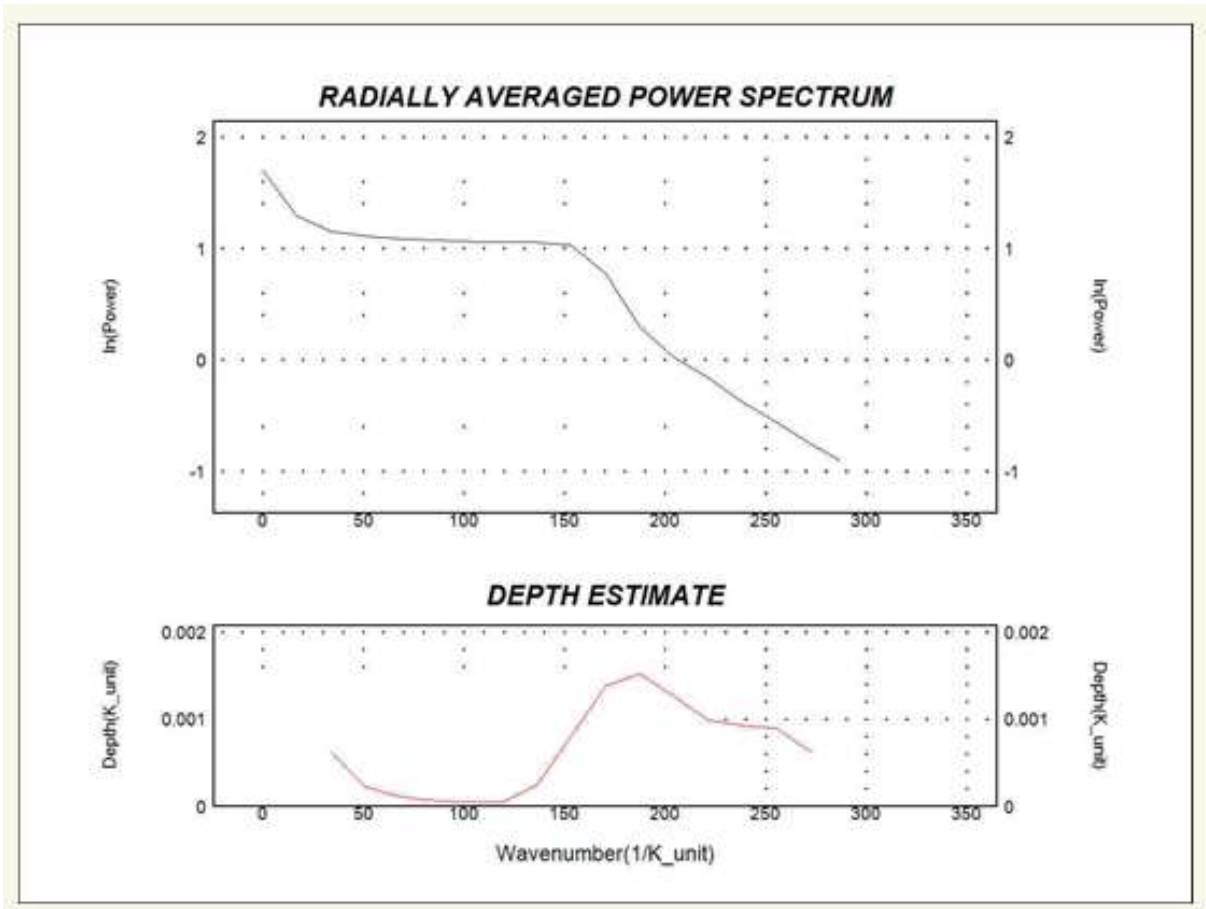


Figura 5.52 Espectro de potencia obtenido.

En el espectro obtenido se identificaron 3 pendientes, las cuales se utilizaron para el cálculo de las profundidades asociadas a ellas (Figura 5.53) utilizando el método de Spector y Grant (Spector, 1970) como resultado se obtuvieron 3 profundidades, una de 13.4 metros, otra de 15.7 metros y una última de 7.8 metros.

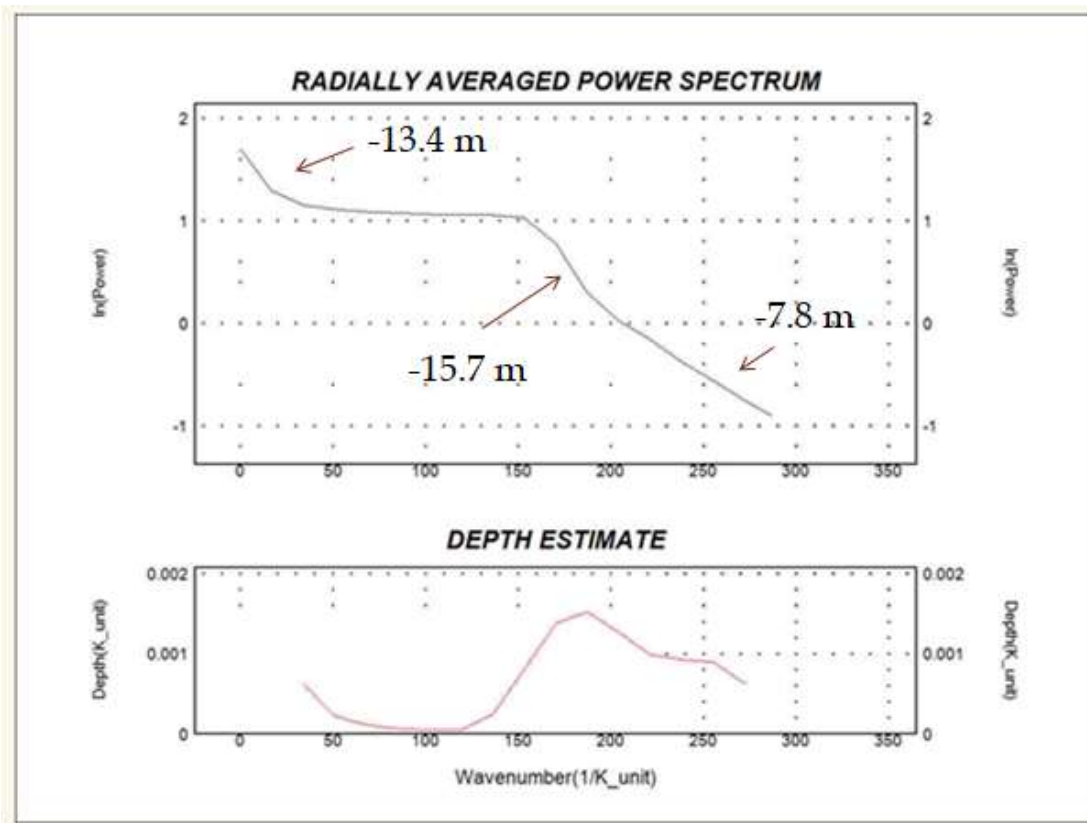


Figura 5.53 Espectro de potencia en donde se observan las tres pendientes utilizadas y sus profundidades correspondientes.

Si estas profundidades se correlacionan con el método de la deconvolución de Werner se puede inferir que hay una anomalía muy profunda ya que, con la deconvolución la mayor profundidad obtenida fue de 24.7 metros y con el espectro radial de potencia se obtuvo una de 19.6 metros.

#### 5.4 Mapeo de las rutas internas y externas al parque de la orquídea

Correlacionando los radargramas, con los mapas gravimétricos obtenidos y la deconvolución de Werner se obtuvieron los siguientes resultados.

En la figura 5.54 se observa la superposición del mapa gravimétrico de la primera derivada vertical con la línea 2 obtenida con georadar, en él, se encuentra señalado con una estrella, una oquedad la cual según la deconvolución de Werner tiene una profundidad de 14.1 metros, comparando con el radargrama de esa

línea (figura 5.9) se puede observar que a los 0.5 metros hay una hipérbola de amplitud considerable, sin embargo no se observan más reflectores de este tipo que puedan indicar la existencia de la oquedad ya que la antena para georadar que se utilizó era de una frecuencia que no permitió alcanzar profundidades mayores a 1.8 metros; por otra parte el punto señalado se encuentra en una zona con valor de gravimetría negativo, lo cual es un indicador para afirmar la existencia de la oquedad.

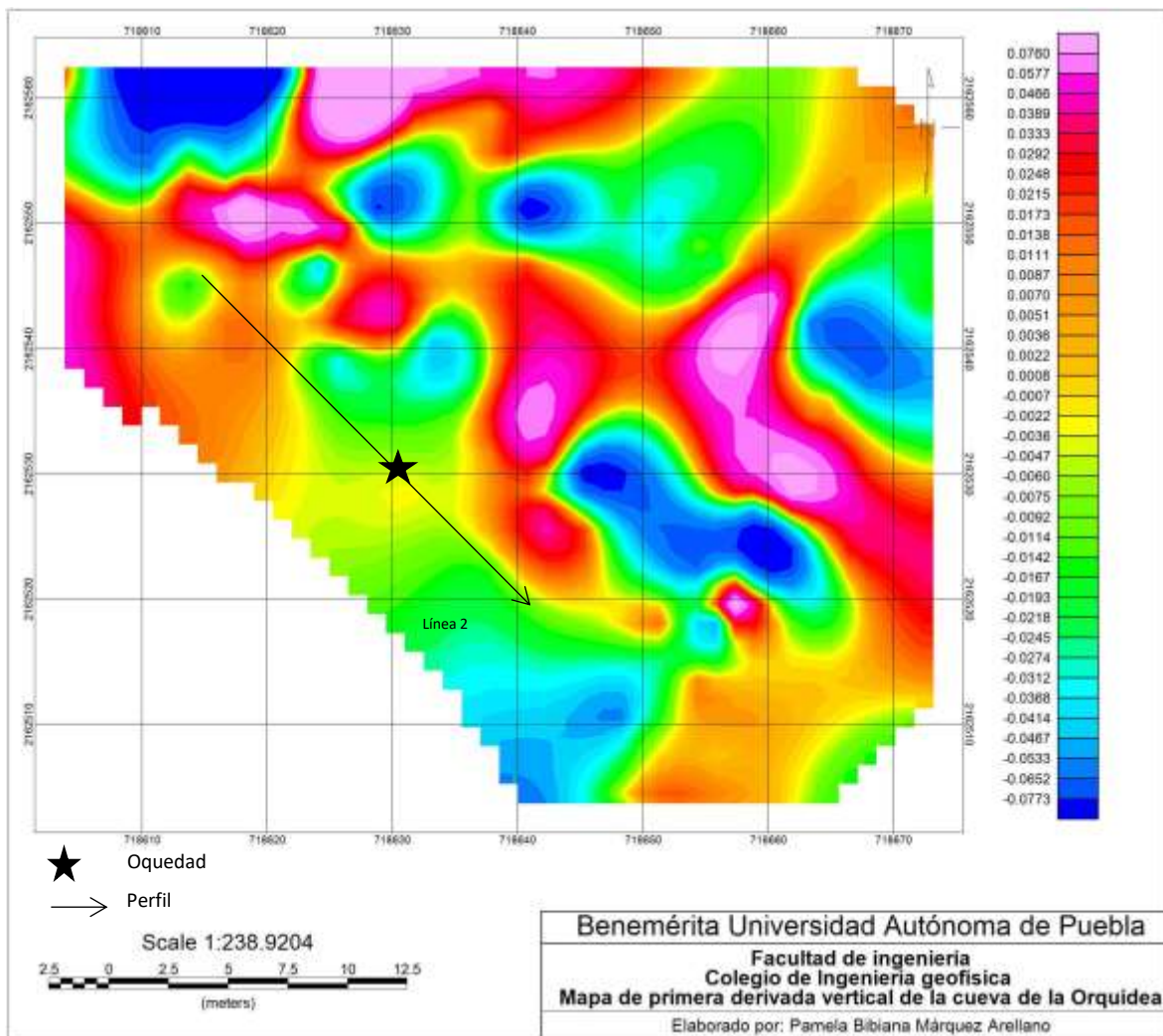


Figura 5.54 Correlación de línea 2 obtenida con georadar y mapa gravimétrico de la primera derivada vertical. Fuente: elaboración propia.

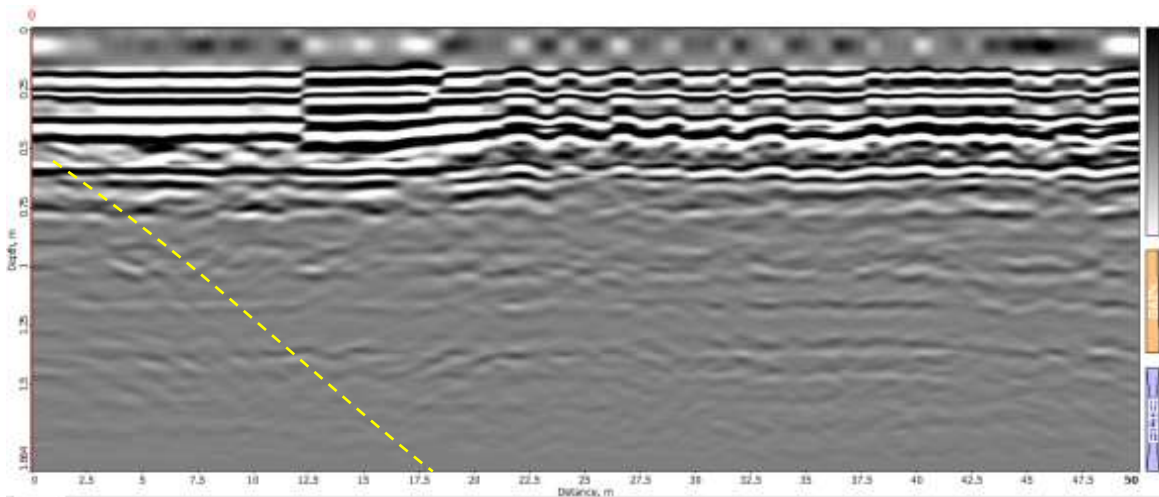


Figura 5.9 Radargrama de la línea 2 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.

En la figura 5.55 se observa la superposición del mapa gravimétrico de la primera derivada vertical con las líneas 10 y 11 obtenidas con georadar, en este mapa, se encuentran dos estrellas, señalando dos posibles oquedades, una de ellas según la deconvolución de Werner tiene una profundidad de 6.1 metros, la otra tiene una profundidad de 8.4 m, comparando con el radargrama de la línea 10 (figura 5.11) se puede observar a esa profundidad, la presencia de una hipérbola de amplitud considerable; sin embargo en el radargrama de la línea 11 no se observan reflexiones de este tipo, por otra parte la anomalía con profundidad de 6.1 metros se encuentra en una zona con valor de gravimetría negativo, lo cual es un indicador para afirmar la existencia de la oquedad.

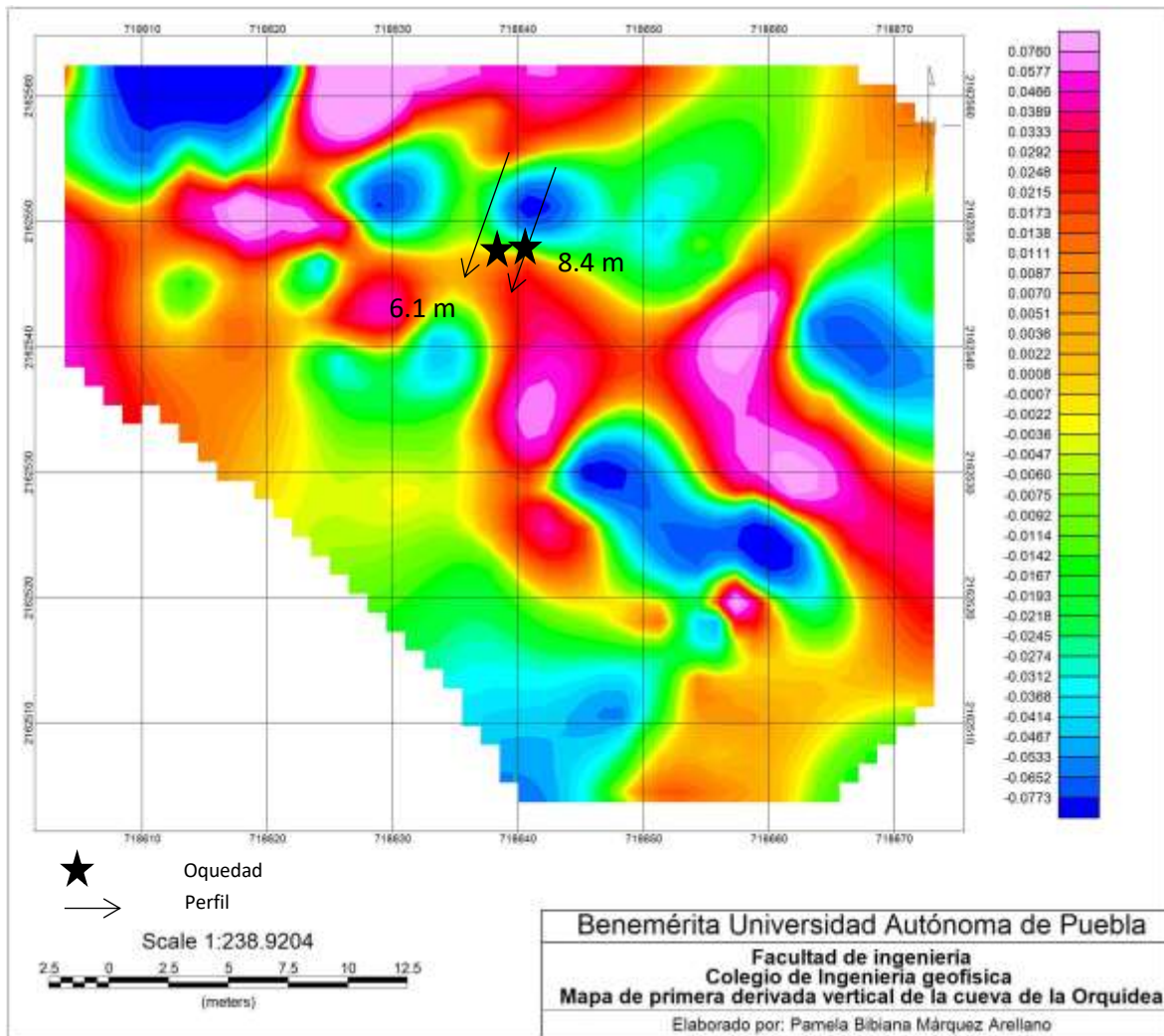


Figura 5.55 Correlación de línea 10 obtenida con georadar y mapa gravimétrico de la primera derivada vertical. Fuente: elaboración propia.

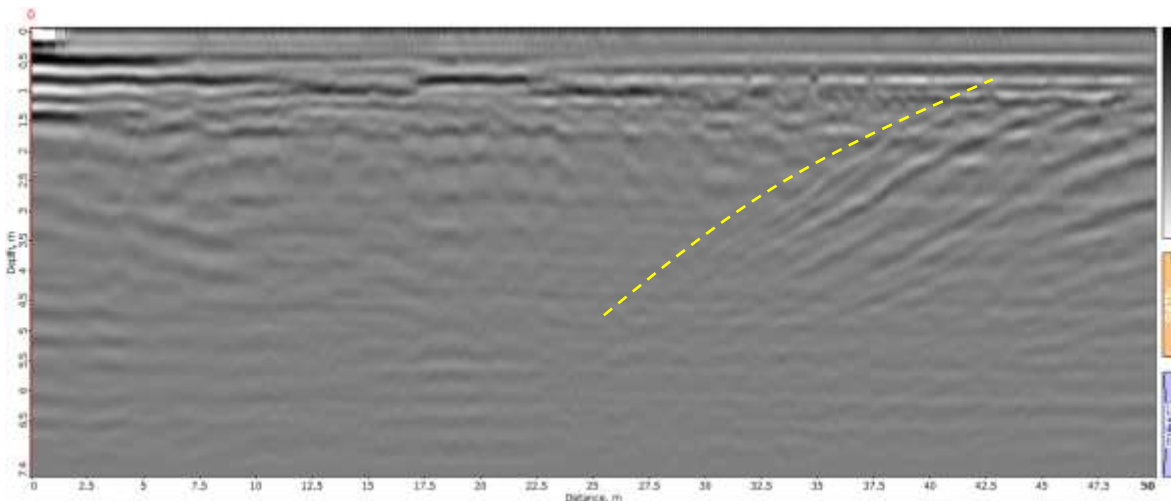


Figura 5.11 Radargrama de la línea 10 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.

En la figura 5.56 se observa la superposición del mapa gravimétrico de la primera derivada vertical con la línea H4 obtenida con georadar, en él, se encuentra señalada con una estrella, una oquedad las cuales según la deconvolución de Werner tiene una profundidad de 2.9 metros, comparando con el radargrama de esa línea (figura 5.12) se observa la presencia de una hipérbola de amplitud considerable a los 1.5 metros de profundidad, por otra parte el punto señalado se encuentra en una zona con valor de gravimetría positivo, motivo por el cual quedaría descartada la presencia de una oquedad en esa zona ya que como se observó anteriormente, una anomalía negativa es un indicativo de una posible ausencia de masa en el subsuelo, este caso una cueva.

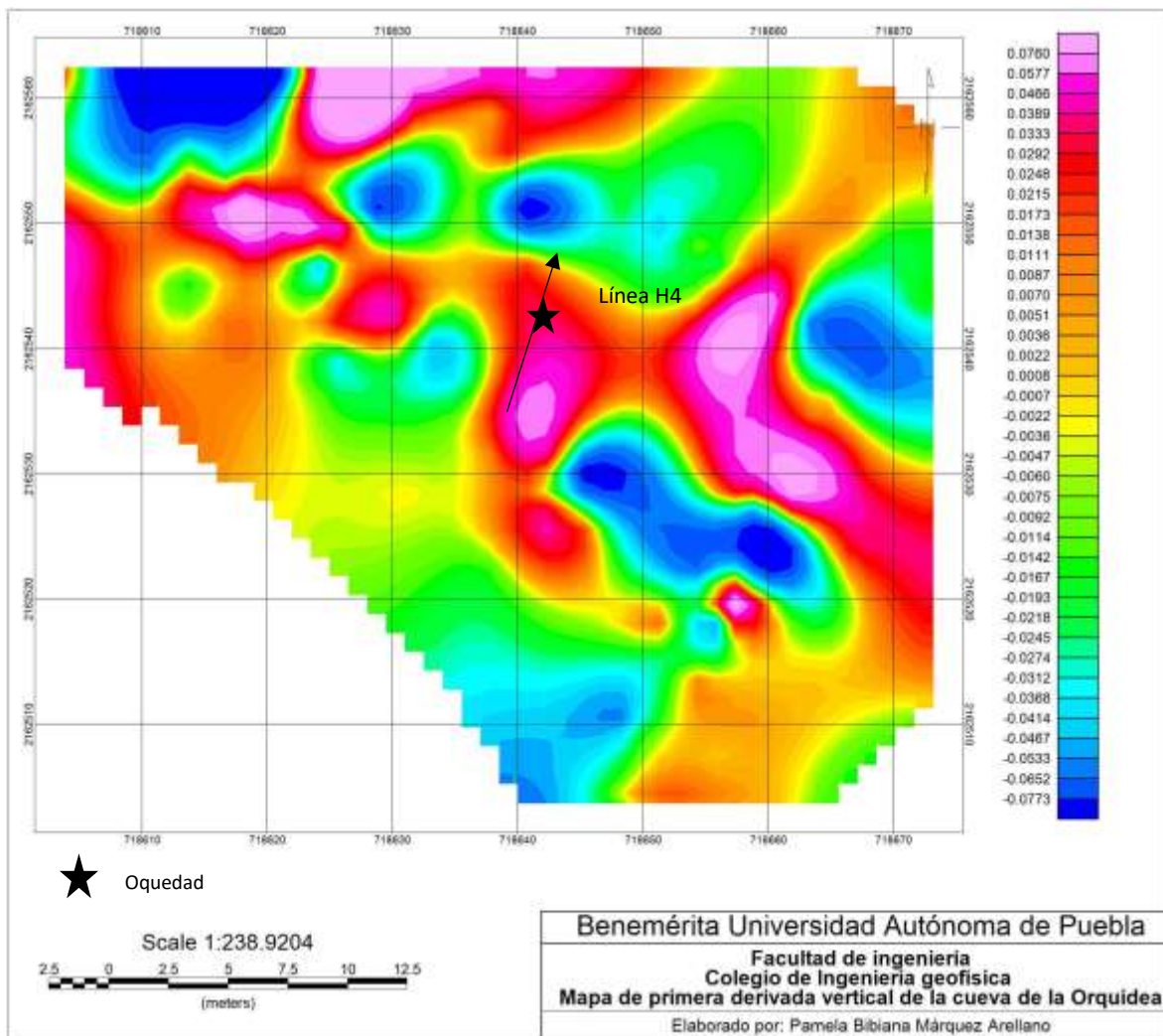
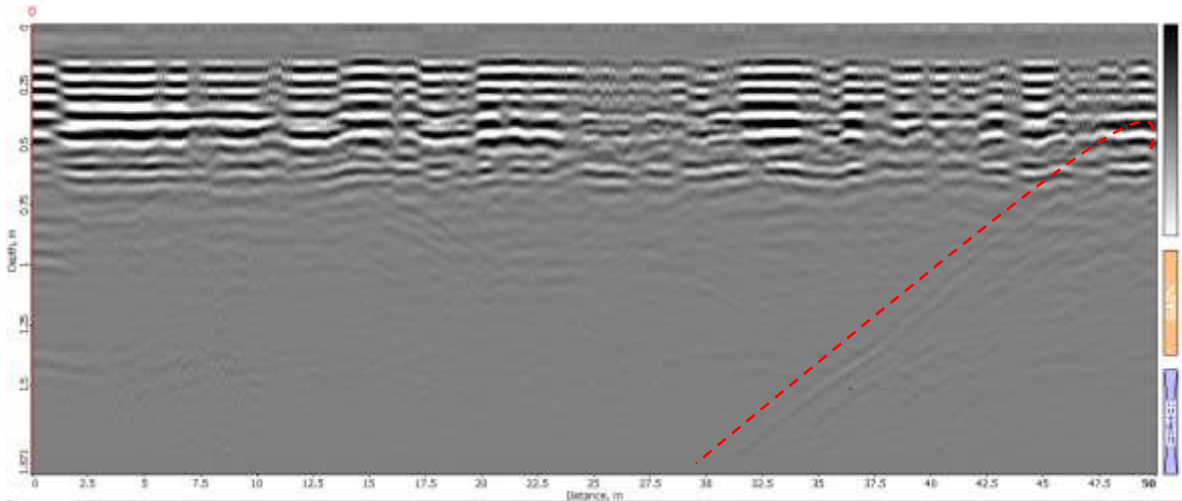


Figura 5.56 Correlación de línea H4 obtenida con georadar y mapa gravimétrico de la primera derivada vertical. Fuente: elaboración propia.



*Figura 5.12 Radargrama de la línea H4 obtenida con georadar con una antena de 300MHz.*

Existieron casos como lo que pasó con la figura 5.57 y la línea 16 (figura 5.16) de georadar, en donde según la deconvolución de Werner no se observó la presencia de anomalías, sin embargo, en el radargrama (figura 5.17) se observa que a los 7.5 metros se encuentra una hipérbola, la cual se podría considerar como un reflector de alguna oquedad, y si se observa el mapa gravimétrico, esta anomalía se encuentra en una zona con valores negativos, que se extiende en una gran parte dentro del Parque de la Cueva de la Orquídea y que podría continuar en la parte exterior de este. Las zonas encerradas con círculos indican que podría haber continuidad hacia el exterior debido a la tendencia de estas anomalías negativas.

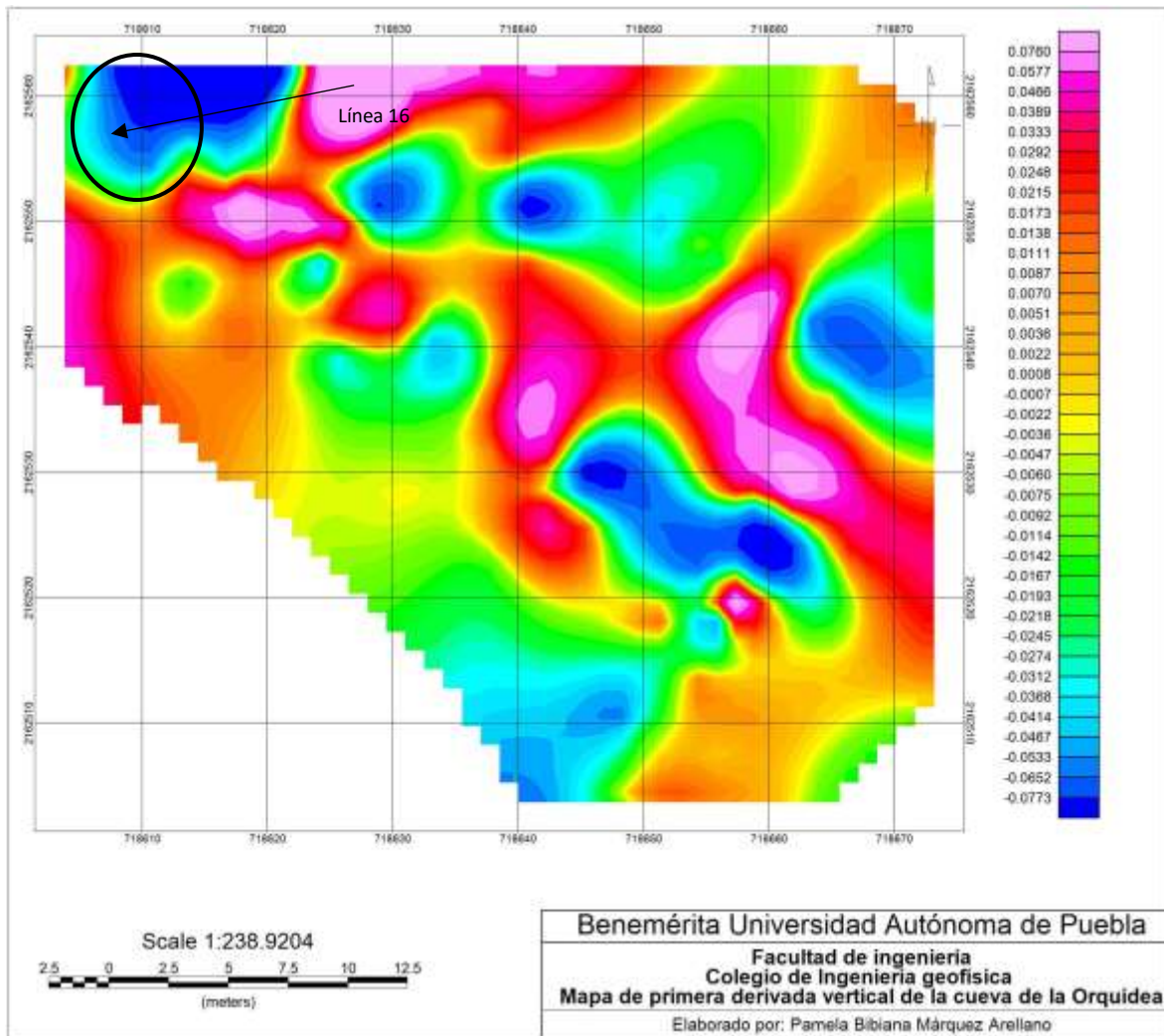


Figura 5.57 Correlación de línea 16 obtenida con georadar y mapa gravimétrico de la primera derivada vertical. Fuente: elaboración propia.

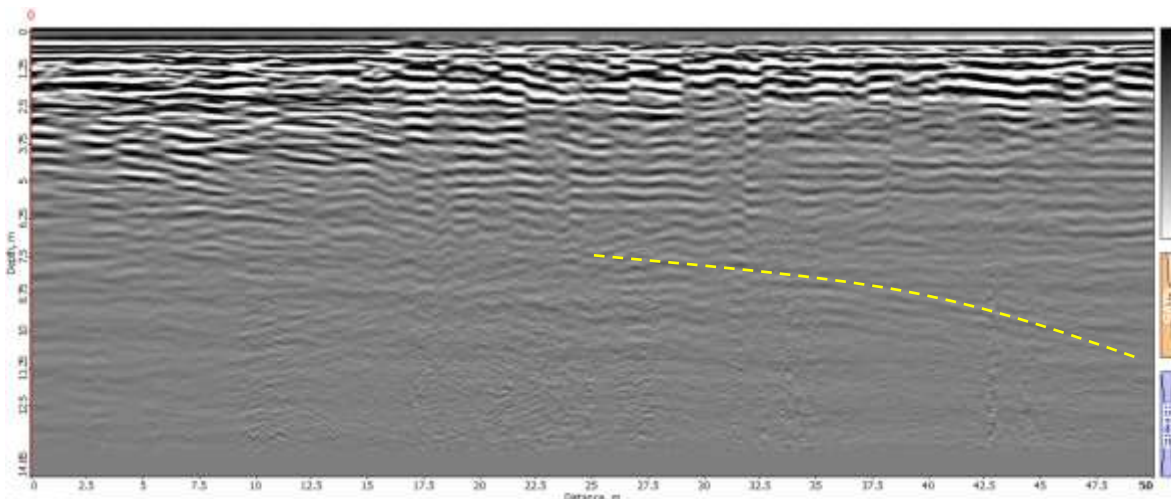


Figura 5.17 Radargrama de la línea 16 obtenida con georadar con una antena de 300MHz.

### 5.4.1 Rutas internas y ubicación de cavidades dentro del Parque de la Orquídea.

En el siguiente mapa (Fig.5.58) las estrellas marcan zonas en las cuales tanto los radargramas como los valores de las zonas gravimétricas (en donde existen anomalías) coinciden para inferir que en esas zonas hay cavidades con mayor certeza. Observando la tabla 5.1, en esas zonas, los radargramas presentan reflexiones e hipérbolas, existen valores gravimétricos negativos y anomalías con la profundidad correspondiente.

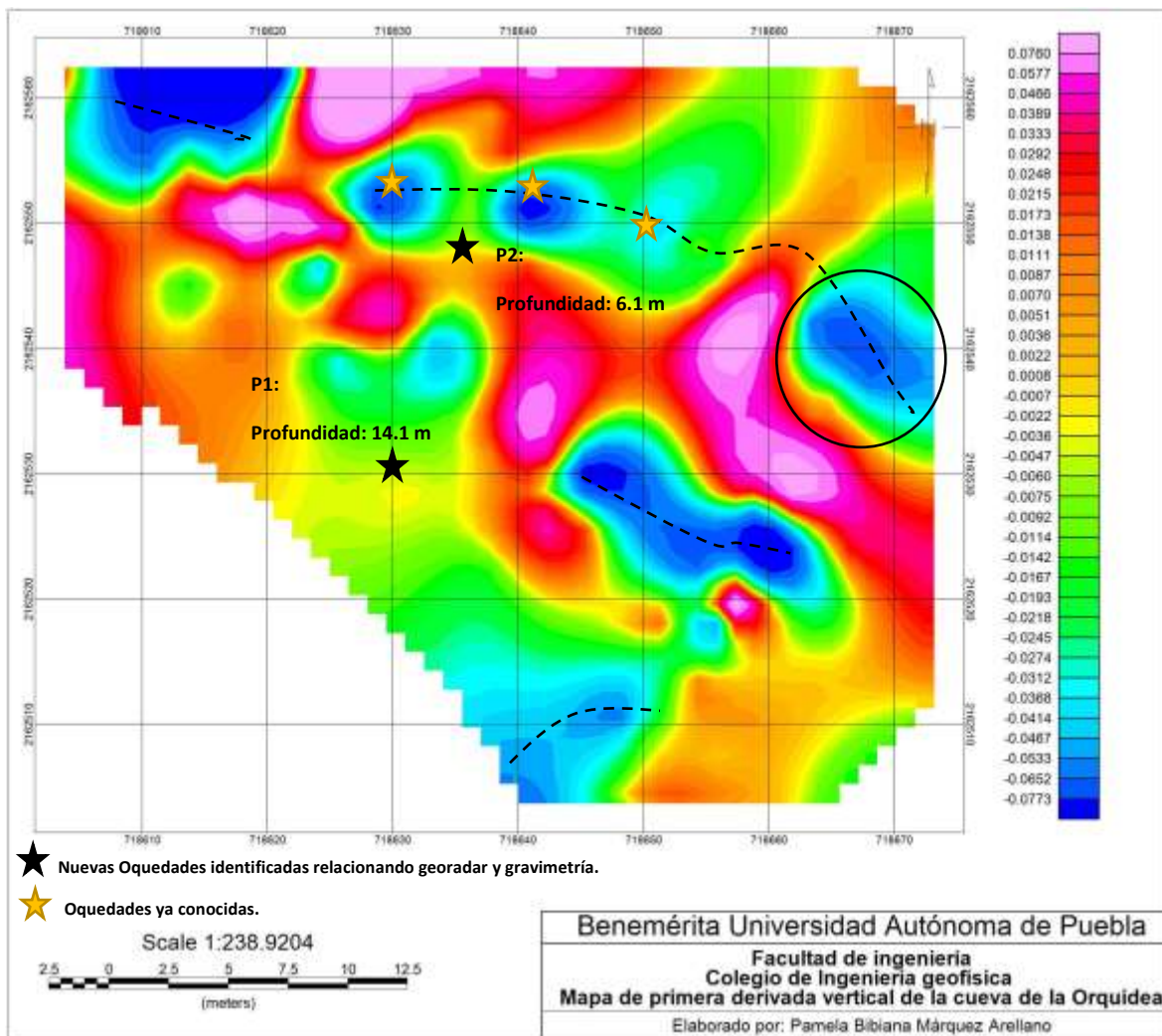


Figura 5.58 Rutas internas de oquedades en el Parque de la Cueva de la Orquídea.

Las líneas con guiones representan posibles rutas/ extensiones de la cueva, la anomalía gravimétrica negativa encerrada en un círculo negro se puede inferir que tiene continuación hacia la zona en donde se encuentran viviendas.

#### 5.4.2 Rutas externas y ubicación de cavidades fuera del Parque de la Orquídea.

Las siguientes zonas señaladas en los mapas son áreas en las cuales existe la posibilidad de que se encuentren oquedades; debido a que no se tiene información de otro método geofísico para poder correlacionar los radargramas, los siguientes puntos son posibles zonas con oquedades en el subsuelo.

A lo largo de la línea 17 obtenida con georadar (Figura 5.59) hay una posible presencia de oquedades.

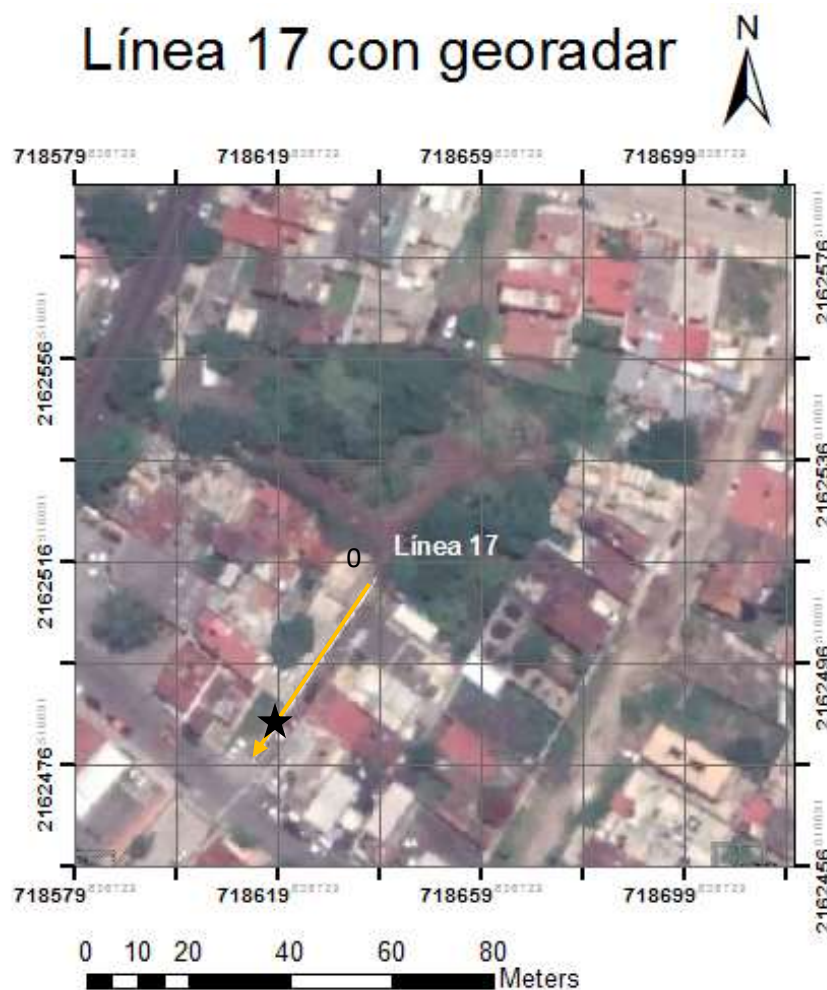


Figura 5.59 Localización de oquedades en la línea 17 obtenida con georadar.

En la figura 5.60 se puede observar la posible presencia de cavidades en las zonas señaladas, ya que en el radargrama se pudo observar la reflexión de una oquedad, de la cual no se sabe su inicio, sin embargo finalizaba alrededor de los 16 m.



Figura 5.60 Localización de oquedades en la línea 18 obtenida con georadar.

En el radargrama de la línea 19 se observa la presencia de muchas oquedades, esto quiere decir que a lo largo de la línea de la figura 5.61 se pueden encontrar muchas de ellas.

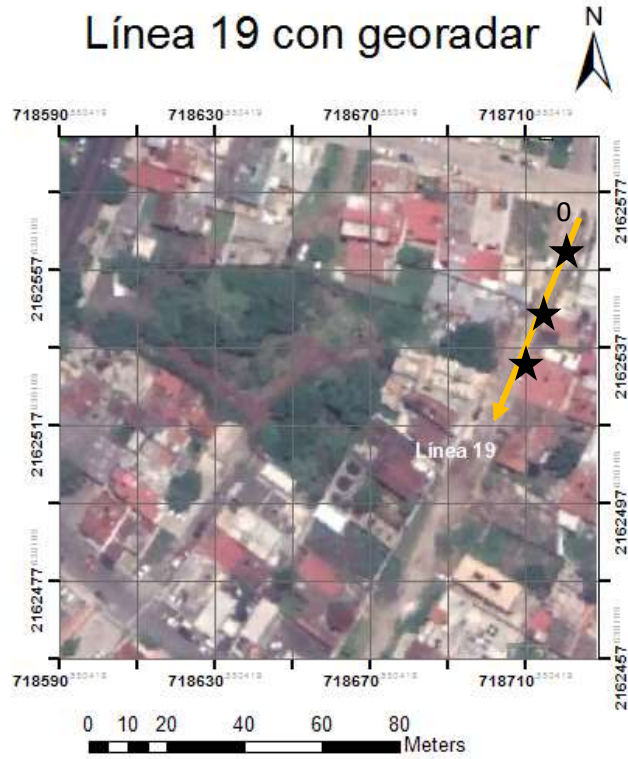


Figura 5.61 Localización de oquedades en la línea 19 obtenida con georadar.



Figura 5.62 Localización de oquedades en la línea 20 obtenida con georadar.

En el radargrama de la línea 21 se pudieron observar la posible presencia de 2 oquedades.

## Línea 21 con georadar



Figura 5.63 Localización de oquedades en la línea 21 obtenida con georadar.

En la figura 5.64 se puede observar la posible presencia de cavidades en las zonas señaladas. La razón por la cual se determina que son cavidades y no tuberías es que en los radargramas se observan hipérbolas de gran amplitud y en algunos casos de profundidad superior a la que normalmente se encuentran las tuberías, menor a 1.5 metros.



Figura 5.64 Localización de oquedades en la línea 22 obtenida con georadar.

### 5.5 Factibilidad del uso de suelo del parque de la orquídea a través del método gravimétrico y del método o con georadar para la construcción de casas habitación.

El riesgo de colapso de esta zona es menor, debido a que el subsuelo del área del Parque de la Cueva de la Orquídea y de sus alrededores es de tipo basáltico; este material tiene una dureza y resistencia muy alta y debido a estas propiedades es muy difícil que se produzca un hundimiento, por lo que el colapso de la zona es menos probable, sin embargo, la dureza del material del subsuelo no es lo único que se debe de tomar en cuenta, el grosor del techo de la cueva es otro factor importante, ya que si solo tiene unos pocos metros de grosor, y se sobrecarga el área de las zonas aledañas al Parque de la Cueva de la Orquídea con más construcciones puede que se produzca un hundimiento y colapsar.

Como ya fue mencionado antes un punto importante para tener en cuenta es la profundidad de cimentación, existen normas que regulan la profundidad de cimentación, y otros factores que hay que tener en cuenta como el tipo de suelo, la carga que ejercerá la construcción sobre el suelo; y como se puede observar en

los radargramas de los perfiles realizados en las calles paralelas al Parque de la Cueva de la Orquídea, existen oquedades a profundidades de 2.5 metros, entonces si se quisieran realizar cimentaciones más profundas, esto sería un problema ya que seguramente se interceptarían.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

- Los resultados de los mapas gravimétricos obtenidos muestran zonas con altos contrastes de valores, lo que deriva en que existen cuerpos con densidades diferentes. El origen de los bajos gravimétricos (zonas en azul de los mapas de anomalía) se le atribuye principalmente a la presencia de oquedades en esas áreas.
- En los radargramas obtenidos con la antena de 300 MHz de las líneas 1-8 se pudieron visualizar profundidades de alcance que van desde los 1.6 metros a los 1.8 metros.
- En los radargramas obtenidos con la antena de 300 MHz de las líneas 9-14, así como los obtenidos en el cerro del Macuiltépetl se pudieron visualizar profundidades de alcance de entre 7 y 8 metros.
- En los radargramas obtenidos con la antena de 300 MHz de las líneas 15-22 junto con los 4 perfiles realizados dentro de la cueva se pudieron visualizar profundidades de alcance entre 14 y 15 metros.
- En los radargramas obtenidos con la antena de 300 MHz de las líneas H1 – H7 se pudieron visualizar profundidades de alcance de entre 1 y 2 metros.
- En los radargramas que se realizaron en calles paralelas al parque de la orquídea se pueden observar reflexiones correspondientes a cavidades y a tuberías que existen en esas áreas.
- El espectro de potencia radial permitió identificar los topes de los cuerpos geológicos generadores de las anomalías gravimétricas, las cuales se encuentran a profundidades de 13.4 m, 15.7 m y 7.8 m atribuidas a la presencia de oquedades.
- La deconvolución de Werner permitió determinar la distribución de las

fuentes generadoras de anomalías gravimétricas, así como su profundidad.

- Se identificaron 2 cavidades (adicionales a las ya conocidas) dentro del Parque de la Cueva de la Orquídea correlacionando la gravimetría, georadar y utilizando la deconvolución de Werner para el cálculo de las anomalías, las cuales tienen valores de 6.1 y 14.1 metros.
- Se identificaron oquedades en el exterior del Parque de la Cueva de la Orquídea, las cuales se encuentran señaladas a partir de la figura 5.60.

## 6.2 Recomendaciones

- Realizar otro estudio con georadar en la zona del parque de la Orquídea con una antena de frecuencia menor a 300 MHz para alcanzar mayores profundidades de análisis.
- Realizar estudio con otro método geofísico en las calles paralelas al Parque de la Cueva de la Orquídea. Considerando que estas calles no están pavimentadas, podría utilizarse la prospección eléctrica realizando tomografías con arreglo Wenner, el cual es sensible a cambios verticales en el subsuelo, para obtener resultados más precisos y complementar lo obtenido con georadar.
- Realizar un levantamiento topográfico en la zona del Parque de la Cueva de la Orquídea y en las calles paralelas para poder realizar la corrección topográfica junto con las demás correcciones gravimétricas y obtener mejores resultados en los mapas gravimétricos.
- Evitar sobrecargar el área aledaña al Parque de la Cueva de la Orquídea, absteniéndose a construir más casas, o más pisos sobre las ya existentes.
- En el caso de que se vaya a realizar alguna construcción, se debe realizar un estudio de mecánica de suelos y de rocas para asegurar que el suelo es de un material estable, que los cimientos de nuevas construcciones no interceptaran con oquedades y por lo tanto, que no habrá riesgo de colapso.
- Es necesario tomar en cuenta el grosor del techo de la cueva, ya que este se va adelgazando a medida que pasa el tiempo, debido a procesos artificiales y naturales, por ejemplo la meteorización interna de la cueva

debido a factores como la humedad, hace que rocas del techo de la cueva se vayan desprendiendo.

- En el caso de que se fuera a escavar en las partes en donde existen cavidades, tener precaución para no dañarlas ya que podrían tener en su interior objetos de importancia arqueológica; y si es el caso, se debe de tener la presencia del Instituto Nacional de Antropología e Historia ya que anteriormente la Cueva de la Orquídea era utilizada como centro ceremonial.

## BIBLIOGRAFÍA

- Basile, V. et al. (2000). A ground-penetrating radar survey for archaeological investigations in an urban area (Lecce, Italy). *Journal Applied Geophysics*, 44 (1), 15–32.
- Barrientos, J. (2015). Estudio experimental gravimétrico a escala reducida, para observar el efecto en la gravedad debido a una depresión geográfica. Tesis de licenciatura. Universidad de Concepción. Facultad de ciencias físicas y matemáticas.
- Bernal J. y Uruchurtu, G. (2011). Revelaciones de una cueva. *¿Cómo ves?*, 155, 10-14.
- Blakely, R. (1995). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press.
- Bristow, C.S. y Jol, H.M. (2003). Ground Penetrating Radar in Sediments. *The Geological Society*, 211(1), 1.
- Camacho et al. (1996). Detección gravimétrica de anomalías del subsuelo en una zona urbana afectada por hundimientos. *Física de la Tierra*, 8, 91-115.
- Chamon, N. y Dobereiner, L. (1998). An example of the uses of geophysical methods for the investigation of a cavern in sandstones. *Bulletin of the international Association of Engineering Geology*, 38, 37-43.
- Catanzariti, G et al. (2010). Técnicas no invasivas para el registro del patrimonio arqueológico. *Documentación gráfica del patrimonio*, 118-129.
- Colley, G. C. (1963) The detection of caves by gravity measurements. *Geophysical prospecting*, 11, 1-9.
- CONEVYT (s.f.). Regiones naturales del estado de Veracruz. México: CONEVYT. Recuperado de <http://bibliotecadigital.conevyt.org.mx/inea%5Cpdf%5C148%5C148008.pdf>
- Conyers, L.B. (2006) Ground-penetrating radar for archaeology, *Archaeological Prospection*, 13, 228-229.

- Crónica del Poder (2020). *La historia de “La Cueva de la Orquídea”, en el Xalapa antiguo*. Recuperado de: <https://cronicadelpoder.com/2020/06/03/la-historia-de-la-cueva-de-la-orquidea-en-el-xalapa-antiguo/>
- Daniels, D. J. (2004) *Ground penetrating radar*, 2da edición. Institution of Engineering and Technology.
- De Luna, F. (04 de febrero de 2018). Retoman investigación de siete entierros prehispánicos en Macuiltépetl. Hora Cero. Recuperado de <https://horacero.mx/2018/02/04/retoman-investigacion-de-7-entierros-prehispanicos-en-macuiltépetl/>
- Detay M. y Hróarsson B. (2011). Túneles de lava. *Investigación y ciencia*. 420, 62-67.
- Dobrin, M. (1952). *Introducción a la prospección geofísica*. 2da edición. Ediciones OMEGA, S. A.
- Fajkiewicz, Z. (1976). Gravity vertical gradient measurements for the detection of small geologic and anthropogenic forms. *Geophysics*, 41(5), 1016-1030.
- Gizzi, F. et al. (2010). Georadar investigations to detect cavities in a historical town damaged by an earthquake of the past. *Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union*, 24, 15-21.
- Gobierno Municipal de Xalapa (s.f.). Tercer informe de gobierno 2011-2013. Recuperado de [http://xalapa.gob.mx/transparencia1113/wp-content/uploads/2014/01/3o\\_Informe.pdf](http://xalapa.gob.mx/transparencia1113/wp-content/uploads/2014/01/3o_Informe.pdf)
- Gómez-Esteban G. P. (2012). Las ecuaciones de Maxwell. Recuperado de: <https://eltamiz.com/>
- González, W. (2006). *Compilación de datos magnéticos en el norte de Venezuela y el Caribe y un estudio de prueba en el Graben de Espino*. Trabajo de grado Universidad Simón Bolívar. Caracas.
- Granja, J. L., Carbó, A. y Muñoz-Martín, A. (2005). *Análisis de Mapas de Anomalías Gravimétricas en el Borde NE de la Placa Caribe*. Grupo de Tectonofísica Aplicada. Departamento de Geodinámica. Universidad Complutense de Madrid, 1-4.

- Harnold, W. (2012). Generación de un mapa de basamento de la cuenca Barinas-apure de Venezuela a partir de datos gravimétricos y magnéticos de origen satelital. Trabajo de grado Universidad Central de Venezuela
- Hinze, W. et al. (2005). New standards for reducing gravity data: The North American gravity database. *Geophysics*, (70) 4, J25–J32.
- INEGI (2017). Anuario estadístico y geográfico de Veracruz de Ignacio de la Llave 2017. México: INEGI. Recuperado de <http://ceieg.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/21/2018/04/AEGEV-2017.pdf>
- La cueva de la orquídea (2014). *Parque ecológico Macuiltépetl*. Recuperado de <https://macuiltépetl.org/2014/06/27/la-cueva-de-la-orquidea/>
- Leucci, G. y De Giorgi, L. (2010). Microgravimetric and ground penetrating radar geophysical methods to map the shallow karstic cavities network in a coastal area (Marina Di Capilungo, Lecce, Italy). *Exploration Geophysics*, 41, 178 -188.
- Lorenzo, E. y Cuéllar, V. (1995). Geofísica de alta resolución en ingeniería civil. Estudios en estructuras de hormigón utilizando geo-radar. *Física de la Tierra*, 7, 243-257.
- Micloth. (29 de agosto de 2016). La cueva de la Orquídea. *Monumentos del mundo*. Recuperado de <http://losmonumentosdelmundo.blogspot.com/2016/08/la-cueva-de-la-orquidea.html>.
- Miranda et al. (2011). Nuevos estándares en las correcciones de gravedad: estudio de caso para una red local en San Juan, Argentina. *Revista Geofísica*, 63, 59-77.
- Mironov, V. S. (1977). *Curso de prospección gravimétrica*. 1era edición. Reverté S.A.
- Milson, J. (2003). *Fiel Geophysics*. University Collage London, 3 ed.
- Montes, R. (5 de septiembre de 2019). Cueva de la Orquídea y cascadas de Xico, entre el descuido y el olvido. *El demócrata*, recuperado de:

<https://eldemocrata.com/cueva-de-la-orquidea-y-cascadas-de-xico-entre-el-descuido-y-olvido/>

- Pérez, G. M. (2001). *Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico*. Tesis de licenciatura, Universitat Politècnica de Catalunya, Departamento de ingeniería del terreno, cartográfica y geofísica.
- Richarte et al. (2007). Prospección gravimétrica en la terminación norte del frente montañoso de las Béticas. *Iniciación a la investigación*, 2, 1-9.
- Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. 2nd ed. Wiley Blackwell.
- Roa, R. E. (2015). *Evaluación de la técnica de prospección mediante el uso de Georradar*. Tesis de Maestría Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería.
- Rousset et al. (1998). Detection and characterization of near surface small karstic cavities using integrated geophysical surveys. *IV Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society*, 14-17.
- Salucci, et al. (2014). Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar Recent Advances @ the ELEDIA Research Center. *Geophysical Research Abstracts*, 16, 2.
- Sánchez, A. (2005). *Corrección Topográfica de Datos Gravimétricos utilizando Modelos de Elevación Digital*. Tesis de Licenciatura UNAM. División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería.
- Sánchez, M. (2012). *Interpretación de datos gravimétricos y magnetométricos en las inmediaciones del volcán Popocatepetl*. Tesis de Licenciatura UNAM, División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. Facultad de Ingeniería.
- SECTUR (2014). Agendas de competitividad de los destinos turísticos de México 2013-2018. Recuperado de <http://www.sectur.gob.mx/wp-content/uploads/2015/02/PDF-Xalapa.pdf>
- SEFIPLAN (2016). Secretaría de Finanzas y Planeación del Estado de Veracruz. Sistema de información municipal. Cuadernillos municipales,

2016. Xalapa. México: Gobierno del estado de Veracruz. Recuperado de:  
<http://ceieg.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/21/2016/05/Xalapa.pdf>

- Seigel, H. (1995). *A guide to high precision land gravimeter surveys*, Scintrex Ltd., Concord, Ontario, Canadá.
- Smith, J. (1975). *Temas de Geofísica* (1ra ed.). Reverté S. A.
- Spector, A. and Grant, F.S., 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35:293-302.
- Styles et al. (2005). The use of microgravity for cavity characterization in karstic terrains, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 38, 155-169.
- Syaifuddin, F. y Hendro, A. (2014). Cavities detection with ground penetrating radar in limestone dominated rock formation. *Geophysical Engineering, Institute of Technology Sepuluh Nopember*. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/29443107>
- Telford, M et al. (1990). *Applied Geophysics*. 2nd ed. Cambridge University Press.
- Torres, A. (2002). Estructura de la subducción de Oaxaca a partir de datos gravimétricos. Tesis de Licenciatura IPN. Escuela superior de ingeniería y arquitectura.
- Turismo-Veracruz (2020). Cueva de la Orquídea. Recuperado de [https://www.turismo-veracruz.com/portal/art576\\_Cueva\\_de\\_la\\_Orquidea.html](https://www.turismo-veracruz.com/portal/art576_Cueva_de_la_Orquidea.html)
- Universidad Católica de Murcia. Métodos de investigación geofísica. Georadar-ground penetrating radar (GPR). Recuperado de: [https://basaltoit.com/wp-content/uploads/dossier-gpr\\_ucam.pdf](https://basaltoit.com/wp-content/uploads/dossier-gpr_ucam.pdf)
- Werner, S., (1953) Interpretation of magnetic anomalies at sheet like bodies: *Sveriges Geol. Undersok., Ser. C, Arsbok*. 43 1949, no. 6.
- Yáñez, G. (2012) Túneles de Xalapa. Cueva de la Orquídea. Recuperado de: <https://tunelesdexalapa.blogspot.com/2012/>

## ANEXOS

### ANEXO A.1 Tabla de lecturas gravimétricas obtenidas el 23 de agosto de 2019

<b>Lecturas gravimétricas obtenidas el 23 de agosto de 2019</b>					
<b>Punto</b>	<b>Coordenada N</b>	<b>Coordenada E</b>	<b>Hora</b>	<b>Lectura</b>	<b>Desviación estándar</b>
<b>Base</b>	2162519	14718643	12:23:00	4123.189	0.016
			12:29:04	4123.155	0.016
<b>1</b>	2162522.81	718638.91	12:43:04	4123.147	0.019
			12:45:23	4123.167	0.019
<b>2</b>	2162525.9	718635.63	12:48:47	4123.146	0.017
			12:50:21	4123.137	0.016
<b>3</b>	2162529.39	718631.94	12:53:16	4123.106	0.021
			12:54:57	4123.109	0.018
<b>4</b>	2162532.54	718628.14	12:58	4123.091	0.016
			13:00:35	4123.04	0.016
<b>5</b>	2162535.87	718624.36	13:04:52	4123.124	0.017
			13:06:39	4123.131	0.017
<b>6</b>	2162538.66	718620.59	13:10:25	4123.175	0.021
			13:13:19	4123.198	0.02
<b>7</b>	2162542.07	718616.48	13:15:32	4123.195	0.016
			13:17:06	4123.229	0.02
<b>8</b>	2162545.01	718612.78	13:19:40	4123.211	0.015
			13:21:36	4123.203	0.017
<b>9</b>	2162547.41	718609.22	13:25:40	4123.168	0.015
			13:28:36	4123.179	0.017
<b>10</b>	2162550.38	718605.84	13:30:28	4123.241	0.02
			13:33:21	4123.266	0.017
<b>Base</b>	2162519	14718643	13:37:23	4123.166	0.016
			13:39:36	4123.219	0.017
<b>11</b>	2162554.66	718609.77	13:43:23	4123.082	0.016
			13:45:16	4123.075	0.017
<b>12</b>	2162551.92	718613.29	13:49:27	4123.291	0.018
			13:51:29	4123.414	0.019
<b>13</b>	2162548.36	718617.23	13:57:08	4123.414	0.019
			14:00:37	4123.224	0.02
<b>14</b>	2162545.38	718621.32	14:03:32	4123.195	0.017
			14:05:40	4123.281	0.019
<b>15</b>	2162541.67	718625.69	14:09:30	4123.22	0.017
			14:11:16	4123.28	0.016
<b>16</b>	2162538.67	718629.62	14:16:54	4123.013	0.018
<b>17</b>	2162535.43	718633.3	14:24:10	4122.968	0.018

			14:26:27	4123.102	0.023
<b>18</b>	2162531.76	718637.56	14:32:10	4123.065	0.019
			14:35:32	4123.043	0.03
<b>19</b>	2162529	718642	14:41:35	4123.057	0.015
			14:43:47	4123.04	0.015
<b>Base</b>	2162519	14718643	14:47:18	4123.217	0.907
			14:49:39	4123.252	0.015
<b>Base</b>	2162519	14718643	17:35:02	4123.268	0.02
			17:37:00	4123.309	0.016
<b>20</b>	2162527	718643	17:41:14	4123.268	0.025
			17:43:22	4123.223	0.02
<b>21</b>	2162525	718645	17:48:14	4123.275	0.029
			17:50:18	4123.171	0.022
<b>22</b>	2162513	718654	18:00:12	4123.171	0.031
			18:02:31	4123.149	0.019
<b>23</b>	2162518	718656	18:06:12	4123.156	0.016
			18:07:56	4123.211	0.012
<b>24</b>	2162523	718658	18:12:10	4123.082	0.024
			18:14:02	4123.107	0.044
<b>25</b>	2162529	718657	18:18:04	4123.907	0.049
			18:19:52	4123.024	0.025
<b>26</b>	2162523	718654	18:22:38	4122.941	0.019
			18:24:25	4122.918	0.028
<b>27</b>	2162518	718651	18:27:17	4123.202	0.02
			18:24:03	4123.169	0.021
<b>28</b>	2162530	718646	18:32:27	4122.458	0.053
			18:34:35	4123.261	0.025
<b>29</b>	2162532	718643	18:37:28	4123.16	0.015
			18:39:04	4123.178	0.015
<b>30</b>	2162535	718640	18:42:10	4123.145	0.016
			18:44:06	4123.127	0.024
<b>31</b>	2162537	718636	18:46:44	4123.093	0.127
			18:48:46	4123.052	0.014
<b>32</b>	2162540	718633	18:52:14	4122.729	0.036
			18:54:13	4122.942	0.022
<b>33</b>	2162542	718630	18:56:53	4123.076	0.014
			18:59:49	4123.107	0.018
<b>34</b>	2162544	718627	19:04:20	4123.135	0.015
			19:06:20	4123.113	0.02
<b>35</b>	2162546	718624	19:11:37	4122.953	0.043
			19:13:52	4122.861	0.04

<b>36</b>	2162549	718621	19:16:57	4123.346	0.017
			19:18:47	4123.395	0.013
<b>37</b>	2162551	718618	19:23:07	4123.383	0.017
			19:24:52	4123.39	0.015
<b>38</b>	2162553	718616	19:28:02	4123.155	0.015
			19:29:52	4123.244	0.016
<b>Base</b>	2162519	14718643	19:34:12	4123.246	0.013
			19:35:39	4123.248	0.015

ANEXO A.2 Tabla de lecturas gravimétricas obtenidas el 24 de agosto de 2019

<b>Punto</b>	<b>Coordenada N</b>	<b>Coordenada E</b>	<b>Hora</b>	<b>Lectura</b>	<b>Desviación estándar</b>
<b>Base</b>	2162519	14718643	09:11:32	4123.435	0.016
			09:13:34	4123.437	0.014
<b>39</b>	2162554	718611	09:18:30	4123.301	0.017
			09:20:19	4123.242	0.022
<b>1440</b>	2162552	718616	09:23:27	4123.312	0.015
			09:25:13	4123.325	0.013
<b>41</b>	2162550	718620	09:28:13	4123.271	0.02
			09:30:00	4123.298	0.023
<b>42</b>	2162548	718623	09:33:01	4123.399	0.021
			09:35:22	4123.383	0.02
<b>43</b>	2162546	718626	09:37:55	4123.294	0.028
			09:39:54	4123.342	0.021
<b>44</b>	2162547	718641	09:43:48	4123.427	0.016
			09:46:02	4123.294	0.016
<b>45</b>	2162546	718643	09:49:19	4123.291	0.015
			09:51:11	4123.211	0.016
<b>46</b>	2162556	718613	09:54:38	4123.268	0.015
			09:56:38	4123.264	0.015
<b>47</b>	2162554	718616	09:59:27	4123.165	0.015
			10:01:09	4123.129	0.017
<b>48</b>	2162553	718619	10:03:48	4123.179	0.018
			10:05:24	4123.226	0.015
<b>49</b>	2162551	718623	10:07:57	4123.116	0.02
			10:09:37	4123.121	0.017
<b>50</b>	2162549	718626	10:13:09	4123.071	0.019
			10:14:48	4123.073	0.018
<b>51</b>	2162547	718630	10:18:38	4122.744	0.016

			10:20:15	4122.759	0.019
<b>52</b>	2162539	718661	10:24:46	4123.336	0.017
			10:26:34	4123.375	0.017
<b>53</b>	2162541	718658	10:29:03	4123.474	0.018
			10:30:52	4123.754	0.016
<b>54</b>	2162543	718654	10:35:18	4123.146	0.014
			10:37:55	4123.257	0.016
<b>55</b>	2162545	718650	10:39:16	4123.086	0.025
			10:41:03	4123.166	0.012
<b>Base</b>	2162519	14718643	10:43:45	4123.549	0.015
			10:45:54	4123.512	0.018
<b>56</b>	2162538	718668	10:56:13	4123.358	0.015
			10:57:56	4122.401	0.024
<b>57</b>	2162542	718664	11:01:55	4122.239	0.014
			11:04:22	4123.292	0.021
			11:06:37	4123.333	0.018
<b>58</b>	2162543	718661	11:11:16	4123.26	0.025
			11:13:36	4123.324	0.022
<b>59</b>	2162545	718659	11:16:27	4123.247	0.022
			11:18:44	4123.122	0.064
<b>60</b>	2162547	718656	11:21:33	4123.043	0.034
			11:24:42	4123.007	0.017
<b>61</b>	2162548	718662	11:24:03	4123.233	0.032
			11:30:53	4123.266	0.023
<b>62</b>	2162551	718662	11:34:32	4123.377	0.015
			11:36:31	4123.217	0.049
<b>63</b>	2162536	718665	11:39:46	4123.694	0.016
			11:41:25	4123.659	0.014
<b>64</b>	2162530	718668	11:44:23	4123.837	0.018
			11:46:02	4123.844	0.013
<b>65</b>	2162524	718667	11:48:44	4123.93	0.018
			11:50:24	4123.933	0.019
<b>66</b>	2162519	718665	11:52:47	4123.881	0.016
			11:54:25	4123.892	0.018
<b>67</b>	2162515	718664	11:57:07	4123.9	0.01
			11:58:45	4123.935	0.013
<b>68</b>	2162511	718659	12:01:46	4123.818	0.018
			12:03:33	4123.808	0.015
<b>69</b>	2162508	718656	12:06:29	4123.805	0.022
			12:08:13	4123.768	0.017
<b>70</b>	2162506	718652	12:11:51	4123.679	0.016

			12:13:36	4123.68	0.014
<b>71</b>	2162509	718650	12:16:05	4123.623	0.015
			12:18:10	4123.708	0.014
<b>72</b>	2162511	718649	12:21:20	4123.644	0.016
			12:23:10	4123.59	0.019
<b>Base</b>	2162519	14718643	12:25:52	4123.56	0.016
			12:27:37	4123.56	0.014
<b>73</b>	2162515	718652	12:32:13	4123.874	0.017
			12:33:47	4123.909	0.016
<b>74</b>	2162519	718657	12:38:45	4124.803	0.014
			12:40:41	4124.135	0.019
<b>75</b>	2162521	718659	12:44:54	4123.707	0.026
			12:46:41	4123.788	0.017
<b>76</b>	2162524	718661	12:49:05	4123.683	0.015
			12:50:52	4124.113	0.054
<b>77</b>	2162529	718662	12:53:43	4123.709	0.024
			12:55:47	4124.936	0.017
<b>78</b>	2162535	718663	12:59:46	4124.494	0.026
			13:01:30	4123.506	0.016
<b>79</b>	2162527	718659	13:04:13	4,123,876	0.018
			13:06:00	4,123,847	0.03
<b>80</b>	2162528	718657	13:15:00	4,123,826	0.018
			13:16:45	4,123,836	0.016
<b>81</b>	2162552	718624	13:24:17	4,122,911	0.017
			13:27:39	4,122,801	0.02
<b>82</b>	2162551	718626	13:31:46	4,122,638	0.03
			13:34:46	4,122,708	0.014
			13:38:00	4,122,854	0.044
<b>83</b>	2162551	718629	13:41:32	4,122,564	0.051
			13:43:29	4,122,836	0.017
<b>84</b>	2162555	718630	13:47:14	4,122,739	0.016
			13:49:12	4,122,704	0.018
<b>85</b>	2162560	718633	13:52:12	4,123,063	0.052
			13:54:00	4,122,996	0.018
<b>86</b>	2162551	718636	13:57:07	4,122,838	0.017
			13:58:55	4,122,878	0.02
<b>87</b>	2162556	718639	14:01	4122.98	0.053
			14:03:41	4,122,943	0.051
<b>88</b>	2162551	718641	14:06:21	4,122,144	0.022
			14:08:23	4,122,822	0.018
<b>89</b>	2162551	718643	14:11:16	4,122,648	0.026

			14:12:53	4,122,758	0.015
<b>90</b>	2162551	718648	14:15:38	4,122,769	0.015
			14:17:20	4,122,773	0.031
			14:21:57	4,122,805	0.089
<b>91</b>	2162550	718651	14:24:47	4,122,923	0.128
			14:26:47	4,122,863	0.017
<b>92</b>	2162548	718655	14:30:53	4,122,911	0.094
			14:32:46	4,123,001	0.021
<b>Base</b>	2162519	14718643	14:36:48	4,123,674	0.017
			14:38:20	4,123,722	0.016
<b>93</b>	2162544	718672	14:43:11	4,123,365	0.013
			14:45:10	4,123,397	0.013
<b>94</b>	2162548	718670	14:48:50	4,123,432	0.016
			14:52:36	4,123,347	0.05
<b>95</b>	2162550	718667	14:57:14	4,123,511	0.021
			14:58:56	4,123,531	0.025
<b>96</b>	2162555.56	718662.94	15:02:22	4,123,604	0.017
			15:04:05	4,123,636	0.014
<b>97</b>	2162557.73	718658.03	15:06:30	4123.66	0.015
			15:08:20	4,123,747	0.02
<b>98</b>	2162557.82	718652.53	15:10:36	4,123,817	0.017
			15:12:22	4,123,753	0.012
<b>99</b>	2162559.17	718647.54	15:18:32	4,123,714	0.026
			15:20:07	4,123,709	0.017
<b>100</b>	2162558.8	718642.22	15:23:21	4,123,731	0.013
			15:25:00	4,123,757	0.02
<b>101</b>	2162559.24	718637.33	15:27:20	4,123,772	0.014
			15:28:57	4,123,826	0.017
<b>102</b>	2162560.35	718632.22	15:31:51	4,123,926	0.019
			15:33:39	4,123,938	0.017
<b>103</b>	2162560.18	718627.42	15:37:25	4,124,559	0.012
			15:39:11	4,124,229	0.014
<b>104</b>	2162561.13	718622.59	15:41:37	4,124,165	0.012
			15:43:21	4,124,175	0.013
<b>105</b>	2162561.53	718618.72	15:48:16	4,123,896	0.015
			15:49:46	4,123,917	0.012
<b>106</b>	2162562	718615	15:52:44	4,123,791	0.015
			15:54:21	4,123,801	0.013
<b>107</b>	2162510	718633	15:57:50	4,123,709	0.017
			15:59:28	4,123,728	0.018

ANEXO B Tabla de correcciones gravimétricas.

Punto	x	y	Elevación m	Elev diff (datum @ base)	Datos corregidos por deriva instrumental (Gravedad observada - drift)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	g/cm <sup>3</sup>	Datos corregidos relative de datum	lat change in m	Gravidad teórica o lat effect (mgals)	FA effect (mgals)	Corrección n de Bouguer (mgals)	Anomalia de aire libre	Anomalia de Bouguer
Base	19.545506	-96.916103	1448.33	0.00	4123.17			0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	19.545534	-96.916150	1448.63	0.30	4123.151875	2670	2.67	-0.02	3.16	0.003	0.092	0.033	0.069	0.036
2	19.545570	-96.916172	1448.63	0.30	4123.134951	2670	2.67	-0.04	7.15	0.006	0.092	0.033	0.049	0.016
3	19.545602	-96.916207	1448.63	0.30	4123.099528	2670	2.67	-0.07	10.71	0.009	0.092	0.033	0.011	-0.022
4	19.545631	-96.916243	1448.04	0.51	4123.056104	2670	2.67	-0.12	13.92	0.011	0.159	0.058	0.032	-0.026
5	19.545661	-96.916279	1448.50	0.17	4123.116396	2670	2.67	-0.06	17.25	0.014	0.052	0.019	-0.017	-0.036
6	19.545687	-96.916314	1448.53	0.20	4123.173688	2670	2.67	0.00	20.14	0.016	0.062	0.023	0.048	0.025
7	19.545718	-96.916353	1448.50	0.17	4123.197764	2670	2.67	0.03	23.58	0.019	0.052	0.019	0.059	0.040
8	19.545745	-96.916388	1448.50	0.17	4123.191625	2670	2.67	0.02	26.58	0.021	0.052	0.019	0.051	0.032
9	19.545767	-96.916421	1448.50	0.17	4123.156132	2670	2.67	-0.02	29.02	0.023	0.052	0.019	0.013	-0.006
10	19.545794	-96.916453	1448.00	0.27	4123.234993	2670	2.67	0.06	32.02	0.026	0.083	0.030	0.121	0.091
11	19.545832	-96.916415	1448.50	0.17	4123.324044	2670	2.67	-0.12	36.24	0.029	0.052	0.019	-0.094	-0.113
12	19.545807	-96.916382	1448.79	0.46	4123.32408	2670	2.67	0.15	33.46	0.027	0.141	0.051	0.267	0.216
13	19.545775	-96.916345	1449.33	1.00	4123.2865	2670	2.67	0.11	29.91	0.024	0.309	0.112	0.400	0.288
14	19.545747	-96.916306	1449.16	0.83	4123.2019	2670	2.67	0.03	26.80	0.021	0.258	0.093	0.286	0.173
15	19.545713	-96.916265	1449.33	1.00	4123.2103	2670	2.67	0.04	23.03	0.018	0.309	0.112	0.329	0.217
16	19.545686	-96.916228	1448.70	0.37	4122.9697	2670	2.67	-0.20	20.03	0.016	0.116	0.042	-0.103	-0.145
17	19.545656	-96.916193	1448.08	0.35	4122.9863	2670	2.67	-0.19	16.70	0.013	0.107	0.039	-0.092	-0.131
18	19.545623	-96.916153	1448.63	0.30	4123.0005	2670	2.67	-0.17	13.04	0.010	0.092	0.033	-0.090	-0.123
19	19.545597	-96.916111	1448.67	0.34	4122.9896	2670	2.67	-0.18	10.15	0.008	0.103	0.038	-0.087	-0.125
20	19.545579	-96.916102	1448.66	0.33	4123.13111	2670	2.67	-0.04	8.15	0.007	0.101	0.037	0.053	0.017
21	19.545561	-96.916083	1448.34	0.01	4123.111072	2670	2.67	-0.06	6.15	0.005	0.002	0.001	-0.064	-0.064
22	19.545451	-96.915999	1447.34	-0.99	4123.052292	2670	2.67	-0.12	-6.06	-0.005	-0.307	-0.111	-0.422	-0.311
23	19.545496	-96.915979	1446.50	-1.83	4123.077903	2670	2.67	-0.09	-1.06	-0.001	-0.565	-0.205	-0.658	-0.453
24	19.545441	-96.915960	1446.50	-1.83	4122.991013	2670	2.67	-0.18	3.93	0.003	-0.565	-0.205	-0.749	-0.544
25	19.545395	-96.915968	1447.34	-0.99	4123.363771	2670	2.67	0.19	9.93	0.008	-0.306	-0.111	-0.123	-0.011
26	19.545442	-96.915998	1447.17	-1.16	4122.89553	2670	2.67	-0.34	4.05	0.003	-0.359	-0.130	-0.705	-0.575
27	19.545497	-96.916027	1447.17	-1.16	4123.086233	2670	2.67	-0.09	-0.95	-0.001	-0.359	-0.130	-0.444	-0.314
28	19.545606	-96.916073	1448.34	0.01	4122.763047	2670	2.67	-0.41	11.15	0.009	0.004	0.002	-0.414	-0.415
29	19.545624	-96.916101	1448.67	0.34	4123.074305	2670	2.67	-0.10	13.15	0.011	0.103	0.038	-0.005	-0.042
30	19.545652	-96.916130	1448.85	0.52	4123.043064	2670	2.67	-0.13	16.26	0.013	0.160	0.058	0.018	-0.040

31	19.545670	-96.916167	1449.14	0.81	4122.98097	2670	2.67	-0.19	18.25	0.015	0.251	0.091	0.046	-0.045
32	19.545697	-96.916196	1449.50	1.17	4122.746081	2670	2.67	-0.43	21.25	0.017	0.361	0.131	-0.082	-0.213
33	19.545716	-96.916224	1449.37	1.04	4123.003839	2670	2.67	-0.17	23.36	0.020	0.321	0.116	0.134	0.017
34	19.545734	-96.916252	1449.66	1.33	4123.038801	2670	2.67	-0.13	25.36	0.020	0.410	0.149	0.257	0.108
35	19.545753	-96.916281	1449.66	1.33	4122.824263	2670	2.67	-0.35	27.47	0.022	0.410	0.149	0.040	-0.109
36	19.545780	-96.916309	1449.82	1.49	4123.289521	2670	2.67	0.12	30.46	0.024	0.459	0.167	0.553	0.386
37	19.545798	-96.916337	1449.66	1.33	4123.307631	2670	2.67	0.14	32.46	0.026	0.412	0.149	0.521	0.372
38	19.545817	-96.916356	1448.87	0.54	4123.122339	2670	2.67	-0.05	34.57	0.028	0.168	0.061	0.090	0.030
39	19.545826	-96.916404	1448.50	0.17	4123.000391	2670	2.67	-0.17	35.57	0.028	0.052	0.019	-0.148	-0.167
40	19.545808	-96.916356	1448.85	0.52	4123.042174	2670	2.67	-0.13	33.57	0.027	0.161	0.058	0.004	-0.054
41	19.545789	-96.916318	1449.82	1.49	4123.003038	2670	2.67	-0.17	31.46	0.025	0.459	0.167	0.265	0.099
42	19.545771	-96.916290	1449.67	1.34	4123.104402	2670	2.67	-0.07	29.46	0.024	0.412	0.149	0.321	0.172
43	19.545752	-96.916262	1449.83	1.50	4123.027293	2670	2.67	-0.14	27.36	0.022	0.463	0.168	0.297	0.129
44	19.545760	-96.916119	1449.83	1.50	4123.063663	2670	2.67	-0.11	28.24	0.023	0.464	0.168	0.333	0.165
45	19.545751	-96.916100	1449.66	1.33	4122.947967	2670	2.67	-0.22	27.24	0.022	0.411	0.149	0.166	0.016
46	19.545844	-96.916384	1448.50	0.17	4122.957832	2670	2.67	-0.21	37.57	0.030	0.052	0.019	-0.192	-0.211
47	19.545826	-96.916356	1448.87	0.54	4122.833696	2670	2.67	-0.34	35.57	0.028	0.168	0.061	-0.199	-0.260
48	19.545816	-96.916328	1448.87	0.54	4122.885087	2670	2.67	-0.29	34.46	0.028	0.168	0.061	-0.147	-0.208
49	19.545798	-96.916290	1451.15	2.82	4122.796978	2670	2.67	-0.38	32.46	0.026	0.870	0.316	0.469	0.153
50	19.545779	-96.916261	1450.83	2.50	4122.745342	2670	2.67	-0.43	30.35	0.024	0.771	0.280	0.320	0.040
51	19.545761	-96.916223	1450.33	2.00	4122.418679	2670	2.67	-0.75	28.35	0.023	0.619	0.224	-0.157	-0.382
52	19.545685	-96.915929	1448.66	0.33	4123.016516	2670	2.67	-0.16	19.92	0.016	0.102	0.037	-0.069	-0.106
53	19.545704	-96.915957	1448.68	0.35	4123.270908	2670	2.67	0.10	22.03	0.018	0.108	0.039	0.189	0.150
54	19.545722	-96.915995	1449.16	0.83	4122.851217	2670	2.67	-0.32	24.03	0.019	0.257	0.093	-0.083	-0.176
55	19.545741	-96.916033	1449.30	0.97	4122.771609	2670	2.67	-0.40	26.13	0.021	0.300	0.109	-0.121	-0.230
56	19.545676	-96.915863	1448.34	0.01	4122.51724	2670	2.67	-0.65	18.92	0.015	0.004	0.002	-0.665	-0.667
57	19.545712	-96.915900	1448.66	0.33	4122.590382	2670	2.67	-0.58	22.92	0.018	0.102	0.037	-0.498	-0.535
58	19.545721	-96.915929	1449.01	0.68	4122.925402	2670	2.67	-0.25	23.91	0.019	0.209	0.076	-0.057	-0.133
59	19.545740	-96.915947	1449.14	0.81	4122.816456	2670	2.67	-0.36	26.02	0.021	0.251	0.091	-0.126	-0.216
60	19.545758	-96.915976	1449.83	1.50	4122.655221	2670	2.67	-0.52	28.02	0.022	0.463	0.168	-0.077	-0.244
61	19.545767	-96.915919	1449.15	0.82	4122.878564	2670	2.67	-0.29	29.02	0.023	0.253	0.092	-0.063	-0.155
62	19.545794	-96.915918	1448.85	0.52	4122.92375	2670	2.67	-0.25	32.02	0.026	0.160	0.058	-0.114	-0.172
63	19.545658	-96.915891	1447.84	-0.49	4123.301804	2670	2.67	0.13	16.92	0.014	-0.152	-0.055	-0.036	0.019
64	19.545603	-96.915863	1447.67	-0.66	4123.464358	2670	2.67	0.29	10.82	0.009	-0.204	-0.074	0.080	0.154
65	19.545549	-96.915874	1447.34	-0.99	4123.554201	2670	2.67	0.38	4.82	0.004	-0.306	-0.111	0.072	0.183
66	19.545504	-96.915893	1446.67	-1.66	4123.508044	2670	2.67	0.34	-0.17	0.000	-0.511	-0.185	-0.175	0.011
67	19.545468	-96.915903	1446.83	-1.50	4123.537887	2670	2.67	0.37	-4.17	-0.003	-0.463	-0.168	-0.094	0.074
68	19.545433	-96.915951	1447.16	-1.17	4123.431941	2670	2.67	0.26	-8.05	-0.006	-0.362	-0.131	-0.095	0.036
69	19.545406	-96.915980	1447.64	-0.69	4123.403995	2670	2.67	0.23	-11.05	-0.009	-0.212	-0.077	0.029	0.106
70	19.545388	-96.916019	1447.85	-0.48	4123.295549	2670	2.67	0.12	-13.05	-0.010	-0.148	-0.054	-0.014	0.040

71	19.545416	-96.916037	1447.71	-0.62	4123.280103	2670	2.67	0.11	-9.94	-0.008	-0.192	-0.070	-0.076	-0.007
72	19.545434	-96.916047	1447.64	-0.69	4123.230157	2670	2.67	0.06	-7.94	-0.006	-0.212	-0.077	-0.147	-0.071
73	19.545470	-96.916018	1447.17	-1.16	4123.496126	2670	2.67	0.32	-3.95	-0.003	-0.358	-0.130	-0.030	0.099
74	19.545505	-96.915970	1446.50	-1.83	4124.067305	2670	2.67	0.90	-0.06	0.000	-0.565	-0.205	0.331	0.535
75	19.545523	-96.915950	1446.50	-1.83	4123.339485	2670	2.67	0.17	1.94	0.002	-0.565	-0.205	-0.399	-0.194
76	19.545550	-96.915931	1446.50	-1.83	4123.485771	2670	2.67	0.31	4.93	0.004	-0.565	-0.205	-0.255	-0.050
77	19.545595	-96.915921	1447.16	-1.17	4123.905004	2670	2.67	0.73	9.93	0.008	-0.360	-0.130	0.365	0.496
78	19.545649	-96.915911	1447.83	-0.50	4123.576183	2670	2.67	0.40	15.92	0.013	-0.153	-0.056	0.238	0.294
79	19.545577	-96.915950	1446.84	-1.49	4123.432416	2670	2.67	0.26	7.93	0.006	-0.460	-0.167	-0.206	-0.039
80	19.545586	-96.915968	1447.34	-0.99	4123.391382	2670	2.67	0.22	8.93	0.007	-0.306	-0.111	-0.094	0.017
81	19.545807	-96.916280	1451.50	3.17	4122.405847	2670	2.67	-0.77	33.46	0.027	0.978	0.355	0.185	-0.169
82	19.545798	-96.916261	1451.50	3.17	4122.2737	2670	2.67	-0.90	32.46	0.026	0.978	0.355	0.054	-0.301
83	19.545797	-96.916233	1451.50	3.17	4122.231939	2670	2.67	-0.94	32.35	0.026	0.978	0.355	0.012	-0.342
84	19.545833	-96.916223	1451.50	3.17	4122.247118	2670	2.67	-0.92	36.35	0.029	0.978	0.355	0.024	-0.330
85	19.545878	-96.916193	1451.17	2.84	4122.549851	2670	2.67	-0.62	41.34	0.033	0.876	0.318	0.221	-0.097
86	19.545796	-96.916166	1451.17	2.84	4122.373084	2670	2.67	-0.80	32.24	0.026	0.875	0.317	0.051	-0.267
87	19.545841	-96.916137	1451.00	2.67	4122.47237	2670	2.67	-0.70	37.23	0.030	0.824	0.299	0.095	-0.204
88	19.545796	-96.916118	1450.34	2.01	4121.988603	2670	2.67	-1.18	32.24	0.026	0.621	0.225	-0.588	-0.813
89	19.545796	-96.916099	1450.17	1.84	4122.203336	2670	2.67	-0.97	32.24	0.026	0.566	0.205	-0.428	-0.633
90	19.545795	-96.916052	1449.67	1.34	4122.267122	2670	2.67	-0.90	32.13	0.026	0.413	0.150	-0.518	-0.668
91	19.545786	-96.916023	1449.50	1.17	4122.351361	2670	2.67	-0.82	31.13	0.025	0.361	0.131	-0.484	-0.615
92	19.545767	-96.915985	1449.83	1.50	4122.436321	2670	2.67	-0.74	29.02	0.023	0.463	0.168	-0.296	-0.464
93	19.545729	-96.915824	1448.51	0.18	4122.853228	2670	2.67	-0.32	24.80	0.020	0.056	0.020	-0.283	-0.303
94	19.545766	-96.915842	1448.65	0.32	4122.86021	2670	2.67	-0.31	28.91	0.023	0.099	0.036	-0.236	-0.272
95	19.545784	-96.915871	1448.66	0.33	4122.989685	2670	2.67	-0.18	30.91	0.025	0.100	0.036	-0.107	-0.143
96	19.545835	-96.915909	1448.50	0.17	4123.08742	2670	2.67	-0.08	36.57	0.029	0.052	0.019	-0.061	-0.080
97	19.545855	-96.915955	1448.50	0.17	4123.169907	2670	2.67	0.00	38.79	0.031	0.052	0.019	0.019	0.000
98	19.545856	-96.916008	1448.84	0.51	4123.250395	2670	2.67	0.08	38.90	0.031	0.156	0.057	0.203	0.147
99	19.545869	-96.916055	1450.55	2.22	4123.17487	2670	2.67	0.00	40.34	0.032	0.686	0.249	0.657	0.408
100	19.545866	-96.916106	1450.83	2.50	4123.206105	2670	2.67	0.03	40.01	0.032	0.772	0.280	0.774	0.494
101	19.545871	-96.916152	1451.15	2.82	4123.260093	2670	2.67	0.09	40.56	0.032	0.869	0.315	0.925	0.610
102	19.545881	-96.916201	1451.33	3.00	4123.39208	2670	2.67	0.22	41.67	0.033	0.926	0.336	1.113	0.777
103	19.545880	-96.916247	1450.83	2.50	4123.852562	2670	2.67	0.68	41.56	0.033	0.770	0.279	1.418	1.138
104	19.545889	-96.916292	1447.83	-0.50	4123.627549	2670	2.67	0.46	42.56	0.034	-0.155	-0.056	0.267	0.323
105	19.545893	-96.916329	1447.17	-1.16	4123.362278	2670	2.67	0.19	43.01	0.034	-0.360	-0.130	-0.204	-0.073
106	19.545898	-96.916365	1447.80	-0.53	4123.250765	2670	2.67	0.08	43.56	0.035	-0.164	-0.059	-0.120	-0.060

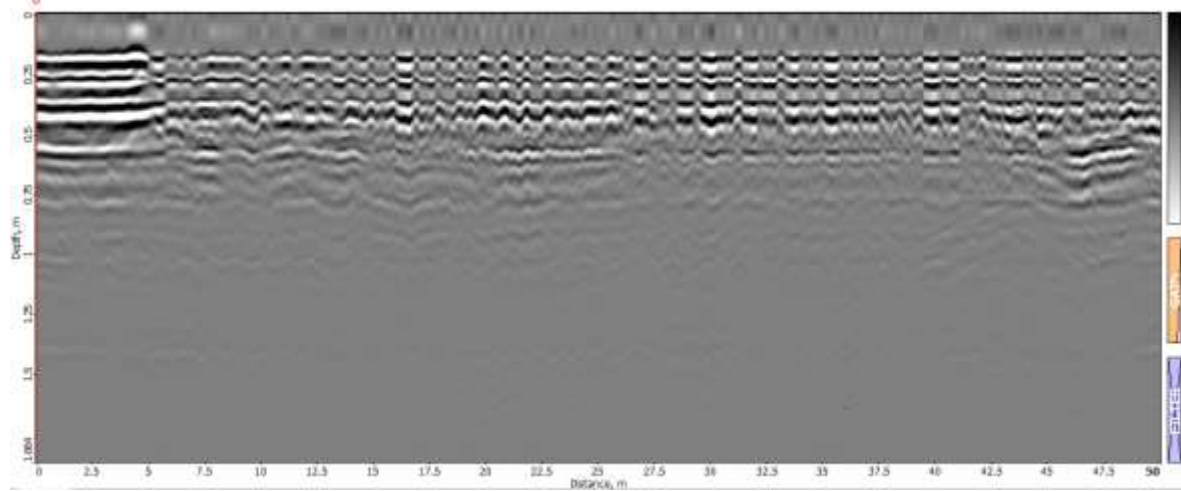
ANEXO C Coordenadas y profundidad de las líneas obtenidas con georadar.

Línea	Coordenada norte		Coordenada Este		Profundidad alcanzada en el radargrama
<b>Líneas en la zona del Parque de la Cueva de la Orquídea</b>					
	Inicial		Final		Metros
1	2182554	718812	2182522	718848	1.809
2	2182553	718811	2182544	718825	1.813
3	2182545	718838	2182544	718851	1.714
4	2182535	718836	2182537	718850	1.589
5	2182550	718846	2182541	718863	1.655
6	2182543	718855	2182543	718874	1.884
7	2182559	718855	2182550	718871	1.655
8	2182562	718855	2182561	718844	1.859
9	2182551	718551	2182553	718842	7.3
10	2182547	718547	2182559	718834	7.4
11	2182552	718552	2182557	718833	7.3
12	2182552	718552	2182552	718852	7.5
13	2182536	718536	2182515	718851	7.5
14	2182541	718865	2182509	718856	7.5
15	2182522	718866	2182529	718859	14.88
16	2182565	718800	2182556	718859	14.59
H1	2182542	718813	2182556	718820	1.813
H2	2182539	718821	2182545	718822	1.798
H3	2182531	718834	2182544	718832	1.865
H4	2182532	718838	2182546	718841	1.784
H5	2182530	718840	2182544	718846	1.787
H6	2182543	718842	2182551	718862	1.761
H7	2182510	718861	2182541	718873	1.619
<b>Líneas externas al Parque de la Cueva de la Orquídea</b>					
17	2182524	718836	2182481	718813	14.88
18	2182995	718885	2182538	718809	14.71

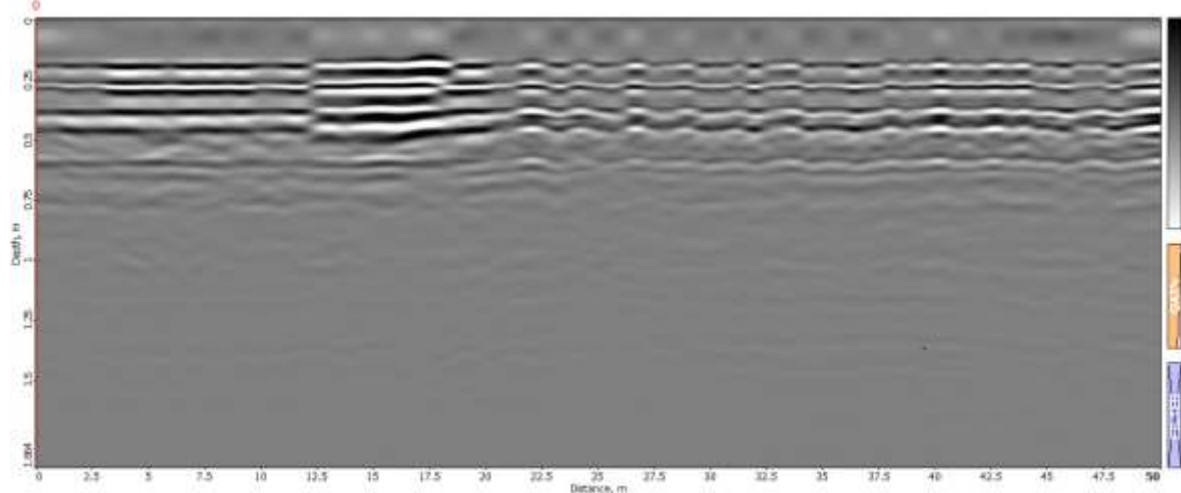
19	2162590	718725	2162538	718609	14.62
20	2162595	718779	2162543	718674	14.77
21	2162543	718774	2162464	718739	14.71
22	2162464	718739	2162549	718776	14.62

ANEXO D Radargramas

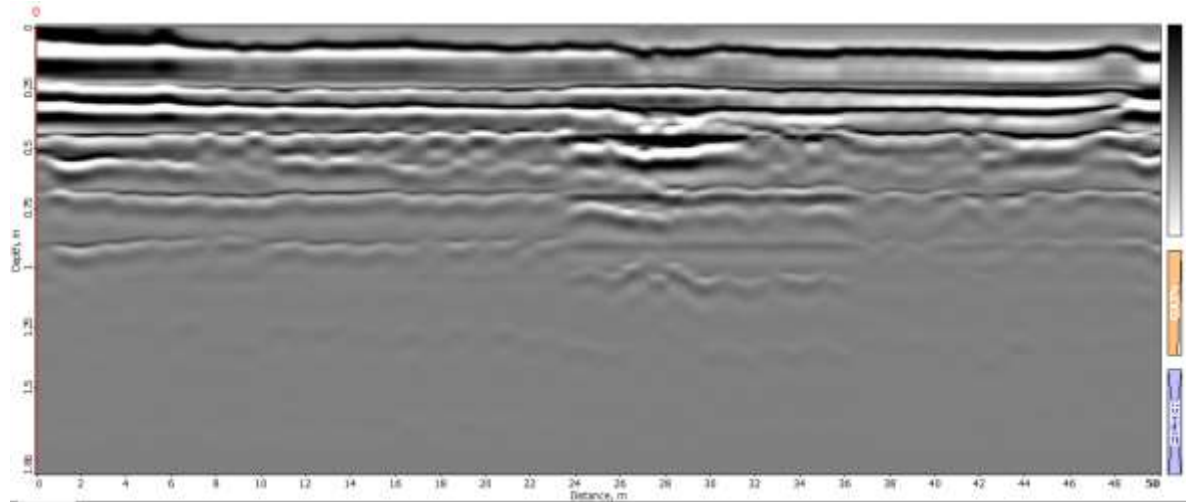
Anexo D.1 Radargrama de la línea 1 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.



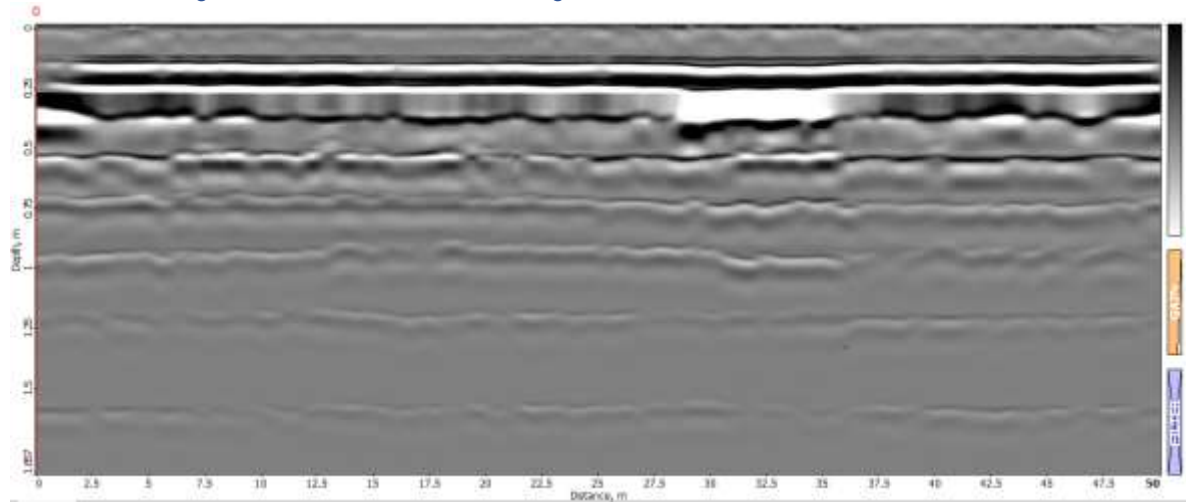
Anexo D.2 Radargrama de la línea 2 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.



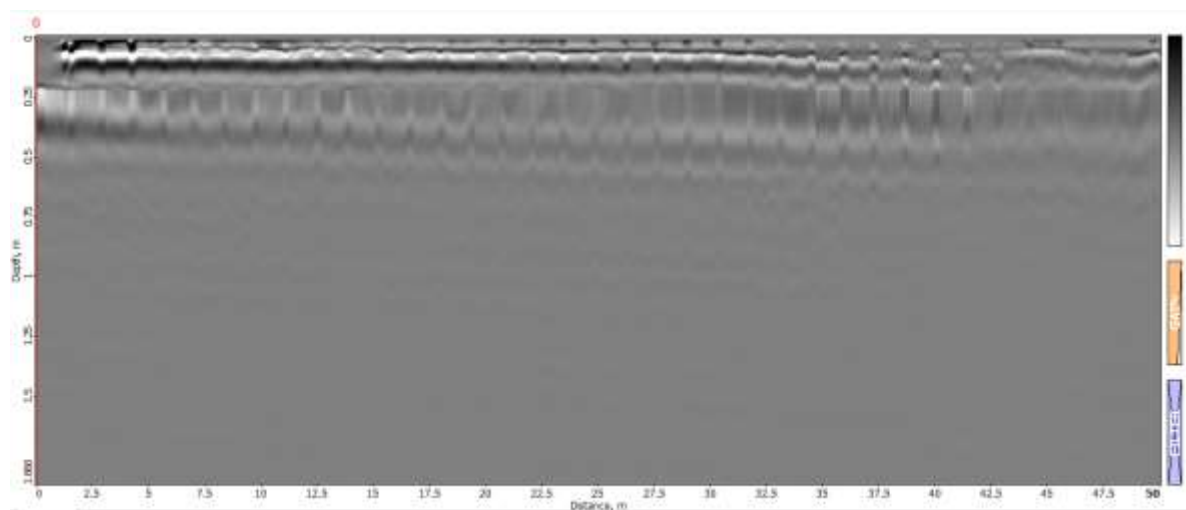
Anexo D.3 Radargrama de la línea 3 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.



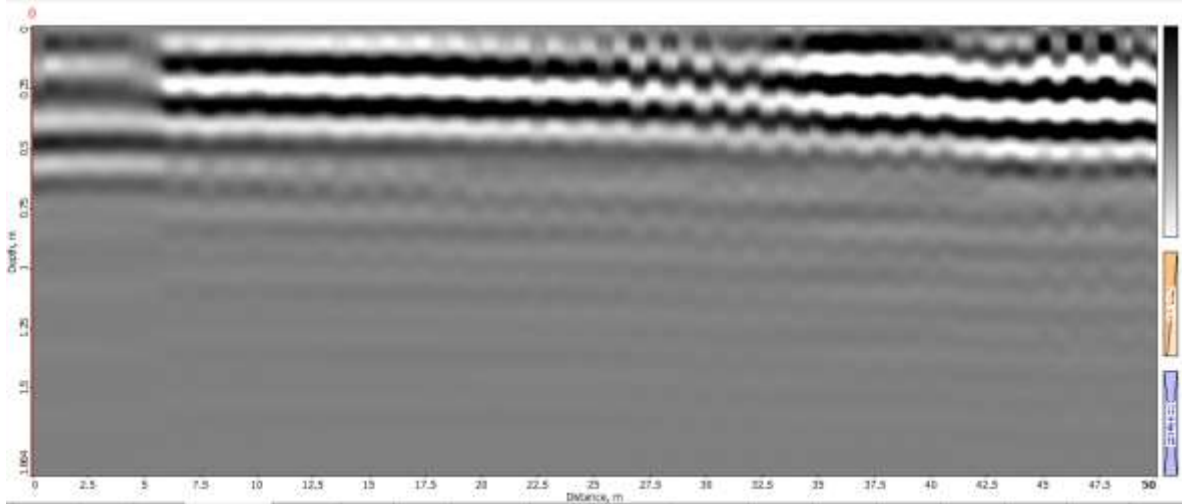
Anexo D.4 Radargrama de la línea 4 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.



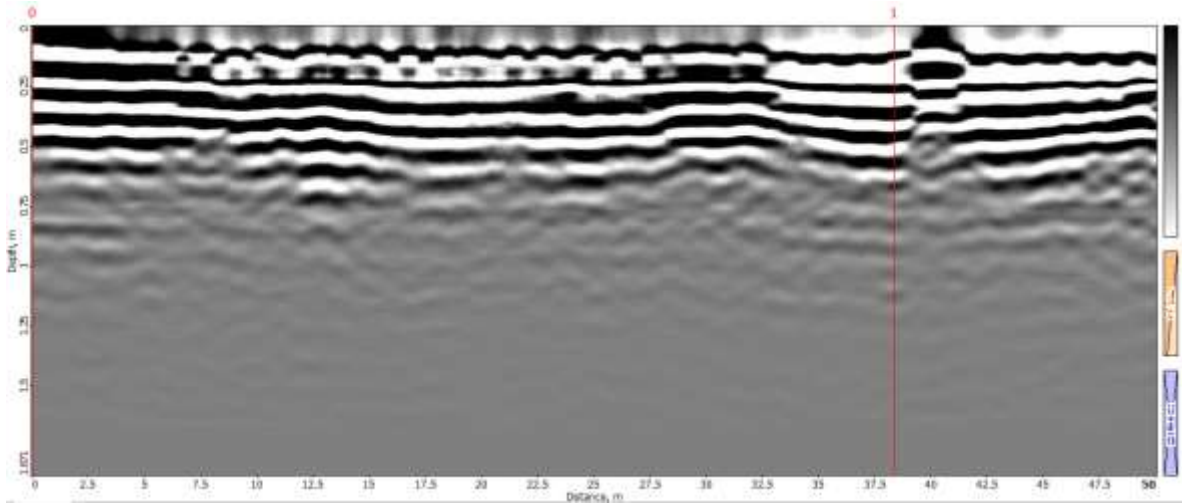
Anexo D.5 Radargrama de la línea 5 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.



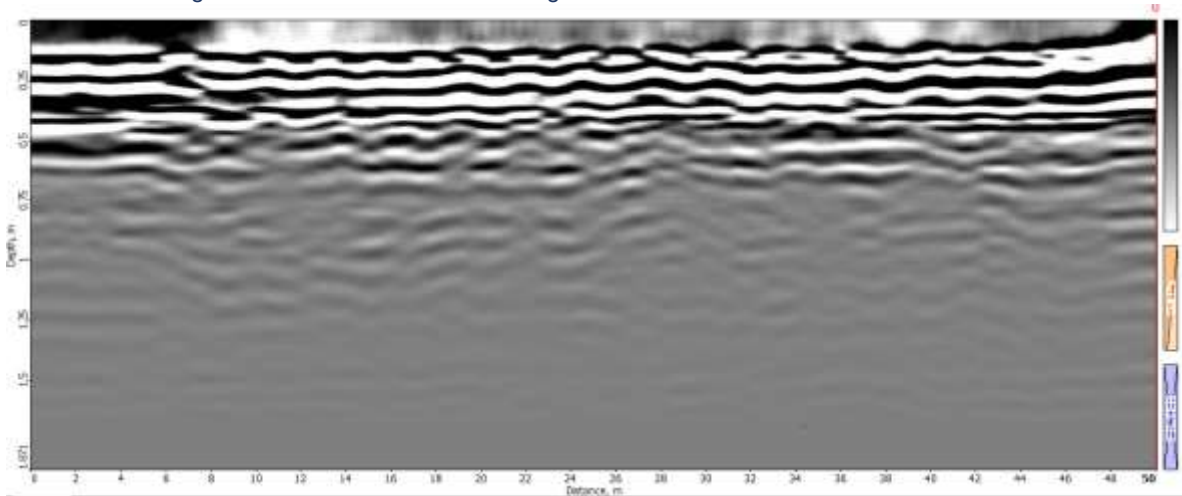
Anexo D.6 Radargrama de la línea 6 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.



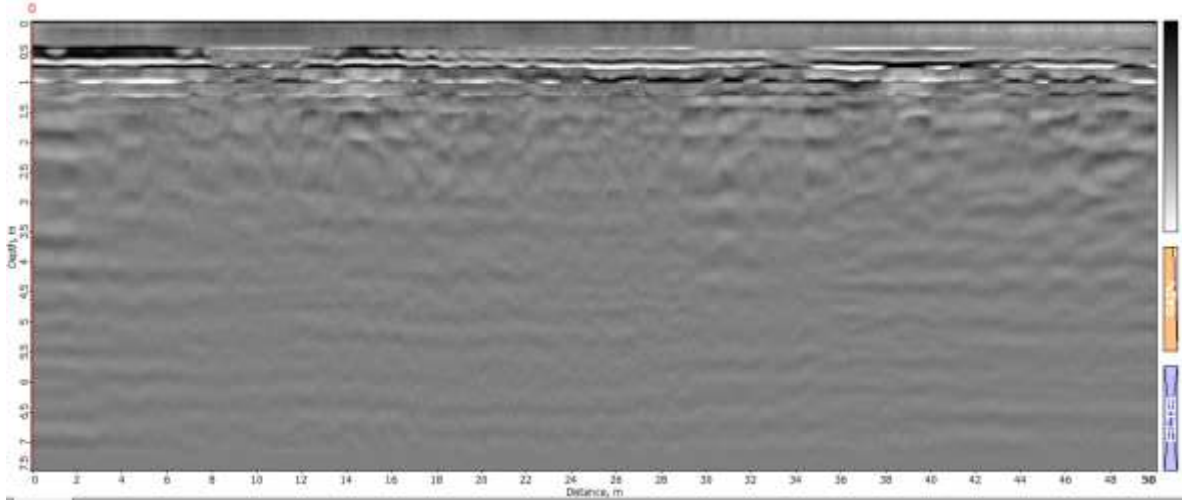
Anexo D.7 Radargrama de la línea 7 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.



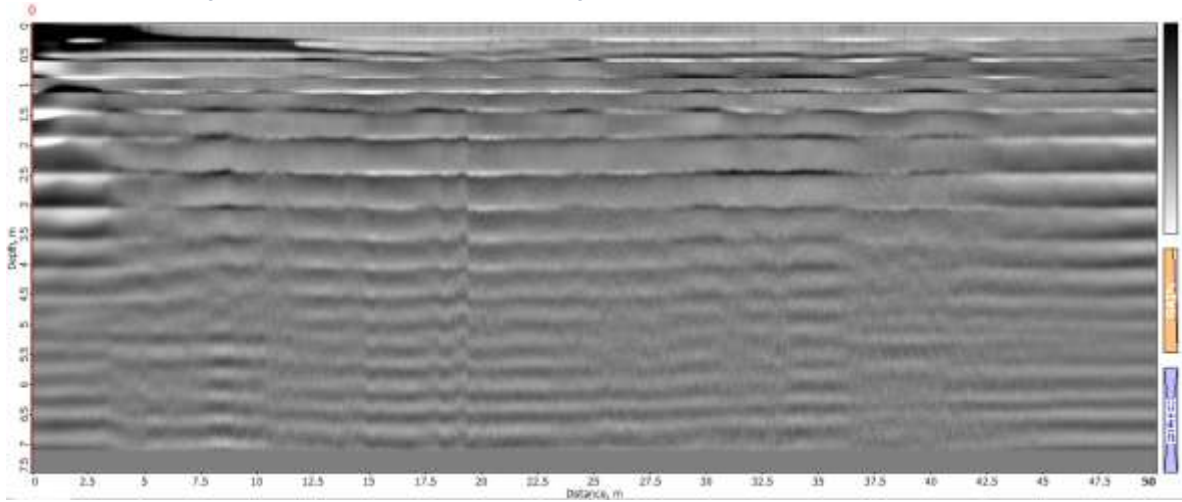
Anexo D.8 Radargrama de la línea 8 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.



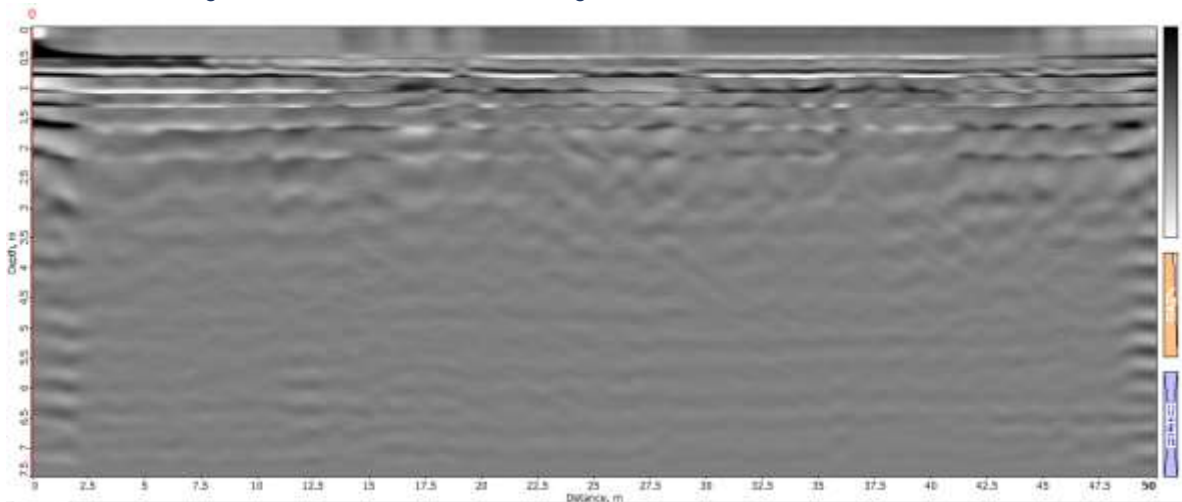
Anexo D.9 Radargrama de la línea 9 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.



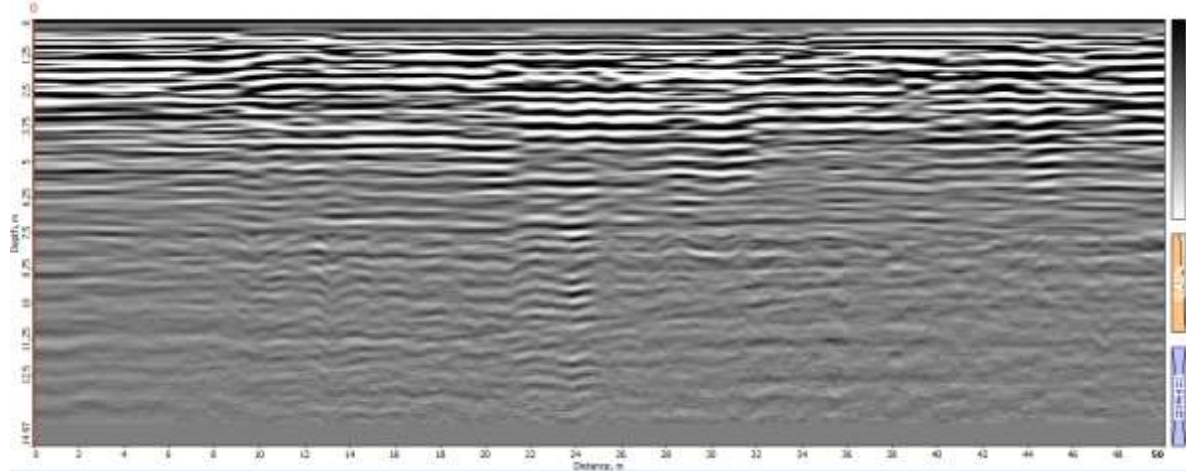
Anexo D.10 Radargrama de la línea 11 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.



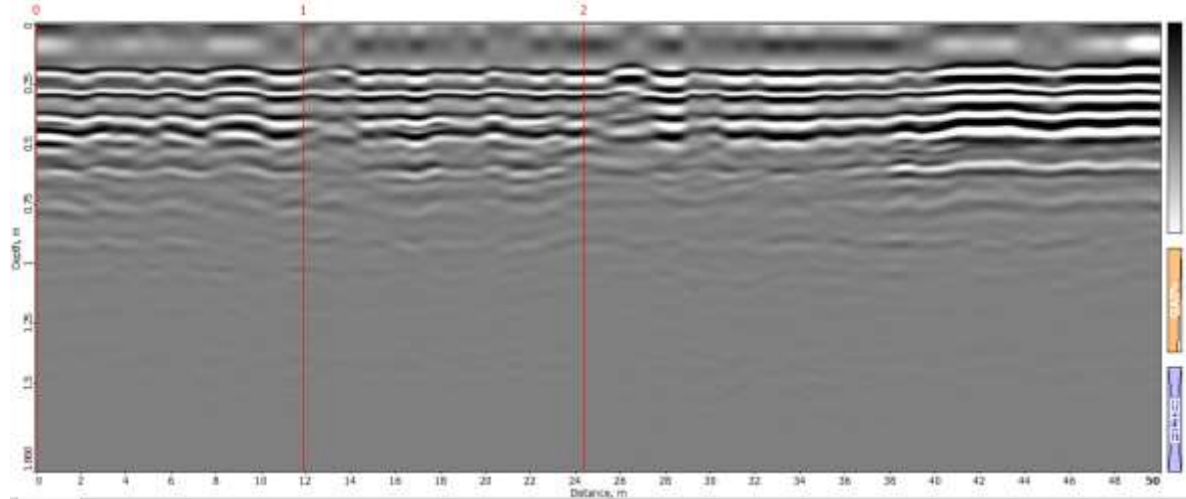
Anexo D.11 Radargrama de la línea 13 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.



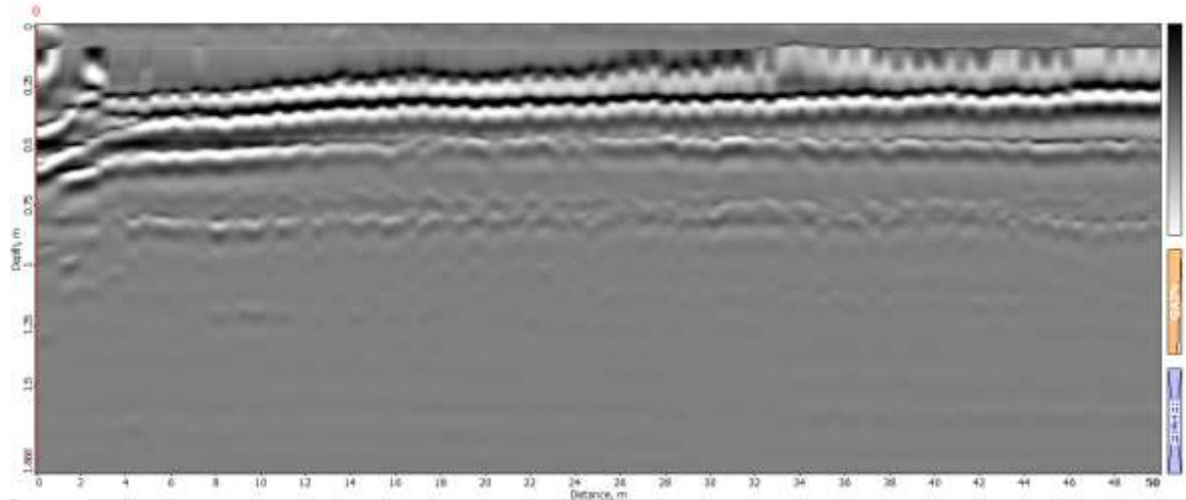
Anexo D.12 Radargrama de la línea 15 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.



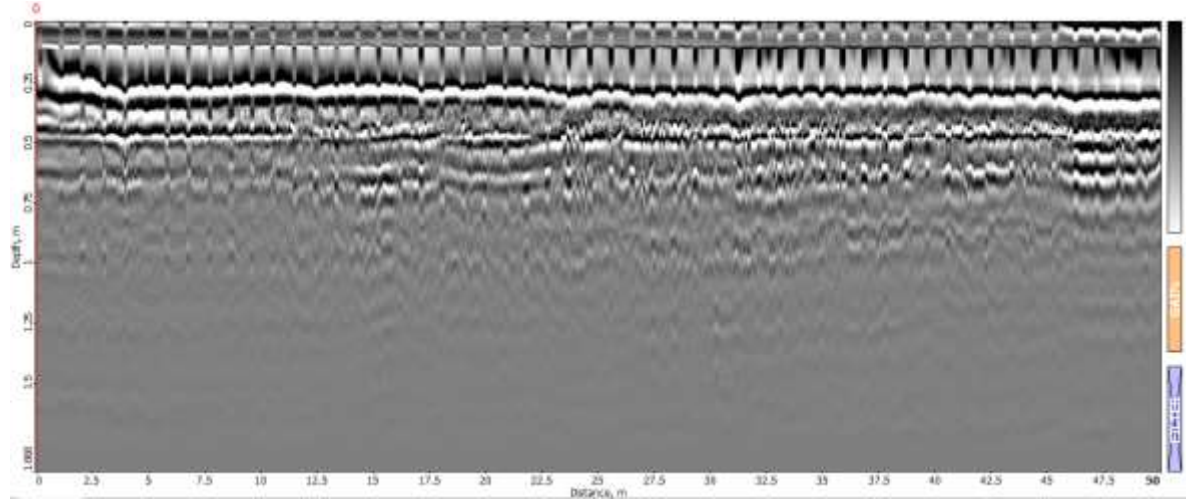
Anexo D.13 Radargrama de la línea H1 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.



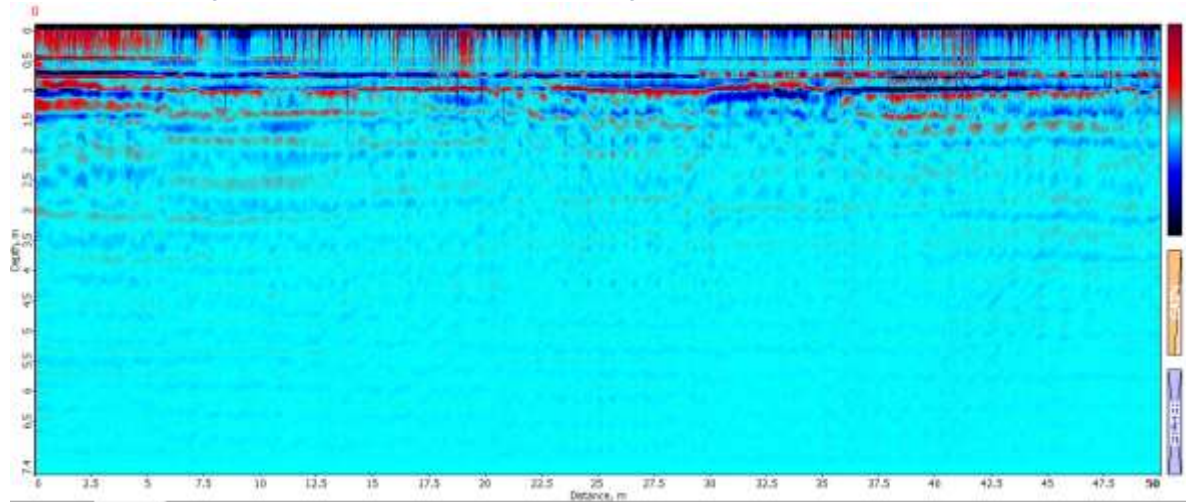
Anexo D.14 Radargrama de la línea H6 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.



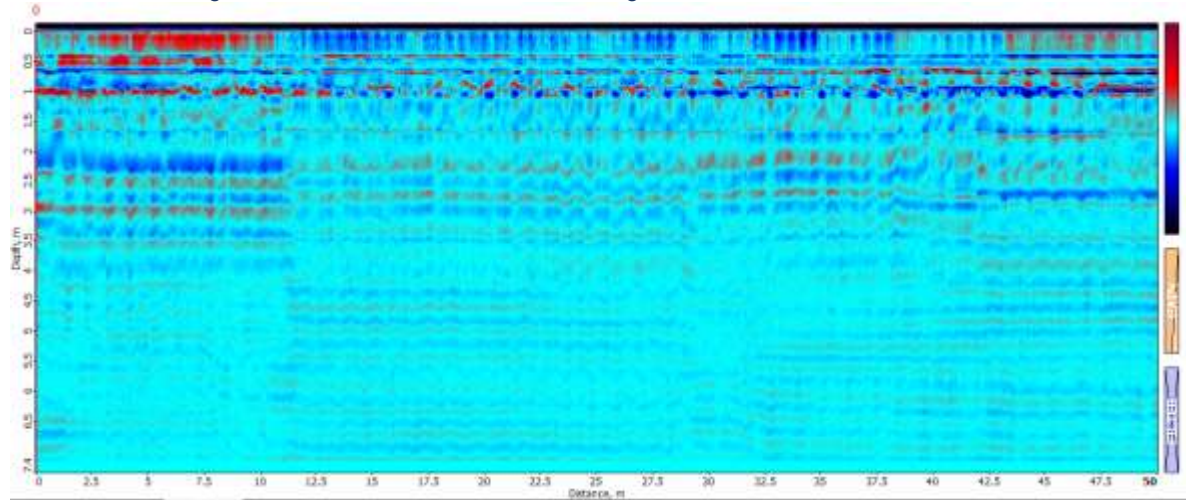
Anexo D.15 Radargrama de la línea H7 obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.



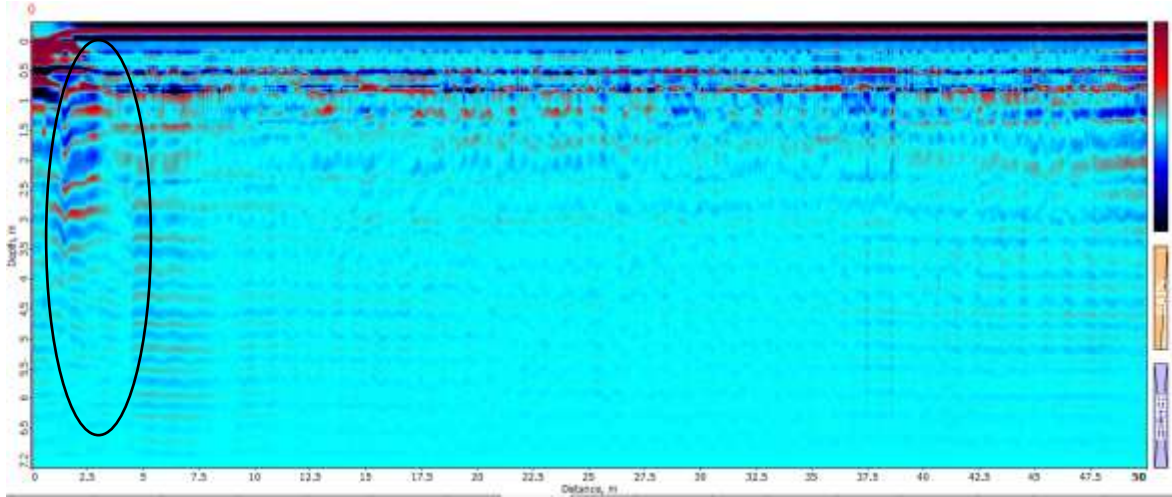
Anexo D.16 Radargrama de la línea 1 cerro obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.



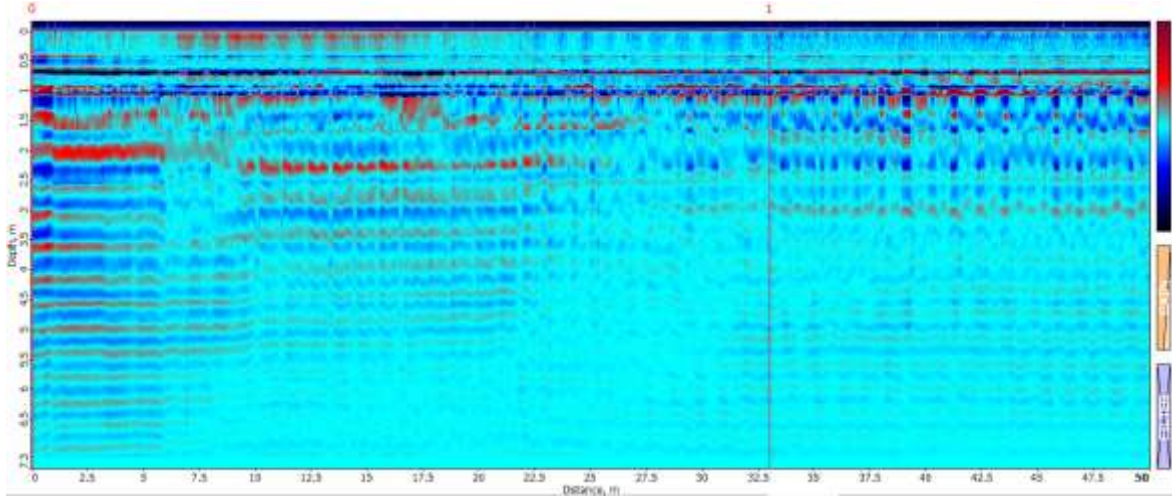
Anexo D.17 Radargrama de la línea 2 cerro obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.



Anexo D.18 Radargrama de la línea 3 cerro obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.



Anexo D.19 Radargrama de la línea 4 cerro obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.



Anexo D.20 Radargrama de la línea 5 cerro obtenida con georadar con una antena de 300 MHz.

