

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO EN EL TRAMO DE LAS
ESTACIONES BELLO MONTE - LAS MERCEDES Y LA
ESTACIÓN BELLO CAMPO DE LA LÍNEA CINCO DEL METRO
DE CARACAS, APLICANDO GPR Y MÉTODOS GEOLÓGICOS**

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Pérez Mejías, Marco Antonio
Viloria Isturiz, Alberti José
Para optar a los títulos de Ingeniero Geólogo
E Ingeniero Geofísico respectivamente

Caracas, 2013

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO EN EL TRAMO DE LAS ESTACIONES BELLO MONTE - LAS MERCEDES Y LA ESTACIÓN BELLO CAMPO, DE LA LÍNEA CINCO DEL METRO DE CARACAS, APLICANDO GPR Y MÉTODOS GEOLÓGICOS

Tutor Académico: Prof. Luis Fajardo
Cotutor Académico: Prof. Jesús González
Tutor Industrial: Ing. Henry Salas
Cotutor Industrial: Lic. Jelime Aray
Cotutor Industrial: Ing. Sergio Rodríguez

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Pérez Mejías, Marco Antonio
Viloria Isturiz, Alberti José
Para optar a los títulos de Ingeniero Geólogo
E Ingeniero Geofísico respectivamente

Caracas, 2013

Caracas, Abril 2013

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geológica y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres Marco A. Pérez M., y Alberti J. Vilorio I., titulado:

CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO EN EL TRAMO DE LAS ESTACIONES BELLO MONTE - LAS MERCEDES Y LA ESTACIÓN BELLO CAMPO, DE LA LÍNEA CINCO DEL METRO DE CARACAS, APLICANDO GPR Y MÉTODOS GEOLÓGICOS

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al título de Ingeniero Geólogo e Ingeniero Geofísico respectivamente, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. José Cavada
Jurado

Prof. Omar Márquez
Jurado

Prof. Luis Fajardo
Tutor

Prof. Jesús González
Cotutor

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada a Dios por involucrarme en este sendero de la vida en compañía de mi bella familia a quienes también les agradezco en especial a mi mamá que ha sacrificado toda su vida por el bienestar de nosotros, a mi bella pareja por su apoyo incondicional, en especial a mi hermosa hija Massiel Alexandra y su futuro hermano, a mi hermano Víctor Hugo a pesar de las diferencias que algunas veces hemos tenido, a mi bella abuelita Ana Moros y mi difunto abuelo “El Chamo” el Sr. Américo Pérez Sánchez, entre otros.

A está majestuosa casa de estudio que vence la sombra, a la Facultad de Ingeniería, ciclo Básico y sus departamentos, la Escuela de Geología Minas y Geofísica y a todo el resto de las personas que hacen vida dentro de esta ciudad universitaria. En especial a Alberti Viloría por acompañarme en este trabajo especial de grado, Yessy Palacios, Alejandro Meneses, Johan Balza, Federico Soto, Freddy Goyo, Fercho, Grillet, Stepher Vera, Matilde, Morella, Lolo, Canache, Luigi, personal del comedor, Julio, Joshua, Fabián, Jorge Alvarado, Jorge García, Bochinche, Pedrimar, Aliño, La Marrana, Airam, Yuli Herrera, etc....

Al profesor e ingeniero él Sr. Ricardo Alezones que con su ácido sarcasmos y valiosa sinceridad, ha hecho que lo identifique como un fiel amigo e incluso como un padre.

Agradezco a la profesora Nuri Orihuela que con su ejemplar personalidad, brillante profesionalismo, amabilidad, sencillez y humildad, la hace un modelo a seguir dentro y fuera del ámbito profesional.

Al profesor Luis Chacón, Luis Fajardo, Jesús González y Mauricio Bermúdez que impulsaron este trabajo especial de grado brindándonos la oportunidad de la elaboración de este proyecto a mí y mi compañero. Al profesor Cavada

por ser una persona muy receptiva durante las consultas y todo el personal de la academia que contribuyo con la elaboración de este trabajo especial de grado.

Al Ing. Sergio Rodríguez, Ing. Carlos Gallardo, Ing. Gustavo Villegas, Ing. Sujey Guzmán, Ing. Andrea, la Lic. Venancia y todos los demás miembros del personal de obras Metro de línea 5.

También a la Lic. Jelime por su amor a la investigación y dedicarnos gran parte de su tiempo durante la elaboración de nuestro trabajo, al Ing. Luis Yegres por su ardua colaboración, al Prof. Michael Smitch, especialmente a todo el departamento de Geofísica y de más miembro de FUNVISIS.

Marco A. Pérez M.

En primer lugar agradezco a Dios y al universo, por darme la fortaleza de seguir adelante y vencer. A los que ya no están en este plano pero que me acompañan a donde quiera que vaya, papá, abuelo, se que están conmigo y esto es para ustedes, los amo y extraño. A mi increíble familia empezando por mis tres madres, chela, egua y ceci, sin ustedes nada de esto sería posible, a mi segundo padre, nene, no hay palabras que describan mi admiración y agradecimiento, a mi tío Jimmy, siempre pendiente en tu silencio, a mis hermanos, Astrid eres mi orgullo hecho hermosura, te amo, Boris y Carlos, gracias por ser ese pedacito de papa que tanto me hace feliz, a mis primas (Ingrata y mafe) y a mi primate, por su apoyo, sinceridad y respeto, los adoro! A mi novia, Olga, fuiste el impulso que me faltaba para llegar al final de este camino, tu realmente sabes lo que para mí significa todo esto, te amo! Y al resto de familiares que de una u otra forma siempre estuvieron pendientes, lo crean o no ya termine!

A mi hermosa UCV, te debo la mitad de mi esencia, en tu recinto aprendí en gran parte a ser quien soy, estarás en mi ser de por vida y te defenderé hasta que ya no tenga aliento, a la Facultad de Ingeniería, y a todo el personal obrero y administrativo muy especialmente a Denis (control de estudio), a mis excelentes profesores, me dieron muchas lecciones no solo académicas, en especial a Ricardo Alezones, José Cavada, Michael Smith, Inírida Rodríguez e Ingrid Castell, y a los poquitos pero malos profesores, gracias por enseñarme qué no se debe hacer, a mis amigos, Ewuin, Wilfred y Phol, gracias por todo hermanos, a todos mis compañeros, en especial a Marco Pérez por todas las discusiones a lo largo de este trabajo, aprendí mucho de ellas, a Jorge García, Manuel Bochinche, Carlos Fuenmayor, Caballo, Ana Freites, Ivavnova, Derik, Mari Jane, Manuel Medina, Mauro, Luis Rangel, Federico Soto, Pototo, Yashira, Matilde, Sra. Morella, Yuli, Jesús Quintero, y todos los panas que se me olvidan, que de ponerlos a todos tendría más hojas en agradecimiento que en tesis.

A los profesores Luis Chacón, Luis Fajardo, Jesús González y Mauricio Bermúdez por dar pie al desarrollo de este trabajo de investigación, al Ing. Sergio Rodríguez, Ing. Carlos Gallardo, Ing. Henry Salas, Ing. Gustavo Villegas, Ing. Sujey Guzmán, Ing. Andrea, Lic. Venancia y todo el personal de obras Metro de línea 5.

A FUNVISIS, quien nos abrió las puertas desde un principio para desarrollar este trabajo, en especial a la Lic. Jelime Aray por su guía, paciencia y dedicación, por sus consejos y empeño para que todo saliera bien, el Ing. Luis Yegres, el Ing. Cecilio, y en general todo el departamento de Geofísica, gracias por el apoyo.

Alberti J. Vitoria J.

Pérez M. Marco A., Viloría I. Alberti J.

CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO EN EL TRAMO DE LAS ESTACIONES BELLO MONTE - LAS MERCEDES Y LA ESTACIÓN BELLO CAMPO, DE LA LÍNEA CINCO DEL METRO DE CARACAS, APLICANDO GPR Y MÉTODOS GEOLÓGICOS.

Tutores Académico: Prof. Luis Fajardo y Prof. Jesús González. Tutor Industrial: Ing. Henry Salas. Cotutores: Lic. Jelime Aray e Ing. Sergio Rodríguez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2013. Nº de pág. 108.

Palabras Claves: Georadar, Geología, Geofísica y Radargrama.

Resumen. Se utilizó la técnica de GPR en el valle de Caracas, en las adyacencias del supermercado Cada de Las Mercedes, la estación de servicio Miguel Ángel y cerca del frente de obra de Bello Campo. En la zona de Bello Campo se utilizó el equipo GPR para la detección de una tubería matriz de agua. A pesar de que no se detectó la tubería debido a las limitaciones de antenas se complementó esta adquisición con recolección de muestras del frente de obra para determinar ciertos parámetros granulométricos y se complementó con la descripción de unos cantos para determinar la procedencia de los mismos y constatar con antecedentes de la zona. Las muestras recolectadas se asociaron al complejo el Ávila específicamente al esquisto de San Julián. En Las Mercedes se determinó la geometría del subsuelo y se pudo correlacionar los resultados del GPR con estudios de suelos precedentes de la zona. Y en la estación de servicios Miguel Ángel se detectaron varias plumas de fluidos tanto a lo largo de la tubería de gas como en las cercanías de los surtidores de gasolina, además se identificó el desplazamiento de unos reflectores asociando este fenómeno a una posible discontinuidad. La técnica de GPR demostró ser un equipo muy versátil si se dispone de antenas blindadas y no blindadas.

ÍNDICE GENERAL

	Página
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Justificación	2
1.3 OBJETIVOS	2
1.3.1 General	2
1.3.2 Específicos	3
1.4 UBICACIÓN	3
1.5 ANTECEDENTES	4
CAPÍTULO II	
MARCO GEOLÓGICO	6
2.1 GEOLOGÍA REGIONAL	6
2.1.1 Generalidades	6
2.1.2 Estratigrafía regional	7
2.1.3 Complejo basal de Sebastopol	8
2.1.4 Asociación metasedimentaria Caracas	9
2.1.4.1 Esquistos Las Mercedes	9
Consideraciones históricas	9
Metamorfismo	10
Estructuras	11
2.2 GEOLOGÍA LOCAL	14
2.2.1 Valle de Caracas	14
CAPÍTULO III	
MARCO TEÓRICO	18
3.1 GPR (ground penetrating radar)	18
3.1.1 Parámetros para adquisición de datos	19

3.1.2 GPR en detección de filtraciones	20
3.2 MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS	20
3.2.1 Propiedades electromagnéticas de los materiales	21
	Página
3.2.1.1 Conductividad eléctrica	21
3.2.1.2 Permitividad eléctrica	22
3.2.1.3 Permeabilidad magnética	22
Ferromagnéticos	22
Diamagnéticos	22
Paramagnéticos	22
3.3 ADQUISICIÓN DE DATOS	23
3.4 PROCESAMIENTO DE DATOS GPR	23
3.4.1 Programa GRESWIN2	23
3.4.2 Parámetros de procesamiento	24
3.5 TEXTURA DE ROCAS CLÁSTICAS	26
3.5.1 Madurez textural y madurez mineralógica	26
3.5.2 Análisis granulométrico	27
3.5.3 Aplicaciones del tamaño de grano	27
3.5.4 Escogimiento	29
3.5.5 Gráficos estadísticos	30
3.5.6 Apreciaciones de las gráficas granulométricas	33
3.5.7 Parámetros granulométricos	35
CAPÍTULO IV	
MARCO METODOLÓGICO	40
4.1 MÉTODOS GEOFÍSICOS. RADAR DE PENETRACIÓN DE SUELOS (GPR)	40
4.1.1 Conexión y ensamblaje del GPR	40
4.1.2 Etapa de adquisición	46
4.1.3 Procesamiento de datos	50

4.2 MÉTODOS GEOLÓGICOS	51
4.2.1 Granulométricos	51
Métodos visuales	52
Métodos estadísticos granulométricos	52
4.2.2 Descripción de muestra de mano	54
	Página
CAPÍTULO V	
RESULTADOS Y ANÁLISIS	55
5.1 ADQUISICIÓN 1. Bello Campo. Caracterización de tubería matriz de agua	55
5.2 ADQUISICIÓN 2. Supermercado Cada de Las Mercedes. Caracterización de la arquitectura o de la distribución espacial del subsuelo	66
5.3 ADQUISICIÓN 3. Estación de Servicios (E/S) Miguel Ángel. Delimitación de plumas de hidrocarburo	77
CAPITULO VI	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	100
6.1 CONCLUSIONES	100
6.2 RECOMENDACIONES	102
BIBLIOGRAFÍA	104
ANEXOS	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Ubicación regional. a) Mapa de Venezuela. b) Ciudad de Caracas	3
Figura 2. Ubicación local. Zona; 1, 2 y 3	4
Figura 3. Tabla de correlación de la Cordillera de la Costa	8
Figura 4. Unidades litológicas de Caracas, base topográfica 1:25000	12
Figura 5. Mapa de unidades depositacionales Pleistocénicas y Holocénicas del Valle de Caracas	16
Figura 6. Esquema de funcionamiento del GPR	19
Figura 7. Modificación de un campo magnético en presencia de a) material ferromagnético, b) material diamagnético y c) material paramagnético.	23
Figura 8. Ventana que muestra parámetros de procesamiento de los diferentes filtros	25
Figura 9. Ventana que muestra ambiente de procesamiento de radargramas. El círculo rojo demarca el botón con el cual se cambia la escala de colores	26
Figura 10. Escala del tamaño del grano de los sedimentos y sus correspondientes valores en la escala Phi.	29
Figura 11. Histograma y curva de frecuencia	32
Figura 12. Curva de frecuencia acumulada	33
Figura 13. Tendencias de la curva de frecuencia: A) Normal, B) Asimétrica gruesa, C) Asimétrica fina	35
Figura 14. Tipo de curvas de frecuencia	38
Figura 15. Morral y componentes	41
Figura 16. DAD y compartimiento central del morral	42
Figura 17. DAD y morral	42
Figura 18. a) Conexión de batería; b) Conexión LAN; c) Batería	43

Figura 19. a) Sostenedor de PC y correas de ajuste b) Morral asegurado c) Sostenedor de PC asegurado d) Sostenedor de PC, PC y morral	44
Figura	Página
Figura 20. a) Conexión LAN de PC; b) PC, conexión LAN y soporte de PC; c) Conexión de batería	45
Figura 21. a) Operador; b) Operador y antena	45
Figura 22. DAD y botón de encendido	46
Figura 23. Ventana de inicio programa K2 FAST WAVE	47
Figura 24. Ventana de selección de radar	48
Figura 25. Programa K2 Fast Wave. a) Botón de calibración de ondícula; b) Botón de calibración de equipo	48
Figura 26. Programa K2 Fast Wave. Ventana de selección de Adquisición	49
Figura 27. Programa K2 Fast Wave. Ventana de Nueva Adquisición a) Botón Start scan	49
Figura 28. Radargrama sin procesar obtenido con K2 FAST WAVE	50
Figura 29. Radargrama procesado con GRESWIN2.	51
Figura 30. Tambor vibratorio de laboratorio de sedimentología de la EGMG de la UCV, Caracas, Venezuela	53
Figura 31. Modelo de tabla de datos granulométricos	53
Figura 32. Lupa de 10X	54
Figura 33. Croquis I del tendido realizado en la adyacencia del frente de obra Bello Campo	56
Figura 34. Radargrama obtenido para perfil 5E, con antena de 40 MHz	57
Figura 35. Frente de excavación Bello Campo, M1 y M2 corresponde a las muestras extraídas del frente.	58
Figura 36. Histograma y polígono de frecuencia de "M1".	60
Figura 37. Gráfica de curva acumulativa para "M1".	60

Figura 38. Histograma y polígono de frecuencia para la muestra "M2".	63
Figura 39. Gráfica de curva acumulativa para la muestra "M2".	63
Figura 40. Muestras de mano de peñones y gujarros tomados del frente de obra Bello Campo	65

Figura	Página
Figura 41. Segunda etapa de adquisición con perforaciones (PEC) en las adyacencias del supermercado CADA de las Mercedes, Municipio Baruta, Edo Miranda	67
Figura 42. Izquierda, disposición de perfiles (segunda etapa de adquisición). Derecha, adquisición de radargrama para perfil T4, con antena de 40MHz	67
Figura 43. Radargrama obtenido para perfil T0, con antena de 40 MHz	69
Figura 44. Derecha, momento en que se obtuvo radargrama para perfil T1, con antena de 40 Mhz Izquierda, ampliación de una de las manchas de fluido.	70
Figura 45. Radargrama obtenido para perfil T2, con la antena de 40 MHz	70
Figura 46. Radargrama obtenido para perfil T2, con la antena de 40 MHz	71
Figura 47. Radargrama obtenido para perfil T3, con antena de 40 MHz	72
Figura 48. Perfil Geológico PEC-07; PEC-27. Tomado y modificado de la Gerencia de Construcción del Metro de Caracas C.A.	72
Figura 49. Perfil geológico PEC-27; PEC-28. Tomado y modificado de la Gerencia de Construcción del Metro de Caracas C.A.	73
Figura 50. Modelo 3D "Las Mercedes" generado con radargramas de espectro de frecuencia de 40 MHz y perfiles de suelos para segunda adquisición. Vista de oeste a este	73

Figura 51. Modelo 3D “Las Mercedes” generado con radargramas de espectro de frecuencia de 40 MHz y perfiles de suelos para segunda adquisición. Vista de norte a sur	74
Figura 52. Modelo 3D de correlación de perfil de suelo PEC-07 PEC-27 con radargrama obtenido para perfil T0, con la antena de 40 MHz	74

Figura	Página
Figura 53. Modelo 3D de correlación de perfil de suelo PEC-07 PEC-27 con radargrama obtenido para perfil T0, con la antena de 40 MHz	77
Figura 54. Ubicación de estación de servicio Miguel Ángel (estacion de servicio PDV) en la Urb. Bello Monte de Caracas	78
Figura 55. Estación de servicio Miguel Ángel dividida en bloques de trabajo	79
Figura 56. BLOQUE 1 mostrando distribución de perfiles y perforaciones de estudios previos. Los puntos representan las perforaciones	79
Figura 57. Radargrama obtenido para perfil L0, con antena de 80 MHz	82
Figura 58. Radargrama obtenido para perfil L2, con antena de 80 MHz	82
Figura 59. Radargrama obtenido para perfil L3, con antena de 80 MHz	83
Figura 60. Radargrama obtenido para perfil T3, con antena de 80 MHz	84
Figura 61. Radargrama obtenido para perfil T4, con antena de 80MHz	85
Figura 62. Modelo 3D del BLOQUE 1 donde se resalta las anomalías a lo largo de la tubería de GNV	86
Figura 63. MODELO 3D de material afectado por invasión de hidrocarburo en BLOQUE 1	88
Figura 64. Vista de planta de BLOQUE 1, mostrando volumen de material afectado por fluidos. Los puntos rojos representas	

las perforaciones de estudios previos.	89
Figura 65. Radargrama obtenido para perfil T2, con antena de 200 MHz	90
Figura 66. Radargrama obtenido para perfil T3, con antena de 200 MHz	91
Figura 67. BLOQUE 2 mostrando distribución de perfiles.	92
Figura 68. Radargrama obtenido para perfil T9, con antena de 200 MHz	93
Figura 69. Radargrama obtenido para perfil T10, con antena de 200 MHz	94
Figura 70. Radargrama obtenido para perfil T11 con antena de 200 MHz	95
Figura 71. Modelo 3D del BLOQUE 2	96

Figura	Página
Figura 72. Vista de planta de BLOQUE 2, donde se muestra material en subsuelo afectado por invasión de hidrocarburo.	97
Figura 73. Radargrama obtenido para perfil T7 con antena de 80 MHz	98
Figura 74. Radargrama obtenido para perfil T7 adquirido con antena de 200 MHz	99

INDICE DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 1. Coordenadas de zonas de estudio	4
Tabla 2. Intervalos del grado de escogimiento	36
Tabla 3. Intervalos de asimetría	37
Tabla 4. Intervalos de Kurtosis	38
Tabla 5. Resultados granulométricos "M1".	59
Tabla 6. Resultados granulométricos para la muestra "M2".	62
Tabla 7. Resultados de análisis a muestra de mano de "M2"	65
Tabla 8. Rumbos de perfiles de GPR y geológicos en Adquisición #2	68
Tabla 9. Rumbos geográficos de perfiles en BLOQUE 1	80
Tabla 10. Datos de perforaciones de estudios previos en la estación de servicio Miguel Ángel	81
Tabla 11. Rumbos geográficos de perfiles en BLOQUE 2	92

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo de investigación nace en la necesidad del Metro de Caracas de integrar o crear nuevas metodologías en conjunto con la UCV, que les permita optimizar las labores de estudio de subsuelo en áreas contaminadas por compuestos orgánicos volátiles.

1.1 Planteamiento de problema

Monitorear los niveles de riesgos de explosión y daños ambientales, debido a la polución de hidrocarburos en estaciones de servicio (E/S). Es una problemática que no solo influye a las obras del metro cuando las mismas se encuentran suprayacente a las excavaciones sino también representan una problemática de contaminación y de desinterés de nuestros recursos fósiles que de alguna forma influye en la calidad de vida de los ciudadanos que transitan a diario la localidad afectada. Las zonas en estudio que están enmarcadas en esta investigación son: La estación de servicio Miguel Ángel en la av. Río de Janeiro de Bello Monte, al noroeste de la Mercedes específicamente en el estacionamiento del supermercado Cada las Mercedes, una sección de la av. Jalisco y una sección de la av. Ppal. De Las Mercedes, ubicados dentro del tramo comprendido entre las estaciones Bello Monte y Tamanaco de la línea 5 del Metro de Caracas. También se incluyen algunos datos adquiridos en las cercanías del frente de obra Bello Campo al este de la Av. Libertador, realizados en forma de colaboración con el Metro de Caracas.

1.2 Justificación

Las acumulaciones de hidrocarburo en el subsuelo producto de la actividad comercial, generan una alta incertidumbre en las actividades de excavación debido al riesgo que representan; el consorcio Metro, aunque tiene métodos de monitoreo y saneamiento, basado principalmente en perforaciones, sigue en búsqueda de una mejor metodología que satisfaga estas dos necesidades (caracterización y extracción), ya que dichas perforaciones no representa una forma segura de monitoreo ni produce resultados que permitan establecer relaciones volumétricas más exactas de estas acumulaciones de fluidos inflamables. Motivado por la incertidumbre en la ubicación de acumulación anómala de hidrocarburos, función directa del riesgo de explosión por perforación, el siguiente trabajo propone implementar una metodología a partir de métodos geofísicos y geológicos, que permitan ubicar las acumulaciones de fluidos en el subsuelo de manera no invasiva, ya sea agua o hidrocarburo. A partir de éstos métodos se pueden optimizar los costos, el proceso de monitoreo y saneamiento de la zona con una metodología más práctica y segura, con el fin de minimizar los riesgos asociados a las actividades de excavación.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 General

- Caracterizar y delimitar, mediante la integración de métodos geológicos–geofísicos, acumulaciones de fluidos tales como agua y/o hidrocarburos en subsuelo.

1.3.2 Específicos

- Caracterizar la arquitectura estructural del subsuelo con el empleo de la técnica de GPR (Georadar).
- Delimitar acuíferos y/o plumas de hidrocarburos en el subsuelo a través de la técnica de GPR
- Detectar porosidades secundarias en las unidades litodémicas, a partir de muestra de mano.

1.4 UBICACIÓN

La zona en estudio se encuentra ubicada en la ciudad de Caracas, Distrito Capital, (figura 1), en tres áreas ubicados en la parte este del valle de Caracas, específicamente en los sectores de Bello Campo, Las Mercedes y la estación de servicio Miguel Ángel en Bello Monte (figura 2).



Figura 1. Ubicación regional. a) Mapa de Venezuela (www.wordpress.com). b) Ciudad de Caracas (Google Map)

Cada uno de estos puntos corresponde con las coordenadas presentadas en la siguiente tabla:

Tabla 1. Coordenadas de zonas de estudio

Zona	Sector	Coordenadas norte	Coordenadas este
1	Bello Campo	10°29'23.36"	66°51'0.78"
2	Supermercado Cada Las Mercedes	10°29'7.19"	66°51'53.69"
	Av. Jalisco	10°29'8.57"	66°51'51.84"
	Av. Ppal. Las Mercedes	10°29'6.63"	66°51'54.37"
3	Estación de servicio Miguel Ángel	10°29'12.62"	66°52'9.98"



Figura 2. Ubicación local. Zona; 1, 2 y 3. Tomado y modificado de Google Map

1.5 ANTECEDENTES

La compañía TRX Consulting en su publicación “*Servicios para ingeniería, geotecnia, y ambiente en la industria de distribución de hidrocarburos*” demuestra que con el método GPR se puede cartografiar los sub-servicios, tanques y estructuras en el subsuelo, además de proveer una imagen del mismo que puede evidenciar la posible presencia de fluidos. Además de una mayor resolución y precisión, integrando técnicas de geoquímica como el uso

de la tecnología combinada de análisis de gas/vapores y parámetros físicos en el subsuelo que puede evaluar *in situ* 8 parámetros simultáneamente (contaminantes orgánicos usando un detector de foto ionización (PID) a integración temporal, un analizador de infra rojo (IR) selectivo de 4 canales (metano, hidrocarburos de petróleo totales, CO₂, O₂) y la medida de presión atmosférica, “vacuum” de muestreo y temperatura del suelo). (TRX Consulting. Engineering Earth Sciences., 2005)

(Audemard y Ollarves, 2006) “El georadar como herramienta para la definición de fallas activas. Aplicación en el sector central de la falla de Boconó, estado Mérida, Venezuela, para caracterizar estructuras en el subsuelo”. Corroborar arquitectura estructural de parte del sistema de fallas Los Andes a partir de radagramas.

(Adrian Nieves y González Ruiz, 2006) "Estudio Geológico y ambiental, para la determinación de la contaminación por hidrocarburo usando GPR en las adyacencias de la estación de bomberos-2, Troncal 54, km 52, Edo. Anzoátegui", pudieron determinar a través de radagramas las acumulaciones de hidrocarburos en el subsuelo producto de la fuga de un oleoducto averiado en el estado Anzoátegui.

(Geohidra Consultores C.A., 2011) revela en los informes, “PLAN DE CONTINGENCIA. Presencia de hidrocarburo libre en el subsuelo de la E/S PDV” presentado al Consorcio Metro de Caracas C.A. la aplicación de una metodología basada específicamente en perforaciones, y medición de compuestos orgánicos volátiles (VOC) en el subsuelo. Estos estudios fueron realizados en varias estaciones de servicio de la ciudad, incluyendo la estación de servicio Miguel Ángel de Bello Monte.

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO

2.1 GEOLOGÍA REGIONAL

2.1.1 Generalidades

La cordillera de la Costa, según (Méndez, 1966) está constituida por cuatro fajas tectónicas, de norte a sur, que poseen las siguientes características:

1) La faja de la cordillera de la Costa, compuesta por rocas metasedimentarias de bajo grado metamórfico (hasta el grado del almandino) en el núcleo de la cordillera, de edad Jurásico-Cretácico Inferior, limitado al sur por el sistema de falla de La Victoria (anticlinorios), en cuyos núcleos aflora localmente el basamento de la cordillera.

2) La faja Caucagua-El Tinaco que consta de una secuencia volcánico-sedimentario de edad Cretácica, ligeramente metamorfizada, que suprayacen a bloques dispersos de basamento. Se caracteriza por los pliegues abiertos y los buzamientos suaves, pero afectados por un intenso tectonismo y aloctonía de bloques. Está limitada al sur por la falla de Santa Rosa.

3) La faja de Paracoto, limitada por las fallas de Santa Rosa y Agua-Fría, que constan en un homoclinal de buzamiento sur, compuesto por capas de la Formación Paracoto.

4) El bloque de Villa de Cura, compuesto por rocas volcánicas y (ocasionalmente) sedimentarias metamorfizadas, cuyo origen se ubica al norte de la cordillera y que parece haberse deslizado hacia el sur durante el Maastrichtiense. Hacia el sur, está limitado por la falla de Cantagallo, en contacto con una serie de sedimentos de edad Cretácico-Terciario Inferior, que a su vez se hallan sobrecorridos por encima de sedimentos terciarios jóvenes, a consecuencia de un sistema de corrimientos frontales. El plegamiento de la cordillera de la Costa parece tener su origen durante la orogénesis andina (Terciario Inferior), pero el período principal de plegamiento obedece a las pulsaciones de la orogénesis antillana, ocurrida durante el Terciario Superior, y cuya máxima actividad tiene lugar durante el Eoceno Medio y Superior, a la luz de los nuevos conceptos relativos a tectónica de placas.

2.1.2 Estratigrafía regional

A continuación se resume la litología y las características principales de las formaciones de la asociación metasedimentaria Caracas, que reúnen litologías de aquellas unidades que circundan el valle de Caracas. La asociación metasedimentaria Caracas, es una secuencia de rocas metasedimentarias depositadas durante el Jurásico Superior y Cretácico Inferior, en discordancia sobre un complejo ígneo/metamórfico, de edad Paleozoico Inferior (figura 3). La sedimentación de las rocas de la asociación metasedimentaria Caracas, es típicamente de plataforma, excepto en su fase final, cuando se depositan sedimentos gradados que indican un ambiente de surco, fenómeno atribuido a desajustes locales en los bordes de la cuenca (González de Juana et al., 1980). A fines del Cretácico Inferior, se producen eventos volcánicos que señalan el comienzo de las facies eugeosinclinal del grupo post-Caracas. En contraste con el grupo anterior, las rocas de éste se depositan en un ambiente de surco, de aguas profundas y sedimentación rápida, caracterizadas por el abundante suministro de material volcánico.

Frecuentes son las fajas angostas de anfibolitas y eclogitas, las cuales se consideran que representan flujos de composición basáltica, que luego fueron metamorfozadas conjuntamente con los sedimentos, bajo condiciones un tanto particulares, ya que la composición mineralógica de las mismas sugiere la carencia de vapor de agua y de óxido de carbono.

El núcleo de la cordillera se vio afectado en toda su extensión por apófisis granítica, la mayor de ellas ubicada entre Valencia y Puerto Cabello, las cuales constituyeron un agente importante en el proceso de metamorfismo de los sedimentos de la asociación metasedimentaria Caracas.

Una de las rocas intrusivas abundantes en la cordillera, la constituyen las ultrabásicas, en sus formas más generalizadas: serpentinitas, peridotitas serpentinizadas, dunitas y piroxenitas, a las cuales se asocian yacimientos minerales de importancia económica (González de Juana et al., 1980)

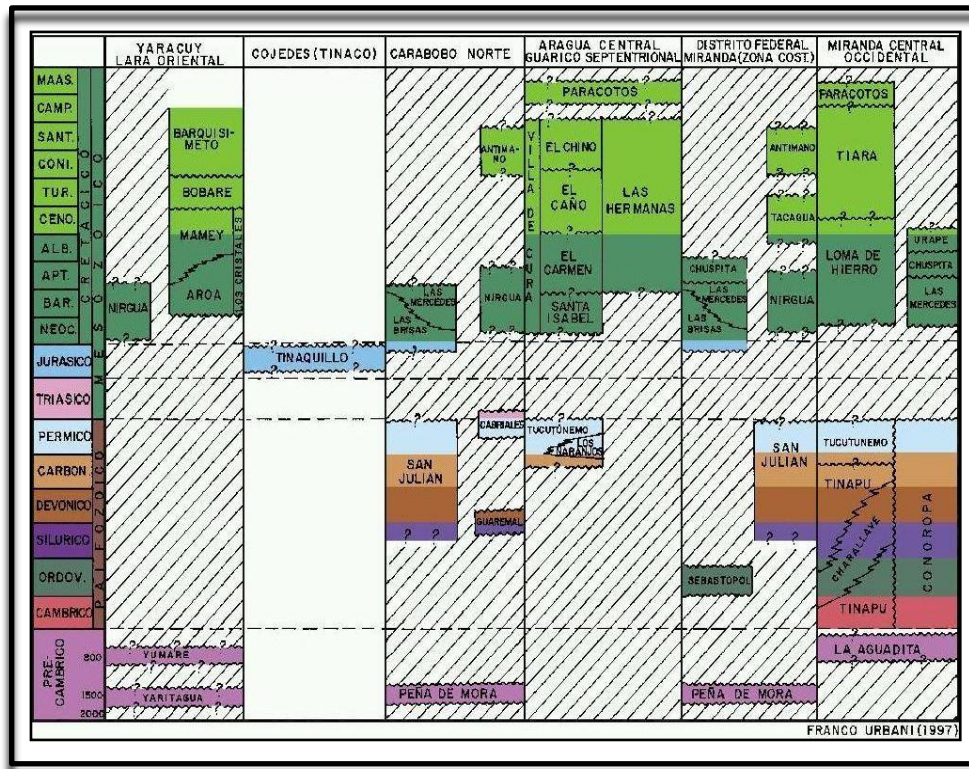


Figura 3. Tabla de correlación de la Cordillera de la Costa (Urbani, 1997).

2.1.3. Complejo basal de Sebastopol

Consideraciones históricas: (Aguerrevere, 1937) lo nombran formalmente como "Complejo Basal de Sebastopol" y señalan que forma parte del núcleo de la Cordillera de la Costa. (Dengo, 1951) y (Smith, 1952) lo denominan como "Complejo de Sebastopol" y ambos autores reafirman su posición como basamento de la secuencia de las rocas metamórficas de la asociación metasedimentaria Caracas. (Werhmann, 1972) utiliza el nombre de "Complejo Basal de Sebastopol" pero distingue diferencias petrográficas significativas entre los cuerpos de la localidad tipo y el de Los Lechosos - La Mariposa, interpretando al primero como un ortogneis y al segundo esencialmente un paragneis. Más recientemente, (Ostos, 1990) utiliza el nombre de "Complejo de Sebastopol".

La localidad tipo se encuentra en la antigua carretera Caracas – Los Teques, a media distancia entre Las Adjuntas y Los Teques, estado Miranda.

(Dengo, 1951) lo describe como un gneis de grano fino fuertemente foliado, compuesto de cuarzo, ortosa, microclino, plagioclasa, muscovita y biotita, localmente es de grano más grueso con una estructura de gneis granítico, se ha considerado discordante por debajo de los metaconglomerados de la formación Las Brisas del grupo Caracas. Se han realizado estudios para determinar su edad y los más aceptados son los aportados por (Hess, 1972), en lo cual presentó datos de una sola muestra de roca total con muy alta relación Rb/Sr (28,0), de manera que utilizando cualquier relación inicial Sr_{87}/Sr_{86} razonable, se puede estimar una edad modelo en el orden de los 425 m.a. (Paleozoico, Ordovícico) considerándola referencial como edad de esta unidad hasta que haya estudios geocronológicos más detallados.

2.1.4. Asociación metasedimentaria Caracas

2.1.4.1. Esquistos Las Mercedes

Consideraciones históricas

Originalmente fue referida por (Aguerrevere, 1937), como Esquistos de Las Mercedes. Su mejor representación se encuentra en la antigua hacienda Las Mercedes al este de Caracas (Hoja esc. 1:100.000, Cartografía Nacional) hoy urbanización Las Mercedes. Debido al crecimiento del urbanismo con la consecuente desaparición de los afloramientos de la localidad tipo, (Werhmann, 1972), propone trasladar la sección de referencia a la carretera Petare-Santa Lucía, donde se expone la sección completa de la formación hasta su transición con la formación Chuspita. (Aguerrevere, 1937) define su litología como esquistos principalmente calcáreos, con zonas grafitosas y localmente zonas micáceas, de un tinte rosado, gris, con zonas blancas cuando es fresca. Según (Werhmann, 1972) la litología predominante consiste en esquisto cuarzo - muscovítico - calcítico - grafitoso con

intercalaciones de mármol grafitoso en forma de lentes, que cuando alcanza gruesos espesores se ha denominado "Caliza de Los Colorados".

(Aguerrevere, 1937), incluyen dentro de la formación una zona constituida por calizas oscuras y densas, en capas delgadas, interestratificadas con capas de esquistos micáceos y arcillosos, todo intensamente plegado, que denominan fase Los Colorados, y que constituyen excelentes estratos guía.

La mayoría de los autores hasta los años 70 han considerado el contacto entre las formaciones Las Mercedes y Las Brisas, como concordantes y de tipo sedimentario. Mientras que autores más recientes consideran que es de tipo tectónico conservando paralelismo en la foliación en ambas unidades, (González de Juana et al., 1980).

Metamorfismo

A continuación se exponen los diversos criterios establecidos por los diferentes autores acerca del grado de metamorfismo que afectó al complejo basal de Sebastopol y al Grupo Caracas, ya que la mayoría lo consideran correspondiente a la facies de los esquistos verdes.

(Dengo, 1951) en su trabajo sobre la región de Caracas considera que las rocas de la formación Tacagua, las calizas de Antímano, los esquistos de Las Mercedes, la parte superior de la fase Zenda y parte del complejo basal de Sebastopol pertenecen a la facies de los esquistos verdes ya que presentan asociaciones mineralógicas típicas de la zona de la biotita y la clorita. Dengo considera que los mármoles que se encuentran en la parte superior del gneis de Peña de Mora pertenecen también a la facies de la anfibolita epidótica.

Dengo señala por otra parte que si, en términos generales, se considera al esquisto de la formación Las Brisas como una roca esencialmente isoquímica, los cambios de facies que se han descrito indican que existe un aumento del grado de metamorfismo del sur hacia el norte. (Werhmann, 1972) incluye a las formaciones Las Brisas, Antímano, Las Mercedes,

Tacagua y parcialmente el complejo basal Sebastopol dentro de las facies de los esquistos verdes; comprendido entre la subfacies de la muscovita-clorita y del epidoto-almandino.

(Dengo, 1951) sostiene que en la región de Caracas, la foliación de las rocas metamórficas es paralela, o esencialmente paralela a los planos de estratificación original. (Werhmann, 1972) señala que si bien en muchos casos la opinión de Dengo (1951) es correcta, se ha llegado a la conclusión de que no siempre es así y señala que ha encontrado ejemplos claros donde la foliación es oblicua a la estratificación con un ángulo de 25° . Por otra parte señala que, donde hay capas competentes tales como calizas, cuarcitas y conglomerados, la foliación de los esquistos siempre es paralela a ella.

Estructuras

- Pliegues: (Dengo, 1951) describe regionalmente tres grandes pliegues, el anticlinal de El Junquito, el sinclinal de El Cementerio y el anticlinal de Baruta, señalando que son estructuras simétricas amplias, cuyos ejes tienen una dirección general $N60^\circ$ a 70° (figura 4).

(Werhmann, 1972) en su trabajo sobre la región de Guatire – Colonia Tovar menciona el anticlinal del Ávila, estructura dominante, el cual se extiende con rumbo este-oeste a lo largo del macizo del mismo. En orden de importancia siguen los anticlinales de Baruta y El Junquito y el sinclinal de El Cementerio dispuestos entre ambos, y con rumbo aproximado $N70^\circ E$. Esta discordancia estructural indica un origen evidentemente distinto del macizo del Ávila, y refleja su comportamiento en forma de una cuña empotrada. El movimiento de esta cuña limitada por fallas longitudinales normales, es esencialmente epirogenético, posiblemente como resultado del empuje de un magma profundo cuya apófisis asoman en el núcleo del macizo. En cuanto a pliegues menores Werhmann señala pliegues tipo flexural originados a gran profundidad bajo presiones

confinantes y temperaturas altas. Por otro lado señala que en las rocas esquistosas es común el pliegue producido por escurrimiento entre capas y por flujo pasivo en las más dúctiles.

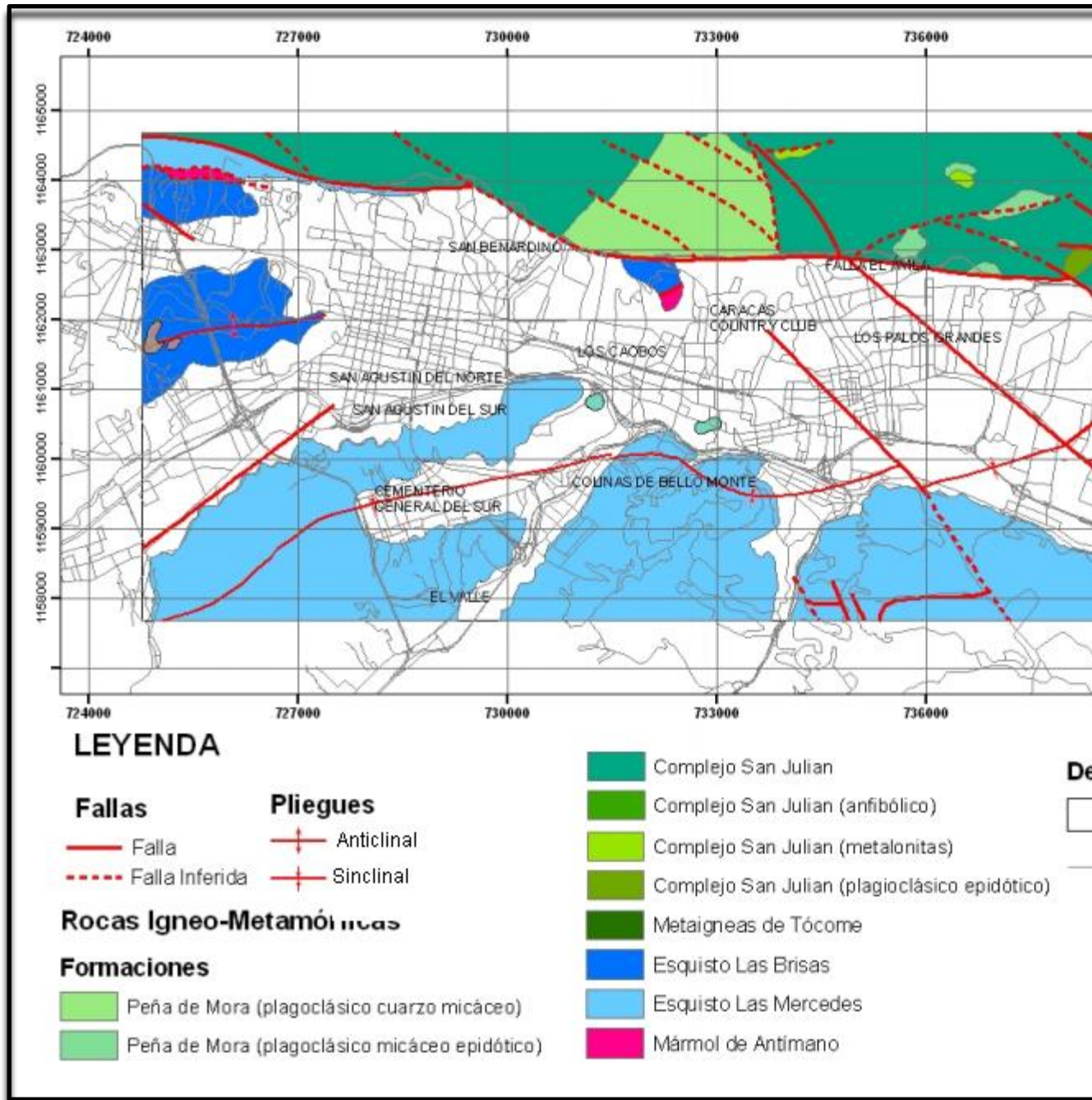


Figura 4. Unidades litológicas de Caracas, base topográfica 1:25000. (Urbani *et al.* 2004).

Fuente (Oropeza y Zambrano, 2007).

- Fallas: Según (Werhmann, 1972), la serranía del Litoral de la cordillera de la Costa es parte integrante del sistema de fallas longitudinales que se extienden en sentido este-oeste desde la depresión de San Felipe hasta la isla de Trinidad. Por su parte la falla de Tacagua-El Ávila, cruza y se extiende al sur del macizo de El Ávila, y el sistema de fallas de San Sebastián al norte, definen una importante unidad fisiográfica, estructural y estratigráfica conocida como el anticlinorio del Ávila. Se reconocen tres tipos de fallas, dos longitudinales y la última transversal:

1.- Fallas oblicuas con rumbos $N50^{\circ}-80^{\circ}E$ (fallas de gravedad y corrimiento) que se originaron por esfuerzos de compresión dirigidos en sentido NNW-SSE que plegaron los sedimentos del grupo Caracas durante la orogénesis andina.

2.- Fallas longitudinales con rumbo este-oeste (fallas de gravedad y de buzamiento con movimiento posterior a lo largo del rumbo) representadas por el sistema de fallas del Ávila, que se extienden en ambos flancos del macizo del Ávila con una configuración escalonada en el flanco norte y buzamientos, por lo general entre 40° y 60° , en el mismo sentido. En la zona de fallas se puede observar un intenso fracturamiento de las rocas. El origen de estas fallas se debe al empuje vertical producido por el magma granítico que intrusionó la cordillera de la Costa a fines del cretácico Superior y durante el paroxismo de la orogénesis andina en el Eoceno. Los últimos movimientos de este sistema señalan la existencia de una componente horizontal dextral en dirección del rumbo. Estos últimos movimientos pueden estar asociados con los esfuerzos que originaron el tercer tipo de fallas.

3.- El más joven de los tres sistemas es definido por las fallas transversales con rumbo N60°W (fallas de rasgadura con movimientos verticales) y con persistente paralelismo entre sí. En origen fueron fracturas de tensión como consecuencia de esfuerzos cortantes con posterior desplazamiento lateral. Por tratarse de fracturas abiertas los cursos de agua han erosionado con cierta facilidad el sustrato rocoso en correspondencia de los planos de fallas borrando a la vez todo vestigio de los mismos.

La interpretación de los patrones geo-estructurales dominantes en el área, es de gran importancia ya que no solamente definen la red hidrográfica sino que también permiten entender los mecanismos de ruptura que pueden haber actuado a lo largo y ancho del litoral metropolitano.

2.2 GEOLOGÍA LOCAL

2.2.1. Valle de Caracas

La geometría de las formaciones del Pleistoceno y Holoceno en el valle de Caracas (figura 5) está afectada por condiciones morfoclimáticas y además por las deformaciones tectónicas contemporáneas y posteriores a su depósito (según Singer 1977 citado en González de Juana et al.(1980)).

Esta influencia se ve marcada en mayor medida debido a la intensa deformación Pleistocénica y Holocénica sufrida al norte de Venezuela. En diversos sectores subsidentes durante el Pleistoceno y Holoceno la tendencia de hundimiento es tal que se ha invertido el proceso actual de encajamiento de los ríos en sus aluviones (Smith, 1952).

En la parte oriental del valle de Caracas existe una gran subsidencia dado que los estudios geofísicos realizados por Weston Geophysical Engineer (1969) muestran una profundización en el sector de Sebucán en Los Palos Grandes.

El mapa del tope de roca (basamento) señala dicha depresión de perfil transversal disimétrico, el relleno sedimentario alcanza un espesor de unos 300 m, sin embargo, esta característica de los sedimentos detríticos recientes del Valle de Caracas conduce a pensar que la subsidencia acelerada de la parte oriental del valle no explica por sí sólo la extensión excepcional de las formaciones holocenas (Singer, 1977).

Por lo tanto se propone una serie de eventos extraordinarios de naturaleza hidrometeorológica que contribuyan con el relleno de la depresión.

(Singer, 1977) realiza diversas observaciones en las riberas del río Guaire y halla que las terrazas que dominan las vegas del río presentan varios metros de espesores de “limo arenosos de desborde y capas de lodo Holoceno que sepultan un paleosuelo del Pleistoceno perteneciendo a aluviones infrayacentes”.

Se señala que en el Holoceno reciente han ocurrido mecanismos de “sobrealuvionamiento anormales” (Singer, 1977), que posiblemente están asociados a inundaciones de gran escala generados por el represamiento del cauce del Río Guaire.

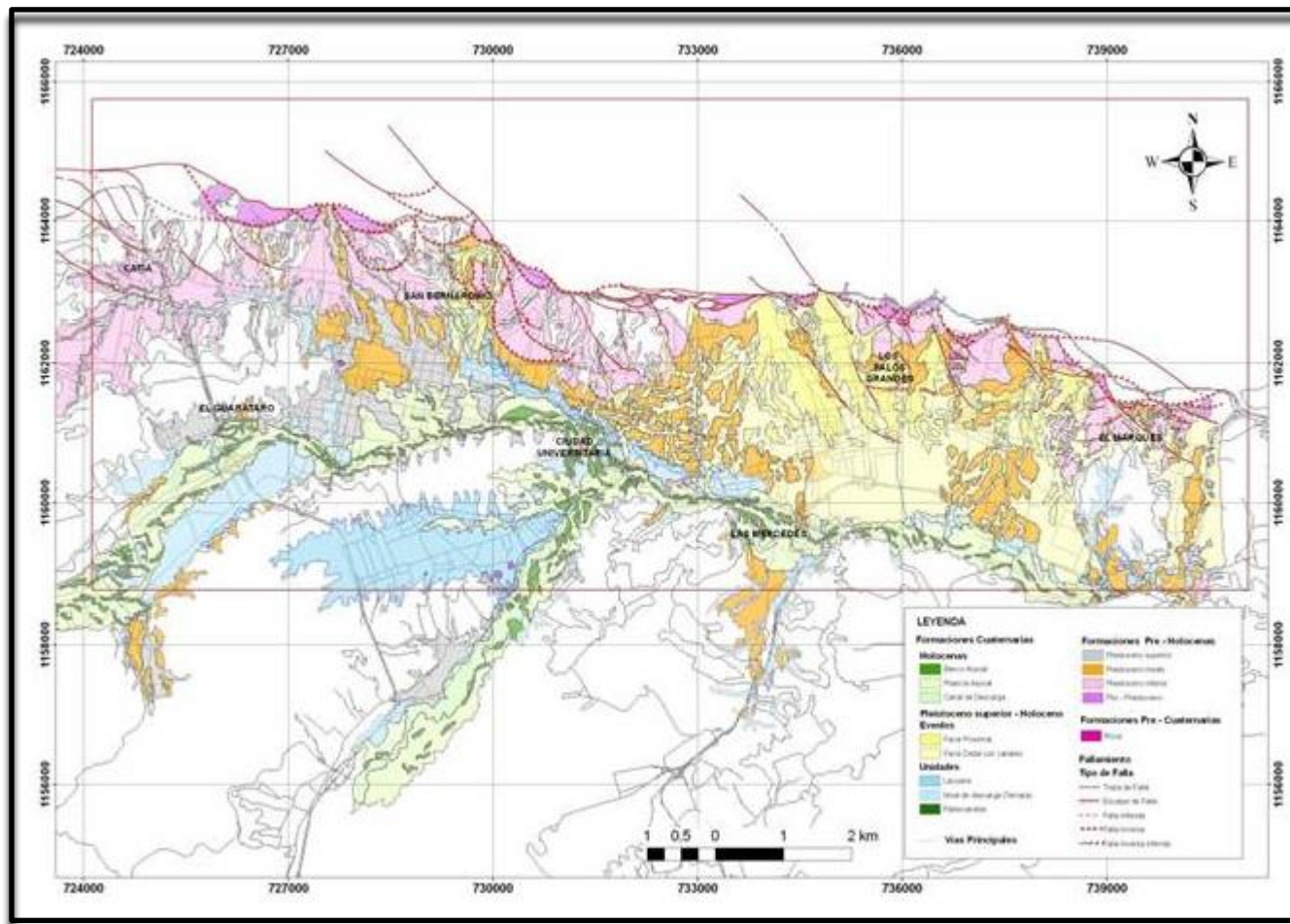


Figura 5. Mapa de unidades deposicionales Pleistocénicas y Holocénicas del valle de Caracas (Oropeza y Zambrano, 2007).

Es posible que un aporte de grandes volúmenes de sedimentos detríticos acarreados por las quebradas afluentes del río Guaire efectúe un bloqueo del mismo, creando un represamiento de las aguas. Estas condiciones de baja energía permiten la deposición de sedimentos lacustres del tipo limo arenoso, denominados varvas lacustres.

Tales volúmenes de material transportado desde el macizo del Ávila se interstratifican en sus extremidades distales (facies distal de los abanicos aluviales) con los depósitos lacustrinos, es decir, dichos eventos son contemporáneos. Este fenómeno catastrófico está datado por yacimientos

arqueológicos pre-colombinos descubiertos al oeste del Valle de Caracas con edades comprendidas entre años 1100 y 1500 D.C. (Holoceno Reciente) (Singer, 1977).

El complejo aluvial del Valle de Caracas corresponde a la ocurrencia de dos eventos consecutivos y relacionados entre sí. Estos fenómenos acontecen en un tiempo geológicamente corto y según Singer (1977) son:

Dos fases mayores de acumulación: donde la primera es muy violenta y conduce al abandono y desorganización de los sistemas de drenaje afluentes del río Guaire (obturación del río Guaire y la quebrada Tócome). La segunda fase corresponde a los efectos de represamiento aluvial, entre otros.

De varias olas de erosión torrencial: corresponde al socavamiento lateral de los depósitos lacustres (depósitos de obturación anteriormente señalados). Estas terrazas son generadas rítmicamente al romperse los obstáculos creados por los aludes torrenciales.

Como menciona Singer (1977) estos eventos acontecen en un tiempo relativamente corto, por lo tanto es una aceleración de la morfogénesis en el conjunto aluvial del Valle de Caracas. Este tipo de fenómenos se observan de forma similar en el piedemonte de cordillera de la Costa, desde el valle de Guarenas-Guatire hasta Valencia.

También cabe señalar que los primeros metros de sedimentos del Holoceno en el este de Caracas manifiestan facies de material burdo similares a escombros producto de aludes torrenciales (Singer, 1977).

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1 GPR (ground penetrating radar)

Según (Galvis, 2011), considera la operación del GPR similar a la sísmica de reflexión a offset constante o a una agrupación por “punto medio en común” (CMP por sus siglas en inglés), en lo que respecta a la adquisición y el procesamiento de los datos; sin embargo, la sísmica utiliza ondas acústicas mientras el GPR utiliza ondas electromagnéticas. En el GPR, un breve pulso de energía electromagnética es irradiado hacia el subsuelo por un transmisor, con una frecuencia característica única que puede estar entre 25 y 1.600 MHz. Cuando este pulso alcanza interfases donde existe un contraste en la constante dieléctrica o cuerpos que presenten diferencias en dicha constante con el medio que los rodea, ocurren fenómenos análogos a los que se dan en sísmica cuando cambia la impedancia acústica: una fracción de la energía de la onda es reflejada, regresa hasta la superficie y es detectada en una antena receptora (figura 6), mientras la energía remanente continúa hasta la próxima interfase. La profundidad de penetración y la resolución observada dependen del tipo de antena usada para una adquisición particular. Aunque las ondas electromagnéticas no penetran a profundidades como las alcanzadas con ondas acústicas, las electromagnéticas generan señales con mayor resolución. En aplicaciones de tipo geológico, las antenas no-blindadas (unshielded antennas) permiten investigar hasta profundidades de 30-60 m (en condiciones ideales). En aplicaciones urbanas y de alta resolución las antenas blindadas (shielded antennas) de alta frecuencia, permiten un mejor control del ruido y las reflexiones desde el aire y una altísima calidad en la imagen radar o

radargrama, es decir, en la respuesta del GPR, la cual es completamente similar a una sección sísmica, y que tiene un alcance en la profundidad de investigación de hasta 5-10 m dependiendo del tipo de suelo (Galvis, 2011).

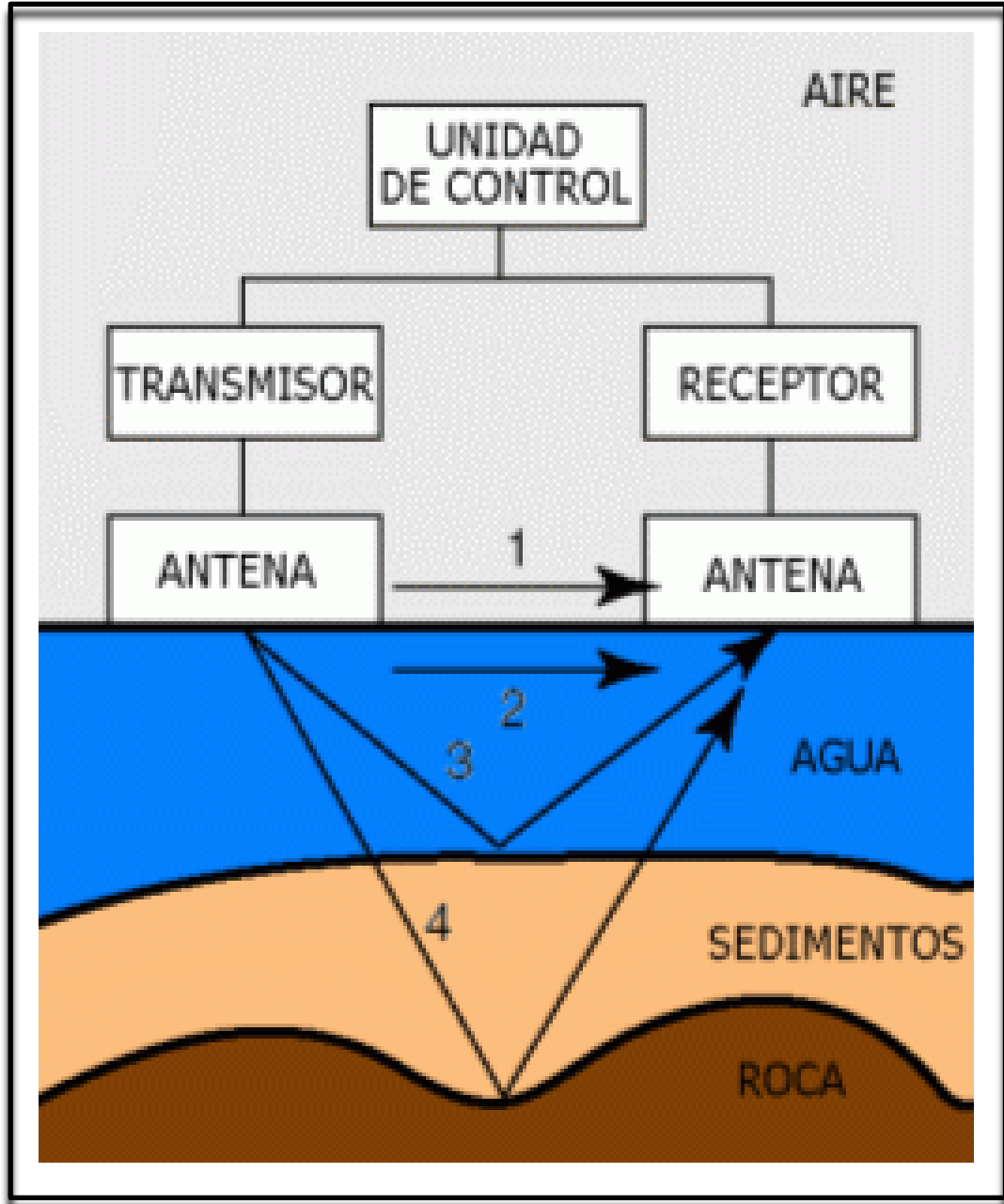


Figura 6. Esquema de funcionamiento del GPR (Gambini, s.f.).

3.1.1 Parámetros para adquisición de datos

Para la prospección utilizando GPR es necesario tomar en cuenta una serie de factores como son:

- Tipo de objetivo
- Profundidad del objetivo
- Propiedades, geometría y dimensión del objetivo
- Condiciones del terreno y ruido antrópico

En función de los factores nombrados anteriormente se define el tipo de antenas a utilizar y el arreglo de las mismas en base a la resolución y profundidad necesarias y se diseña la geometría de adquisición. Las antenas son los emisores y receptores de las ondas, pueden cumplir ambas funciones, se denominan monoestática cuando solo cumplen una función y biestáticas cuando son capaces de realizar ambas. Las monóstáticas son de dimensiones menores lo que las hace más portátiles que las biestáticas, mientras éstas últimas permiten realizar distintos tipos de arreglos de adquisición. También pueden clasificarse en blindadas y no blindadas, las primeras permiten mejor control sobre el ruido con mayor resolución mientras que las últimas alcanzan mayor profundidad a menor resolución (Zurita, et. al. 2002).

3.1.2 GPR en detección de filtraciones

Las características físicas de cualquier material son afectadas, si este es saturado con algún fluido, bien sea agua, hidrocarburo o cualquier otro.

Esta saturación genera variación en la conductividad del material, lo que ocasiona una pérdida de energía en el frente de ondas electromagnéticas que incide en él como consecuencia de campos eléctricos secundarios que se generan y toman la energía de la onda.

De esta manera, la reflexión generada llega con una intensidad de energía menor a aquella que tendría si se reflejara en una zona no saturada, el resultado de esto es un radargrama en el cual la zona atacada por la filtración se ve “opaca”, es decir, se proyecta en amplitudes de menor intensidad de energía, (Galvis, 2011).

3.2 MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS

Si se establece un campo electromagnético sobre la superficie del terreno, en los conductores del subsuelo se producirán corrientes eléctricas de acuerdo con las leyes de la inducción electromagnética. Estas corrientes originan campos electromagnéticos secundarios que alteran el campo primario en cualquier punto de la superficie. En general, el campo resultante, que puede ser investigado por medio de una bobina exploradora adecuada, diferirá del campo primario en intensidad, fase y dirección, por lo que revelará la presencia de los conductores (Parasnis, 1970).

3.2.1 Propiedades electromagnéticas de los materiales

Las propiedades eléctricas y magnéticas de un medio son cruciales en la aplicación de técnicas como el GPR, la cual detecta contrastes verticales y laterales de dichas propiedades. Las propiedades eléctricas de los suelos son altamente afectadas por factores como la humedad, porosidad, morfología, temperatura y composición química entre otros (Wtorek, 2003).

Las principales variables que definen el comportamiento electromagnético de un medio son conductividad, permitividad dieléctrica y permeabilidad magnética.

2.6.5.1 Conductividad eléctrica

Proporciona información de la respuesta de las cargas libres de un material en presencia de un campo eléctrico externo.

Pueden clasificarse los materiales según su conductividad en conductores, semiconductores y aislantes.

- Conductores: son los materiales que transmiten mejor la electricidad debido a la mayor cantidad de electrones libres que permiten el movimiento de las cargas, generalmente son elementos metálicos.
- Semiconductores: son materiales capaces de conducir la electricidad mejor que un aislante pero sin llegar a ser como un metal, dependiendo del campo eléctrico ante el cual es afectado y de la temperatura; la mayoría de los elementos en el subsuelo son semiconductores.
- Aislantes: materiales con escasa conductividad eléctrica debido a la escasez de electrones libres en su estructura.

3.2.1.2 Permitividad dieléctrica

(Romero P., 2009) Define la permitividad dieléctrica como la proporcionalidad entre la intensidad de un campo eléctrico externo aplicado y el vector de desplazamiento eléctrico. Proporciona un valor de respuesta de un material en presencia de un campo eléctrico externo.

3.2.1.3 Permeabilidad magnética

Relaciona la inducción magnética con la intensidad del campo magnético. Proporciona un valor de la susceptibilidad de un material a la magnetización (Martin, 2004). Los materiales se clasifican en ferromagnéticos, diamagnéticos y paramagnéticos.

- Ferromagnéticos: materiales que poseen un momento magnético permanente y manifiestan magnetizaciones permanentes.

- Diamagnéticos: son materiales que en presencia de un campo magnético externo experimentan momento magnético, el cual solo persiste en presencia del campo.
- Paramagnéticos: materiales que requieren de campos magnéticos de gran magnitud y temperatura elevada para presentar magnetización, por lo que se les considera no magnéticos.

En la figura 7 se muestra un esquema de cómo se modifica un campo magnético al introducir materiales con diferentes permeabilidades magnéticas.

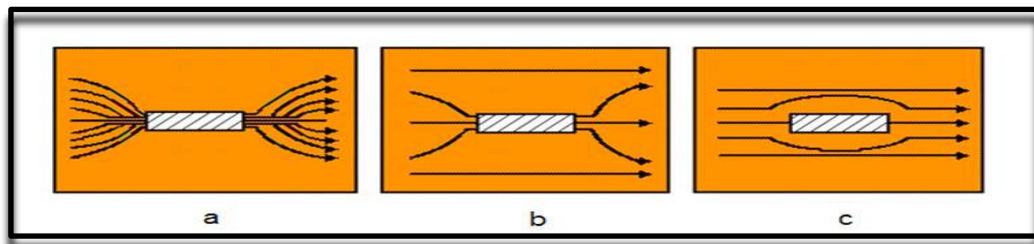


Figura 7. Modificación de un campo magnético en presencia de a) material ferromagnético, b) material diamagnético y c) material paramagnético. (Romero, 2009)

3.3 ADQUISICIÓN DE DATOS GPR

Consiste en la medición de los datos primarios de entrada, para lo cual se utilizó el programa de adquisición K2FastWave. Estos datos son evaluados y ordenados, para obtener información útil, que luego serán analizados en la fase de procesamiento por el usuario, para que pueda tomar las decisiones o realizar las acciones que estime conveniente.

3.4 PROCESAMIENTO DE DATOS GPR

Para el procesamiento se empleó una computadora PC con un programa que efectúa los procesos requeridos automáticamente y genera el resultado

deseado. Para el procesamiento de datos de georadares se pueden utilizar múltiples programas como:

- GPR-SLICE
- Radan GSSI
- IRIS
- REFLEXital
- GRESWIN2 (Utilizado para este trabajo de investigación)

3.4.1 Programa GRESWIN2

GRESWIN2 es un programa muy versátil que trabaja en una plataforma de Windows 98, elaborado para la percepción de datos de georadar que trabajan bajo sistemas RIS (Radares de Investigación de Suelos), en varios formatos, desarrollados y producidos por IDS *Igegneria di Sistemi S.p.A. – Italy, Pisa*.

En términos generales RIS – *Radar for Soil Investigation* – es un sistema de georadar dedicado al estudio del subsuelo, equipado con instrumentos de altas y bajas frecuencias, adaptado a la metodología de trabajo en la industria con un rendimiento de alta calidad.

El alto rendimiento de este equipo es debido a la versatilidad del equipo en cuanto a la matriz de antenas de multifrecuencias que permite obtener una perspectiva tridimensional del suelo a diferentes profundidades con distintas resoluciones y la gama de programas que sirven como herramientas para la fase de procesamiento y de elaboración de datos de georadar (IDS, 2003)

3.4.2 Parámetros de procesamiento

Para procesar los datos de campo adquiridos a través del programa K2FastWave es necesario aplicar diferentes comandos o algoritmos que se encargan de filtrar la señal de interés de las que se consideran ruido. Para

los efectos de este estudio los filtros aplicados a los datos adquiridos en campo son los siguientes:

Move start time: este comando permite al usuario calcular el punto cero o área de transición del medio investigado. Este algoritmo siempre debe aplicarse si el usuario quiere alinear la escala de profundidad de la hoja de radar actual con la posición de la superficie que está siendo investigada.

Background removal: este comando aplica para eliminar los componentes continuos a lo largo de la dirección X, utilizando los parámetros de referencia establecidos en la ventana que se muestra en la figura 8.

Vertical bandpass filter (TD): este comando aplica un filtro en la ventana de frecuencias deseadas, utilizando los parámetros establecidos en el programa de la ventana en la figura 8.

Linear gain: este comando aplica el filtrado lineal para el mapa seleccionado (utilizado para la ecualización de la potencia a lo largo del barrido sobre la base de una estimación de una tendencia lineal en la atenuación) utilizando los parámetros establecidos en la ventana que se muestra en la figura 8.

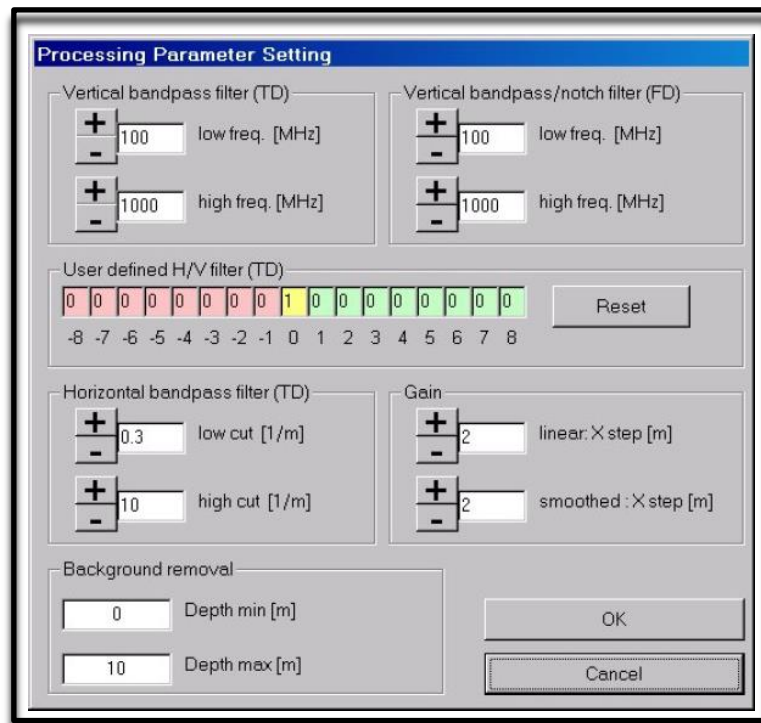


Figura 8. Ventana que muestra parámetros de procesamiento de los diferentes filtros. (IDS, 2003)

Una vez que se aplican los filtros necesarios a los datos, se procede a ajustar la escala de colores con que se presentan los radargramas, con la finalidad de resaltar las anomalías de interés en los mismos (figura 9).

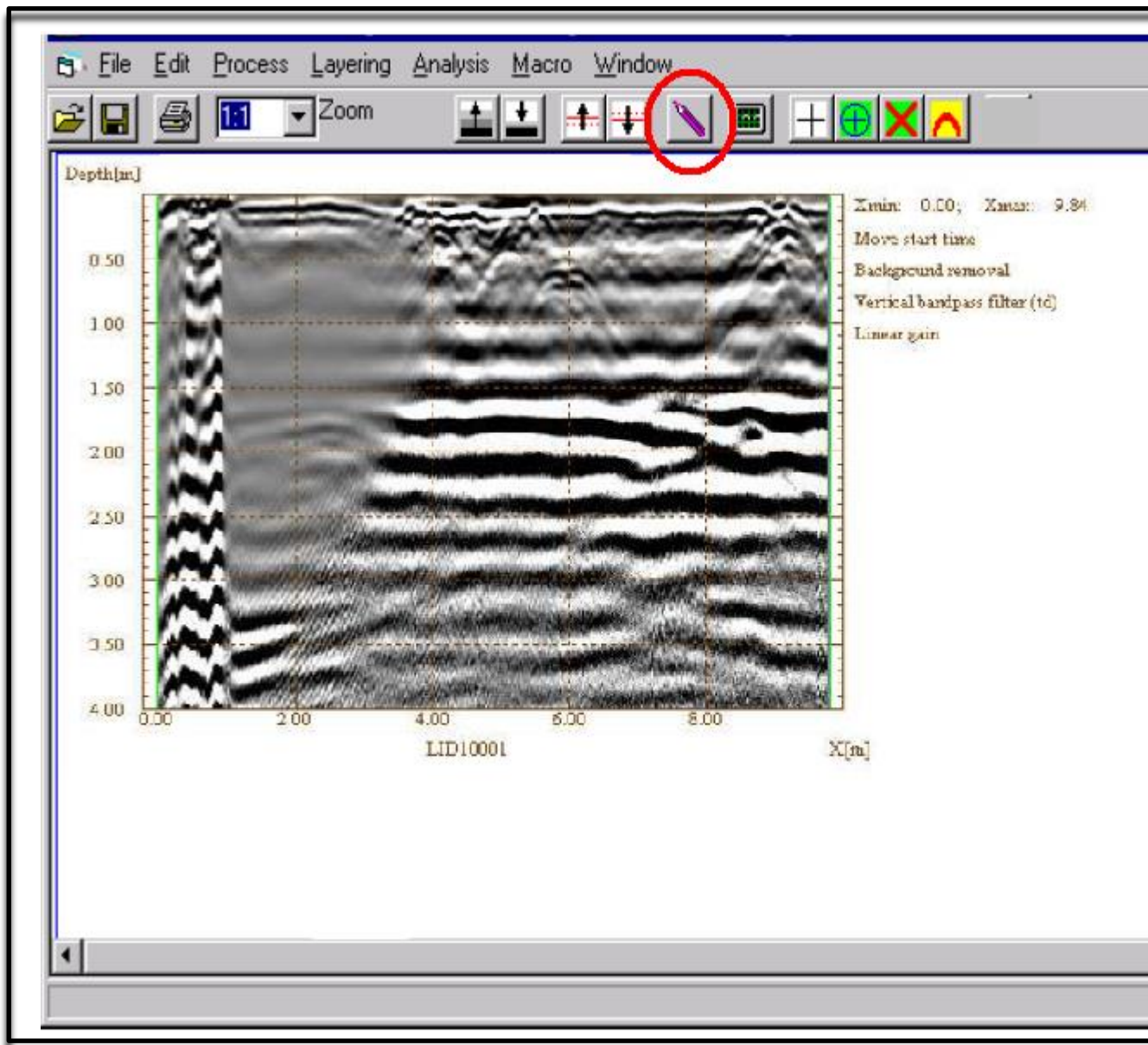


Figura 9. Ventana que muestra ambiente de procesamiento de radargramas. El círculo rojo demarca el botón con el cual se cambia la escala de colores. Modificado de (IDS, 2003).

Luego de cambiar la escala de colores, el radargrama se encuentra listo para ser interpretando. La imagen se exporta como un archivo en formato PDF.

3.5 TEXTURA DE ROCAS CLÁSTICAS

Conjuntamente con la parte de adquisición y procesamiento de datos geofísicos, en este trabajo de investigación se realizaron análisis desde el punto de vista geológico específicamente sedimentológicos, los cuales están enfocados a la morfología, tamaño y arreglo de los constituyentes.

3.5.1 Madurez textural y madurez mineralógica.

Los sedimentos clásticos son diferenciados o afectados desde la roca original por una serie de procesos como erosión, meteorización, alteración y transportación por un largo período de tiempo. Como los sedimentos están sujetos a estos procesos, existen materiales fáciles de alterar como las arcillas y otros más estables como el cuarzo (Navarro, 1999).

La madurez mineralógica es el grado de estabilidad que tienen los minerales constituyentes de la roca; en sí está determinado por los tipos de granos presentes. Mientras la madurez textural es definida por el grado de escogimiento, redondez y contenido del material intersticial de tamaño fino (matriz) (Navarro, 1999).

3.5.2 Análisis granulométrico

(Cocha, s.f.) El análisis granulométrico es la disciplina que estudia la composición granular de mezcla de partículas con el fin específico de describir su tamaño, su forma y distribución de tamaños. En general, las características de una partícula individual no son de interés, ya que lo que se pretende es describir una representación del sistema de partículas. Sin embargo, no es posible describir el sistema si no se conoce las propiedades de cada partícula. Una vez definidas estas propiedades, se describe el sistema haciendo uso de conceptos estadísticos.

3.5.3 Aplicaciones del tamaño de grano

Según (Navarro, 1999) el tamaño de grano de un sedimento clástico es la medida de energía de depositación promedio y la energía de la cuenca de

deposición; está controlado por la competencia del medio de transporte y el tamaño inicial del material fuente.

El tamaño de las partículas refleja:

- La “habilidad” de diferentes tamaños de granos de pre-existir dentro del material.
- La resistencia de las partículas a la meteorización, erosión y abrasión.
- El proceso de transportación y deposición como la “habilidad” del viento o agua de mover y depositar partículas, en especial la competencia del flujo.

La figura 10 muestra la distribución de tamaños de granos en los sedimentos, que se relaciona con (1) la habilidad de los diferentes tamaños de las partículas en el materia fuente, y (2) los procesos que operan donde los sedimentos son depositados, particularmente la competencia del flujo (Navarro, 1999).

U.S. Standard Malla del Tamiz		Milímetros	Phi (ϕ) Unidades	Escala de Wentworth		
GRAVA		4096	-12	Bloques (Cantos)	Gravas Conglomerados	
		1024	-10			
		256	256 -8	Cantos (Guijarros)		
		64	64 -6	Guijarros		
		16	-4	Gránulos		
	5	4	4 -2			
	6	3.36	-1.75			
	7	2.83	-1.5			
		8	2.38	-1.25		
		10	2.00	2 -1.0		
	12	1.68	-0.75	Arena muy gruesa		
	14	1.41	-0.5			
ARENA		16	1.19	-0.25	Areniscas	
		18	1.00	1 0.0		
		20	0.84	0.25		Arena gruesa
		25	0.71	0.5		
		30	0.59	0.75		Arena Media
		35	0.50	1/2 1.0		
		40	0.42	1.25		
		45	0.35	1.5		Arena fina
		50	0.30	1.75		
		60	0.25	1/4 2.0		Arena muy fina
		70	0.210	2.25		
		80	0.177	2.5		
		100	0.149	2.75		Limo Grueso
		120	0.125	3/8 3.0		
		140	0.105	3.25		Limo medio
	170	0.088	3.5			
	200	0.074	3.75			
	230	0.0625	1/16 4.0	Limo fino		
	270	0.053	4.25			
	325	0.044	4.5	Limo muy fino		
		0.037	4.75			
LODO	LIMO		1/32 5.0	Arcilla	Limolitas	
			0.0156			1/64 6.0
			0.0078			1/128 7.0
		0.0039	1/256 8.0	Lutitas		
		0.0020	9.0			
		0.00098	10.0			
ARCILLA		0.00049	11.0			
		0.00024	12.0			
		0.00012	13.0			
		0.00006	14.0			

Figura 10. Escala del tamaño del grano de los sedimentos y sus correspondientes valores en la escala Phi. (Fajardo, 2011)

3.5.4 Escogimiento

El escogimiento es la medida del rango de los tamaños de granos presentes y la magnitud ancho o angosto de éstos tamaños alrededor del tamaño

promedio. Varios autores reconocen que el coeficiente de escogimiento está muy ligado al tamaño de granos promedio. Los tamaños de granos entre 0,1 a 0,2 mm, exhiben los mejores escogimiento (Navarro, 1999).

Cuando el coeficiente de escogimiento es 1, la muestra es homogénea. Normalmente una muestra heterogénea tiene valores de coeficiente de escogimiento mayores a 1. En el caso, que sedimentos residuales tienen coeficiente de escogimiento menores a 1, esto es originado cuando sedimentos depositados con las condiciones normales son retrabajados o el viento transporta las fracciones finas (Navarro, 1999).

El escogimiento es utilizado como un indicador ambiental, ya que es indicativo en forma general de la energía promedio del agente de transporte. En general, un mal escogimiento es exhibido por sedimentos de granos gruesos como abanicos aluviales y morrenas, mientras que las gravas de playa son mejor escogidas que las de río. En ambientes modernos se tienen que las arenas costeras presentan mejor escogimiento que las arenas marinas sublitoral, arenas intermareales y arenas fluviales. Las arenas de dunas y de origen eólico son las mejores escogidas (Navarro, 1999).

3.5.5 Gráficos estadísticos

Estos gráficos estadísticos se construyen con la finalidad de presentar una visión gráfica de los resultados de análisis granulométricos hechos a las diferentes muestras.

- **Histograma de frecuencia**

(Navarro, 1999) Es la representación gráfica en forma de barras, de la frecuencia de aparición en cada una de clases de tamaño, ya sea en escala Φ o en mm. Esta representación se puede hacer de forma relativa o absoluta. El histograma provee un sencillo método para

representar las distribuciones de tamaños de granos en una muestra (Navarro, 1999).

El valor de frecuencia para cada clase ($\%P_{\text{corr}} \text{ Clase}$) es la suma de los $\% P_{\text{corr}}$ que pertenecen a dicha clase. Mientras que las marcas de clases, representan los puntos medios de los techos de los rectángulos en el histograma.

A partir del histograma de frecuencia es posible obtener:

- a) Moda: corresponde a la clase de mayor frecuencia en el histograma.
- b) Modalidad: es el número de modas presentes de una distribución granulométrica. Una distribución que contenga una sola moda se llama *unimodal*, la que contenga dos modas se llama *bimodal* y cuando contienen más de dos modas se definen como *polimodal*.

- **Curva de frecuencia o polígono de frecuencia**

Es una curva continua, suave y cerrada que se determina por la unión de las marcas de clases dentro del histograma de frecuencia. Esta curva de frecuencia y el polígono de frecuencia son distintos, ya que éste último se obtiene de la estricta unión de las marcas de clases en el histograma de frecuencia, dando lugar a una curva cerrada y segmentada, mientras una curva de frecuencia conecta los puntos medios de las clases de tamaño de grano de un histograma con una curva suave aproximada (Navarro, 1999) (figura11).

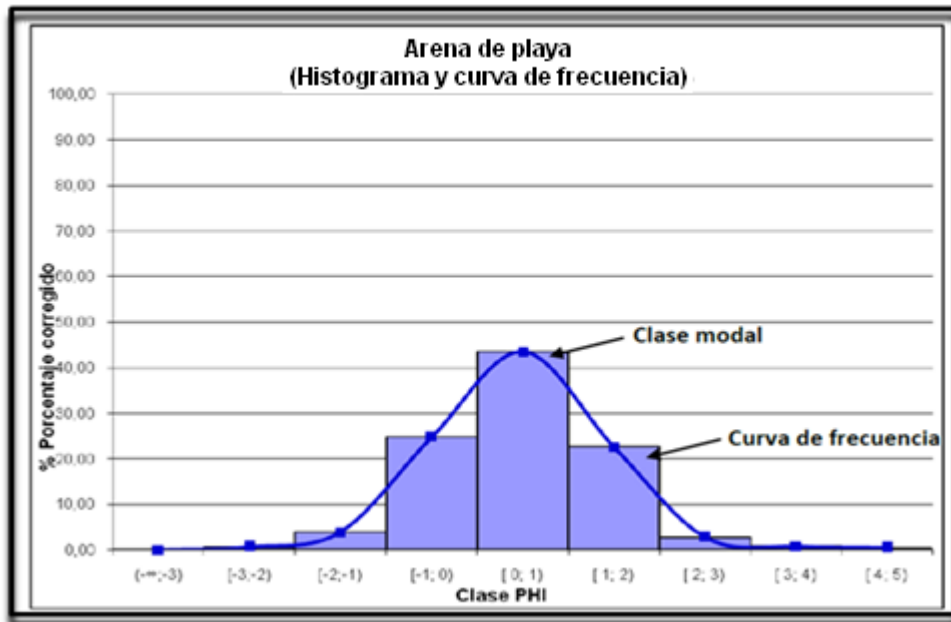


Figura 11. Histograma y curva de frecuencia (Fajardo, 2011)

- **Curva acumulativa**

La curva acumulativa es generada al graficar los porcentajes de peso acumulado, se utiliza para calcular varios parámetros estadísticos importantes del tamaño de grano. En sí, resulta de graficar el tamaño Φ versus el $\% W_{Acum}$ a través de una línea curva de tendencia ascendente, asintótica en la frecuencia 0 y 100%. Puede ser graficada en escala aritmética ordinaria o en probabilidad logarítmica (Navarro, 1999).

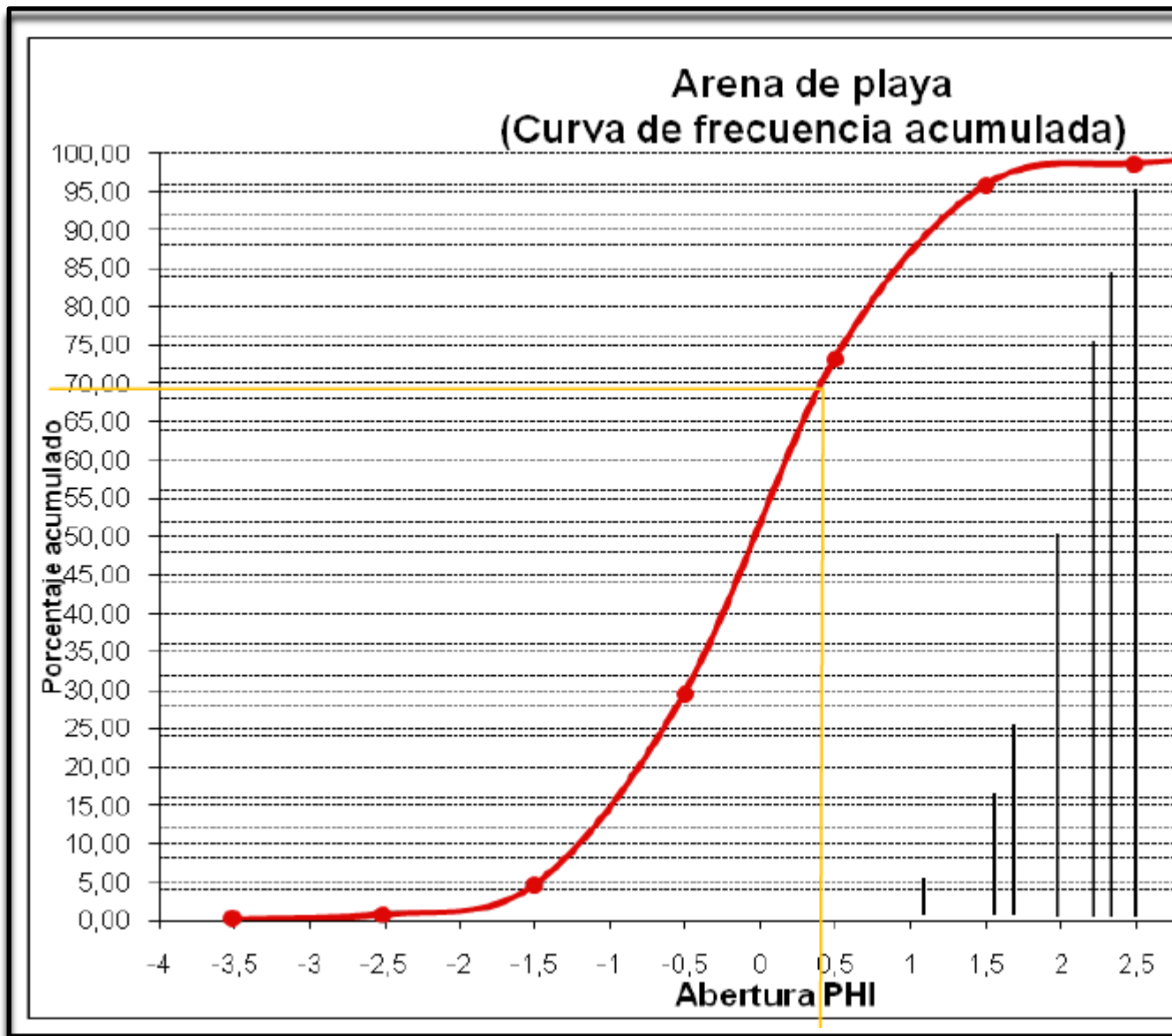


Figura 12. Curva de frecuencia acumulada. (Fajardo, 2011)

Por medio de la curva acumulativa se determina un conjunto de datos llamados PERCENTILES, que luego son empleados en el cálculo de los parámetros granulométricos. Cada percentil representa el valor en el eje de las abscisas (en éste caso Φ) para un porcentaje de

frecuencias dados. Los percentiles se obtienen a partir de la curva cumulativa: así, el percentil 75 (Φ_{75}) representa el valor de Φ cuando el porcentaje de frecuencia es igual a 75 (Navarro, 1999).

3.5.6 Apreciaciones de las gráficas granulométricas

Con los gráficos estadísticos usados para representar la distribución granulométrica de los sedimentos se puede extraer la siguiente información:

- La moda: nos permite establecer el tamaño de grano promedio o predominante de sedimento. La clase más frecuente dentro del histograma de frecuencia de la clase modal. Este dato es muy importante, en especial cuando el sedimento contiene varias clases con tamaños destacados, ya que señala el tamaño promedio de los granos y la energía media del ambiente (Navarro, 1999).
- La modalidad: determina el número de modas, es decir, los tamaños de granos sobresalientes. La presencia de varias modas sugiere que las partículas derivan de varias fuentes de aportes. El tipo de modalidad refleja cambios en la historia sedimentaria, ya sea por cambio de dirección de corriente o de fuentes de aporte (Navarro, 1999).
- Asimetría: se determina con la curva de frecuencia y plasma el escogimiento a través de la cola de la población de tamaño de grano. Las poblaciones que una cola de exceso de partículas finas tienen asimetría positiva o asimetría fina y las poblaciones que tienen una cola de exceso de partículas gruesas son asimetría negativa o asimetría gruesa (Navarro, 1999).
 - Asimetría positiva: es una curva donde la cola se extiende hacia los tamaños pequeños de granos. Indicando que la energía promedio del agente de transporte se desplazó hacia valores más bajos de los predominantes.

- Asimetría negativa: es una curva donde la cola se extiende hacia los tamaños gruesos de granos. Refleja los cambios de energía promedio del agente de transporte hacia valores más altos de los predominantes.

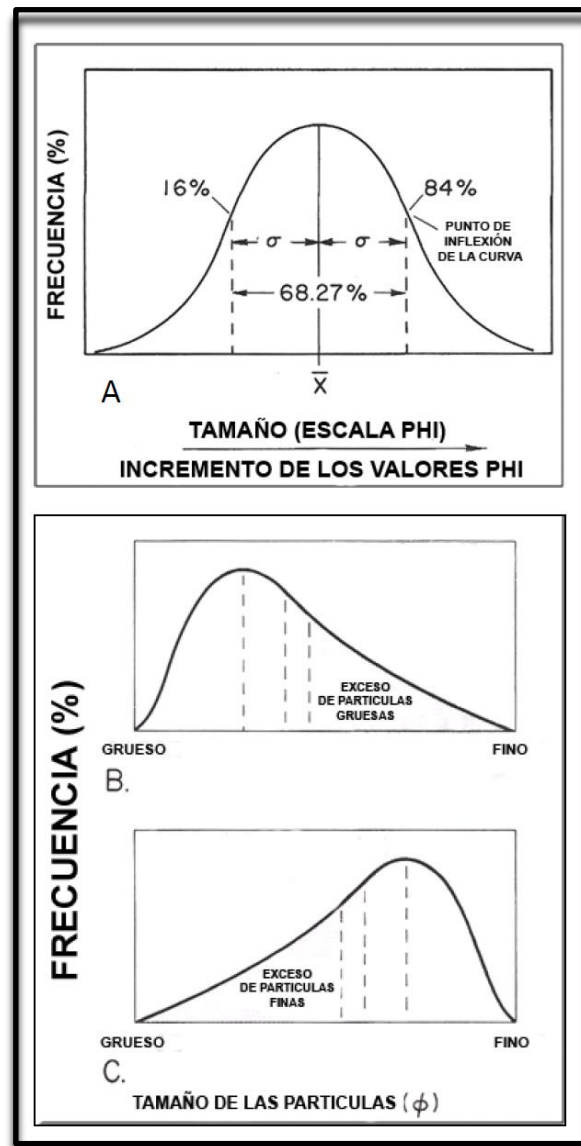


Figura 13. Tendencias de la curva de frecuencia: A) normal, B) simétrica gruesa, C) asimétrica fina. (Fajardo, 2011)

3.5.7 Parámetros granulométricos

En algunos casos, el tamaño de grano promedio y el escogimiento no se pueden determinar muy claramente por inspección visual de las curvas de tamaño de grano. Para solventar esta desventaja los métodos matemáticos permiten dar un tratamiento estadístico de los datos de tamaño. Para el cálculo de los parámetros granulométricos se trabajara con los percentiles Φ_{95} , Φ_{84} , Φ_{75} , Φ_{50} , Φ_{25} , Φ_{16} y Φ_5 . En donde:

- Mediana: es el tamaño que tiene el 50% de los granos gruesos y el 50% de los granos finos, es decir, indica el tamaño medio, el nivel de energía en el ambiente sedimentario y se calcula directamente de la curva acumulativa. Modificado de (Navarro, 1999).

$$Md = \Phi_{50}$$

Md = Mediana; Φ = Percentil

Ecuación 1. Ecuación de la mediana

- Coefficiente de escogimiento: indica el grado de escogimiento de las muestras y la respuesta de las fluctuaciones en el nivel de energía de la corriente basándose en la variedad de tamaños (Navarro, 1999).

$$\sigma_1 = \frac{(\Phi_{84} - \Phi_{16})}{4} + \frac{(\Phi_{95} - \Phi_5)}{6,6}$$

σ = Coeficiente de escogimiento; Φ = Percentil

Ecuación 2. Ecuación de escogimiento

La tabla 2 muestra los parámetros para elegir el grado de escogimiento

Tabla 2. Intervalos del grado de escogimiento (Navarro, 1999)

σ_1	GRADO DE ESCOGIMIENTO
< 0.35	Muy bien escogido

0.35 - 0.50	Bien escogido
0.50 - 0.71	Moderadamente bien escogido
0.71 - 1.00	Moderadamente escogido
1.00 - 2.00	Mal escogido
2.00 - 4.00	Muy mal escogido
> 4.00	Extremadamente mal escogido

- Coeficiente de asimetría: indica la asimetría de la curva de frecuencia, es útil en la interpretación de las tendencias de la energía promedio del agente de transporte.

$$SK_I = \frac{\phi_{84} + \phi_{16} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_{95} + \phi_5 - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$$

SK_I = Coeficiente de asimetría; ϕ = Percentil

Ecuación 3. Ecuación de asimetría.

La tabla 3 muestra los parámetros para determinar los intervalos de asimetría.

Tabla 3. Intervalos de asimetría. (Navarro, 1999)

SK₁	ASIMETRÍA
1.0 a 0.3	Muy asimétrica hacia tamaños finos
0.3 a 0.1	Asimétrica hacia tamaños finos
0.1 a -0.1	Casi asimétricas
-0.1 a -0.3	Asimétrica hacia tamaños gruesos
-0.3 a -1.0	Muy asimétrica hacia tamaños gruesos

- Coeficiente de angulosidad: indica el grado de agudeza o angulosidad de la curva frecuencia, lo cual es reflejo del grado de escogimiento. (figura 14) (Navarro, 1999). Se define con los siguientes términos:

- Platicúrtica: con valores pequeños para el coeficiente.
- Mesocúrtica: con valores medianos para el coeficiente.
- Leptocúrtica: con valores grandes para el coeficiente

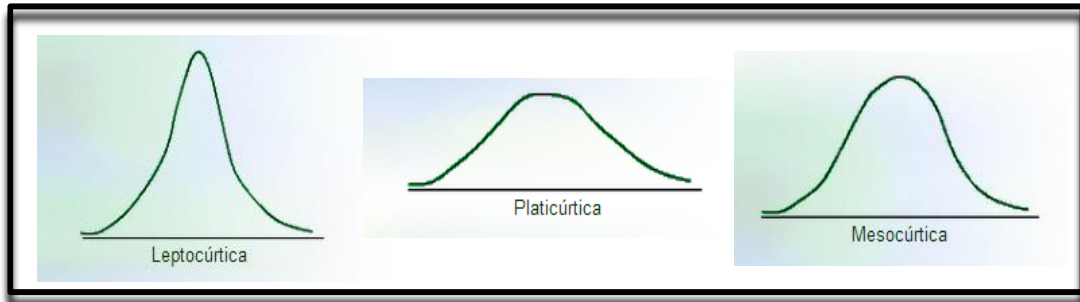


Figura 14. Tipo de curvas de frecuencia. Modificado de (Universidad Católica de Valparaíso, s.f.)

$$K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2,44(\phi_{75} - \phi_{25})}$$

K_G = Coeficiente de angulosidad; ϕ = Percentil

Ecuación 4. Curtosis o kurtosis o ecuación de angulosidad gráfica.

La tabla 4 muestra los parámetros para determinar la angulosidad.

Tabla 4. Intervalos de kurtosis (Navarro, 1999)

K_G	KURTOSIS
-------	----------

< 0.67	Muy platicúrtica
0.67 - 0.90	Platicúrtica
0.90 - 1.11	Mesocúrtica
1.11 - 1.50	Leptocúrtica
1.50 - 3.00	Muy leptocúrtica
> 3.00	Extremadamente leptocúrtica

- Peso corregido: Calculo que se realiza para corregir el error generado por el factor de perdida

$$P_{corr} = \frac{(P_{Ti} * P_{Ret})}{P_{Tf}}$$

P_{corr} = Peso corregido; P_{Ti} = Peso inicial; P_{Ret} = Peso retenido en matriz; P_{Tf} = peso total final

Ecuación 5. Ecuación que se utiliza para el cálculo de peso corregido

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

Este capítulo reseña todas las técnicas aplicadas durante la elaboración de esta investigación. Describe las técnicas geológicas implementadas como la tecnología utilizada a través de la geofísica; así como la adquisición de datos en campo, procesamiento de datos y la integración de los datos geológicos y geofísicos.

4.1 MÉTODOS GEOFÍSICOS. RADAR DE PENETRACIÓN DE SUELOS (GPR).

Para la adquisición de radargramas se utilizaron los siguientes equipos (*IDS INGEGNERIA DEI SISTEMI*):

Elementos principales:

- 1 antena 200 MHz (TR-200 K2).
- Mango de agarre en “T” con dos extensores (tubos plásticos).
- 1 cargador de batería (para corriente alterna).
- 1 antena receptora (RX) 40 MHz (TR-40 K2).
- 1 antena transmisora (TX) 40 MHz (TR-40 K2).
- 1 radio/antenna (DAD FAST WAVE). PN AS02850_A. SN 063.
- 1 odómetro de rueda.
- 1 odómetro de hilo.
- Cables, GPS y marcadores (hilos usados como guías en superficie)

4.1.1 Conexión y ensamblaje del GPR.

A continuación, se describen los pasos: para el ensamblaje y los componentes del equipo (figura 15).



Figura 15. Morral y componentes (IDS, 2005)

1. - Computador portátil.
2. - Soporte del computador.
- 3.- Correas de ajuste.
- 4.- Morral.
- 5.- Batería.
- 6.- Cables de conexión de batería.
- 7.- Cables de conexión LAN.
- 8.- DAD o radiotransmisor.

Para el ensamblaje del equipo en el morral se siguieron uno a uno los pasos descritos a continuación en el orden establecido:

Paso 1. Se inserta el DAD o radiotransmisor en el bolsillo central del morral (figura 16)

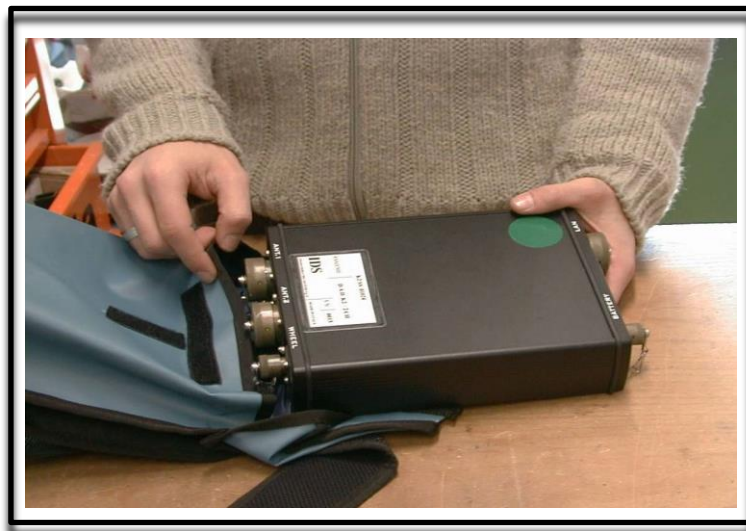


Figura 16. DAD y compartimiento central del morral (IDS, 2005)

Se garantiza que el DAD quede colocado de la forma correcta, conservando el orden de las conexiones como se ilustra en la figura 17.



Figura 17. DAD y morral (IDS, 2005)

Paso 2. Una vez insertado el DAD en el morral se realizan las conexiones de los cables de la batería y LAN. En el bolsillo inferior del morral se introduce la batería de manera que los conectores coincidas con las del DAD (figura 18).

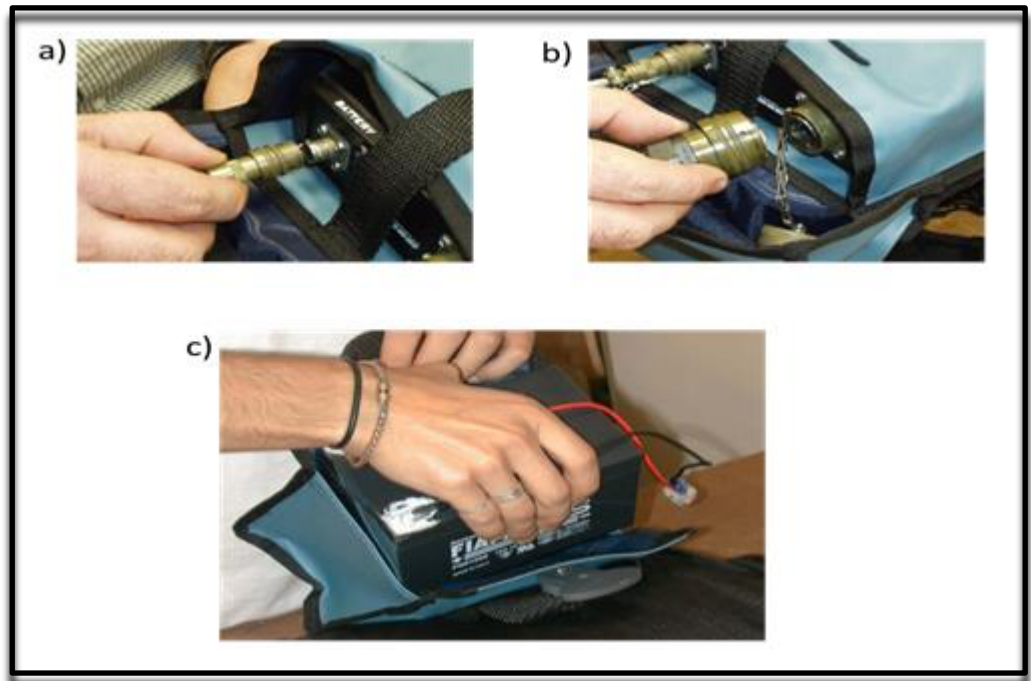


Figura 18. a) Conexión de batería; b) conexión LAN; c) batería. Modificado de (IDS, 2005)

Paso 3. Luego de asegurar la batería en su compartimiento se engancha las correas al sostenedor del PC y se fija al morral (figura 19).

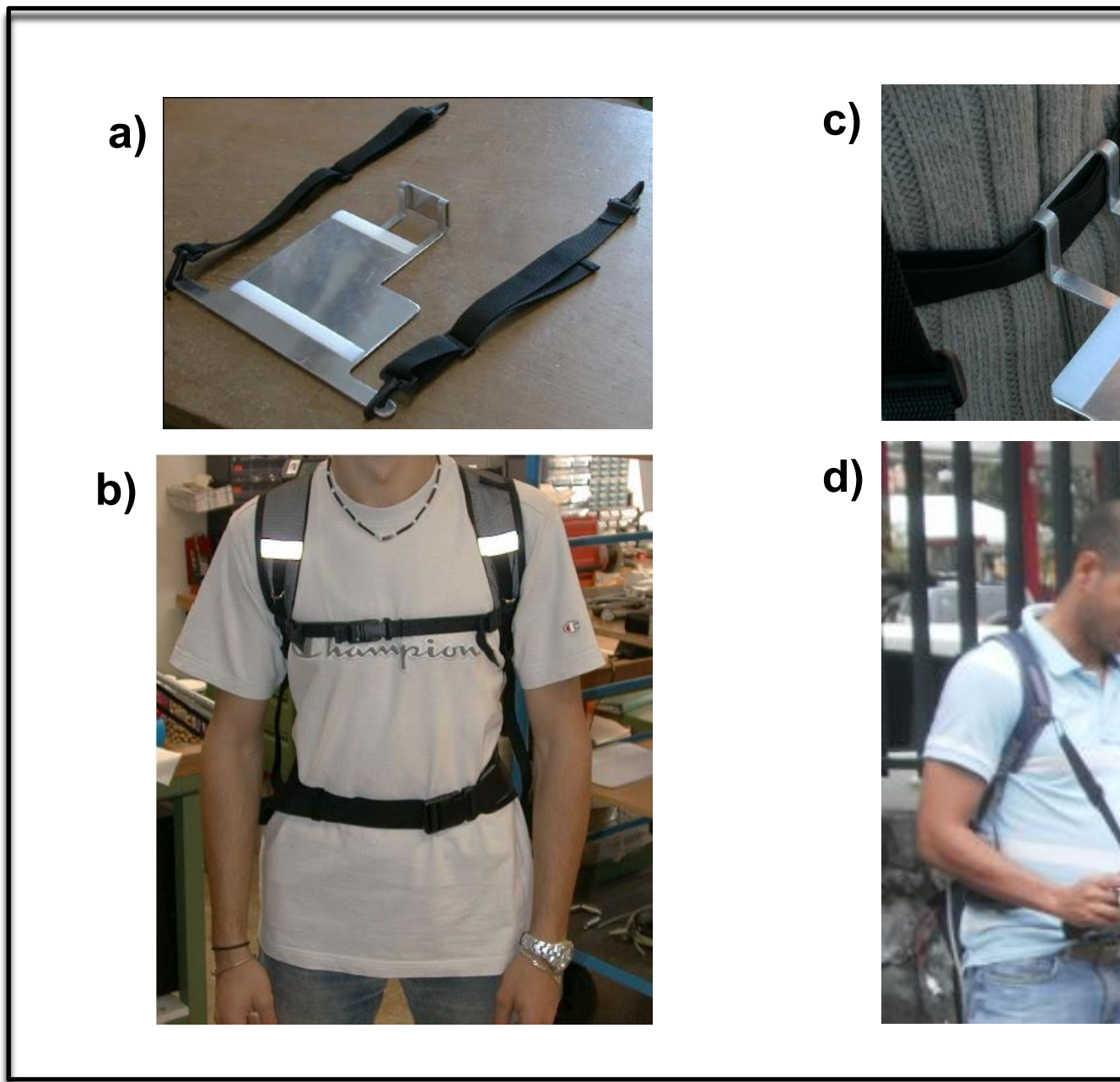


Figura 19. a) Sostenedor de PC y correas de ajuste; b) morral asegurado; c) sostenedor de PC asegurado; d) sostenedor de PC, PC y morral. Modificado de (IDS, 2005).

Paso 4. Por último se hacen las conexiones LAN del DAD al computador y la conexión de la batería al DAD en estricto orden como se ilustra en la figura 20.

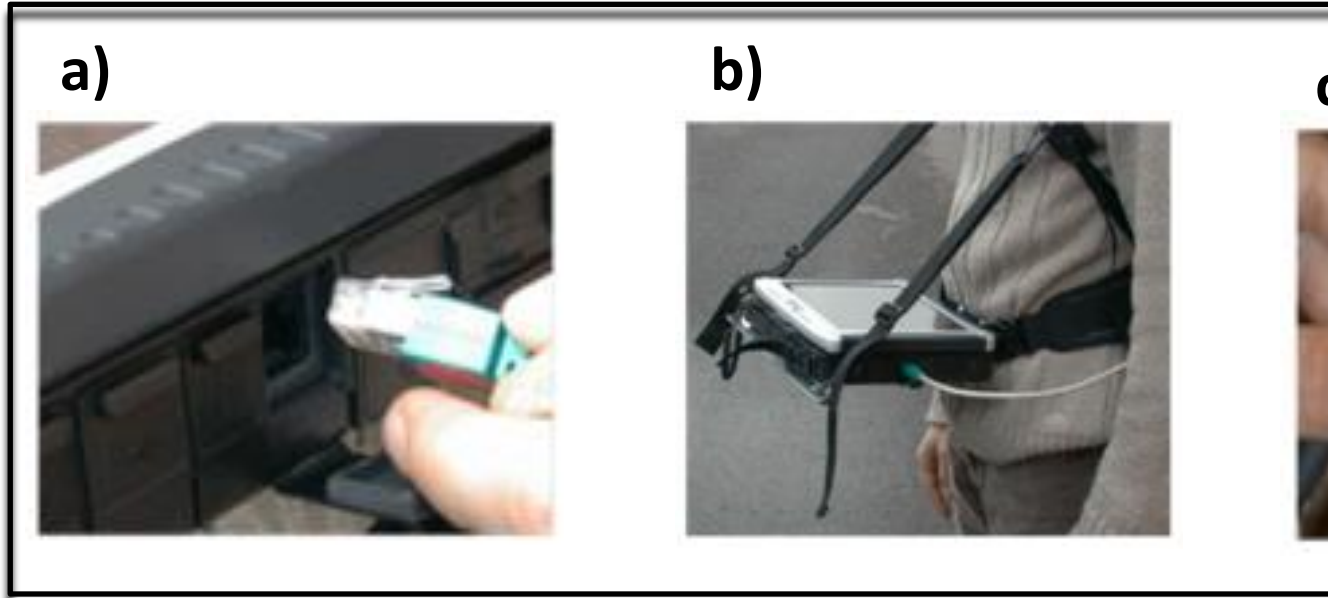


Figura 20. a) Conexión LAN de PC; b) PC, conexión LAN y soporte de PC; c) conexión de batería. Modificado de (IDS, 2005)

Una vez terminadas todas las conexiones se puede empezar los barridos después de que las antenas sean ensambladas y conectadas al equipo como se ilustra en la figura 21.

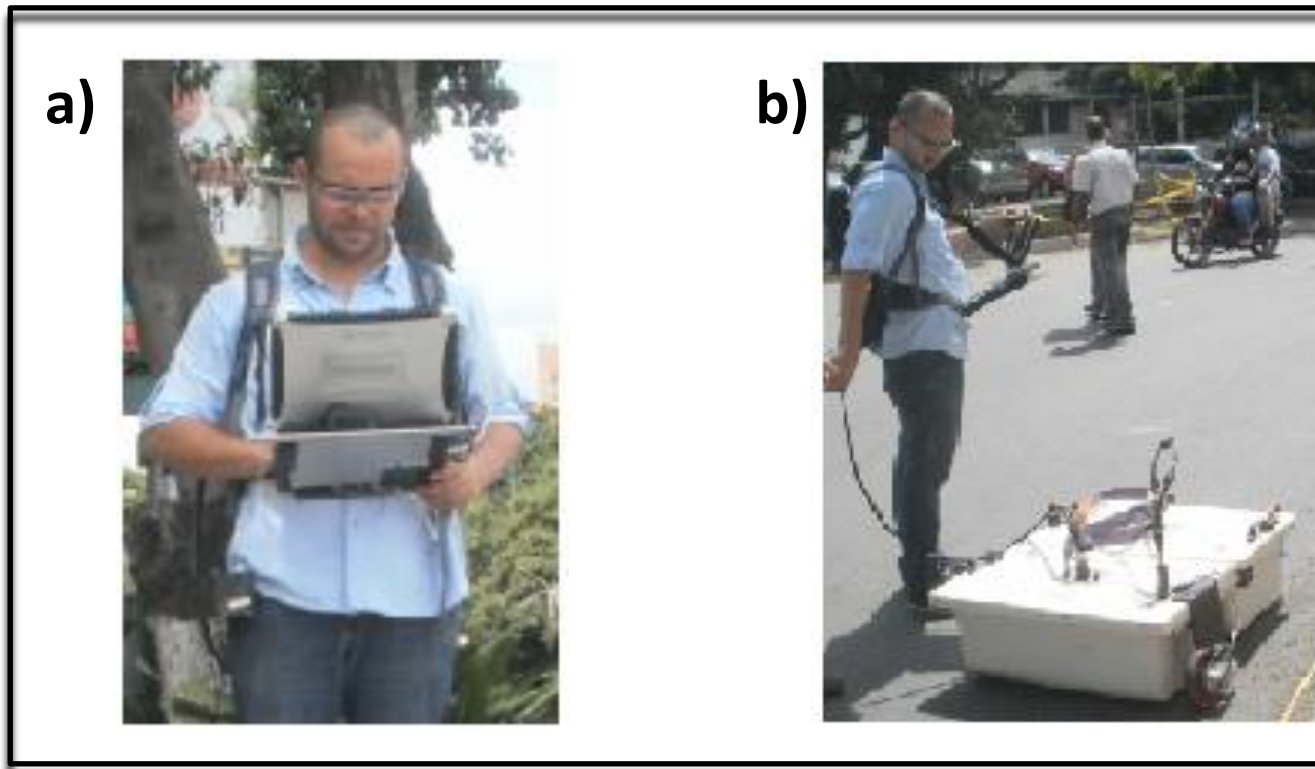


Figura 21. a) Operador; b) operador y antena

Paso 5. Por último se enciende el DAD en el botón de encendido que se encuentra entre la conexión de la batería y la conexión LAN como se ve en la figura 22.



Figura 22. DAD y botón de encendido. Modificado de (IDS, 2005)

4.1.2 Etapa de adquisición

Una vez establecida la logística de trabajo, se procedió al inicio de la campaña de adquisición la cual fue dividida en dos etapas; la primera de ellas consistió en priorizar y precisar las zonas de estudio, basados en datos de estudios previos. Una vez hecho esto, se pasó a la etapa de distribución de mallados en las zonas designadas como prioridad, donde posteriormente se realizaran los sondeos GPR.

La primera campaña de adquisición (Adquisición 1) tuvo lugar en las cercanías del frente de obra de Bello Campo, específicamente en la av. Libertador donde se definieron 5 perfiles, la segunda campaña (Adquisición 2) se realizó en el estacionamiento del supermercado CADA ubicado en la intersección de la av. Jalisco y la av. Principal de las Mercedes, tomando también mediciones sobre ambas avenidas, para alcanzar un total de 9

perfiles, y en la última campaña (Adquisición 3) se establecieron 25 perfiles en la estación de servicio Miguel Ángel ubicada en Bello Monte. En total se obtuvieron 39 perfiles a lo largo de las tres campañas de adquisición.

Para la adquisición de datos con el GPR se utilizó el programa K2 FAST WAVE. Este programa se encarga del registro en tiempo real de datos que usualmente llamamos radargramas. La figura 23 muestra como se ve la ventana de inicio de dicho programa.

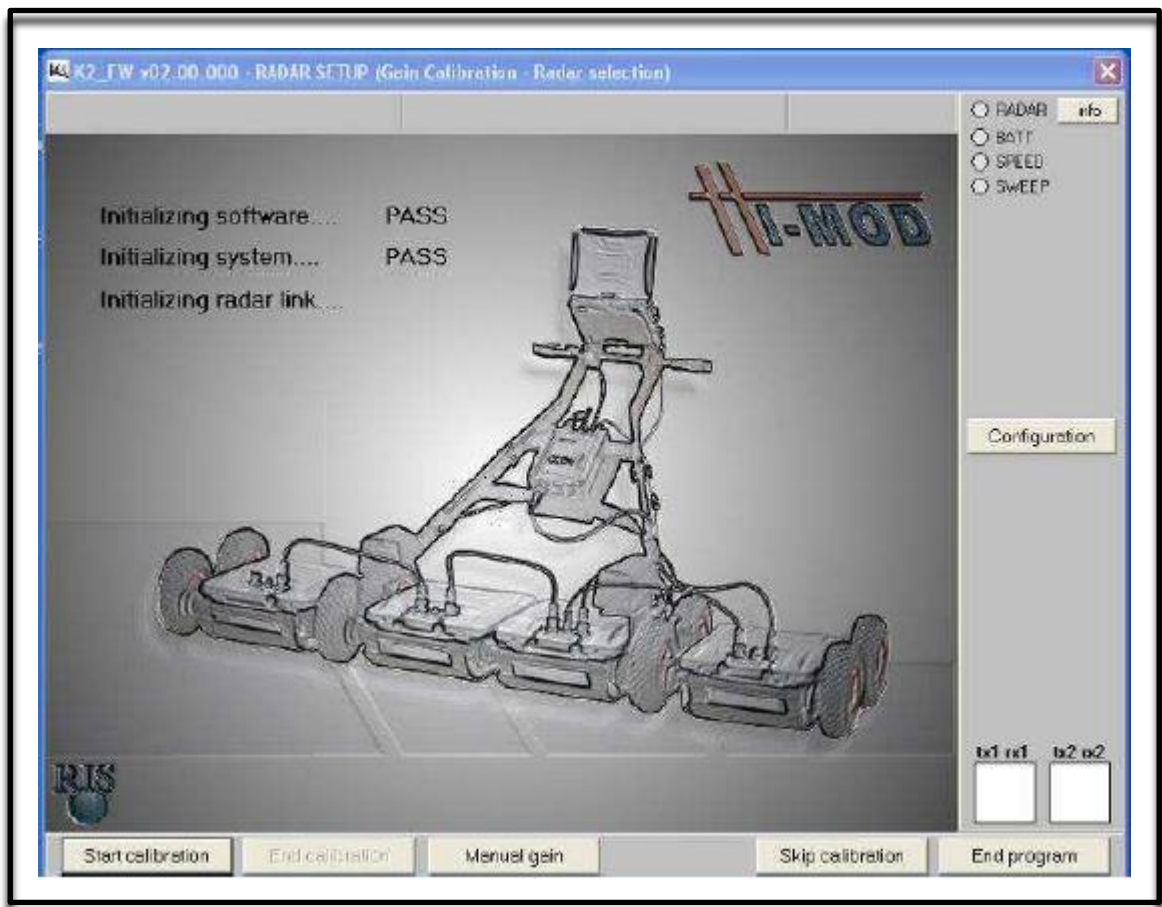


Figura 23. Ventana de inicio programa K2 FAST WAVE (IDS, 2009)

Después de iniciar el programa se presiona el botón configuración y automáticamente se abre la ventana "Radar selection", donde se selecciona

la antena a utilizar (figura 24) y se confirma la lectura de la misma. Una vez que la computadora confirma la lectura de la antena y de los demás componentes, se procede a la calibración de la ondicula y por último la calibración del equipo (figura 25), vale destacar que es a *sensu stricto* el orden en que se deben realizar ambas calibraciones.

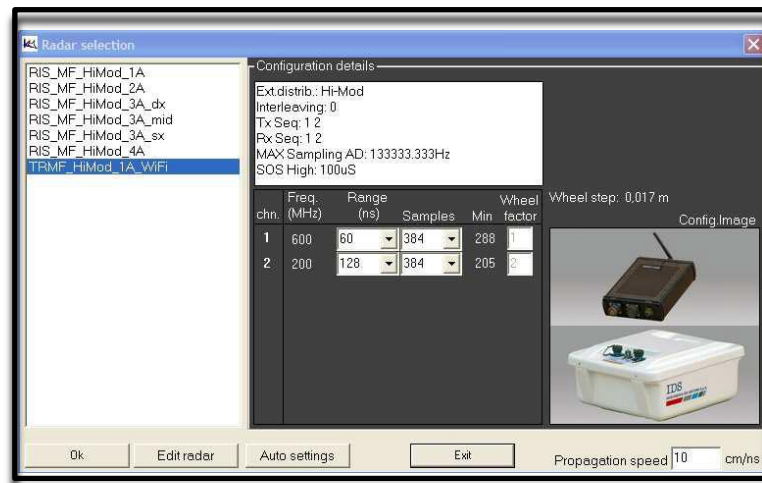


Figura 24. Ventana de selección de radar. (IDS, 2009)

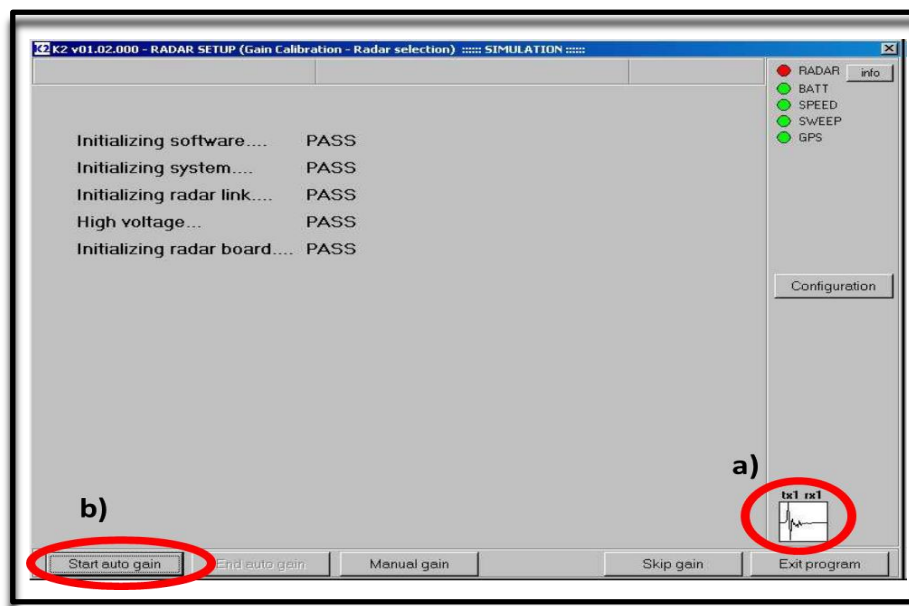


Figura 25. Programa K2 Fast Wave. a) Botón de calibración de ondícula; b) botón de calibración de equipo. Modificado de (IDS, 2009)

Se asigna el nombre del archivo en relación al sondeo que se vaya a hacer (figura 26) y posteriormente se asigna el nombre al perfil a adquirir. Por último se presiona el botón de “Star Scan” (figura 27) y se pasa el equipo sobre el perfil demarcado en la superficie del suelo.

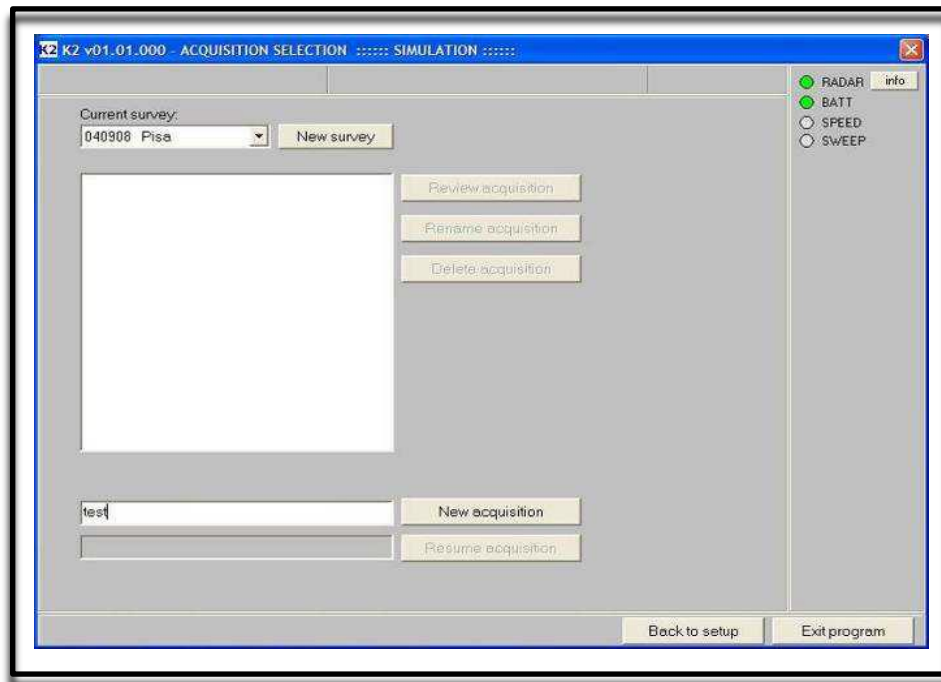


Figura 26. Programa K2 Fast Wave. Ventana de selección de Adquisición. Modificado de (IDS, 2009)

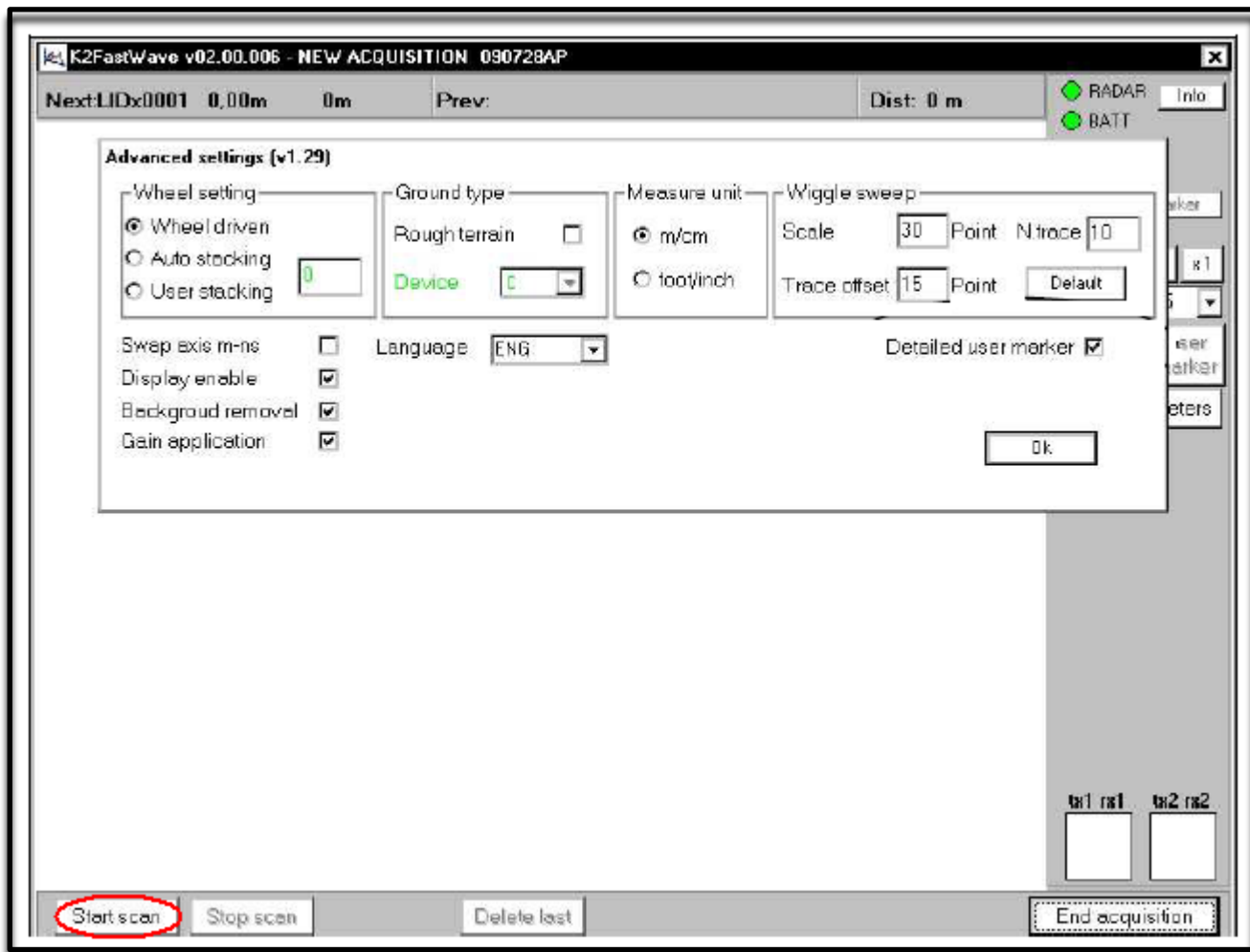


Figura 27. Programa K2 Fast Wave. Ventana de Nueva Adquisición; Botón Start scan.
Modificado de (IDS, 2009)

4.1.3 Procesamiento de datos

Para el procesamiento de los datos adquiridos se utilizó el programa GRESWIN2 que procesa solo registros de perfiles de impedancia electromagnética en el subsuelo a profundidades someras.

Este programa contiene un menú de filtros que permite afinar los perfiles adquiridos con el GPR. Para este trabajo solo se utilizaron los siguientes filtros a *sensu stricto* con las teclas F1, F2, F3 y F4:

- Move start time (F1)
- Background removal (F2)
- Vertical bandpass filter (F3)
- Linear gain (F4)

La figura 28 muestra un registro sin haber sido procesado.

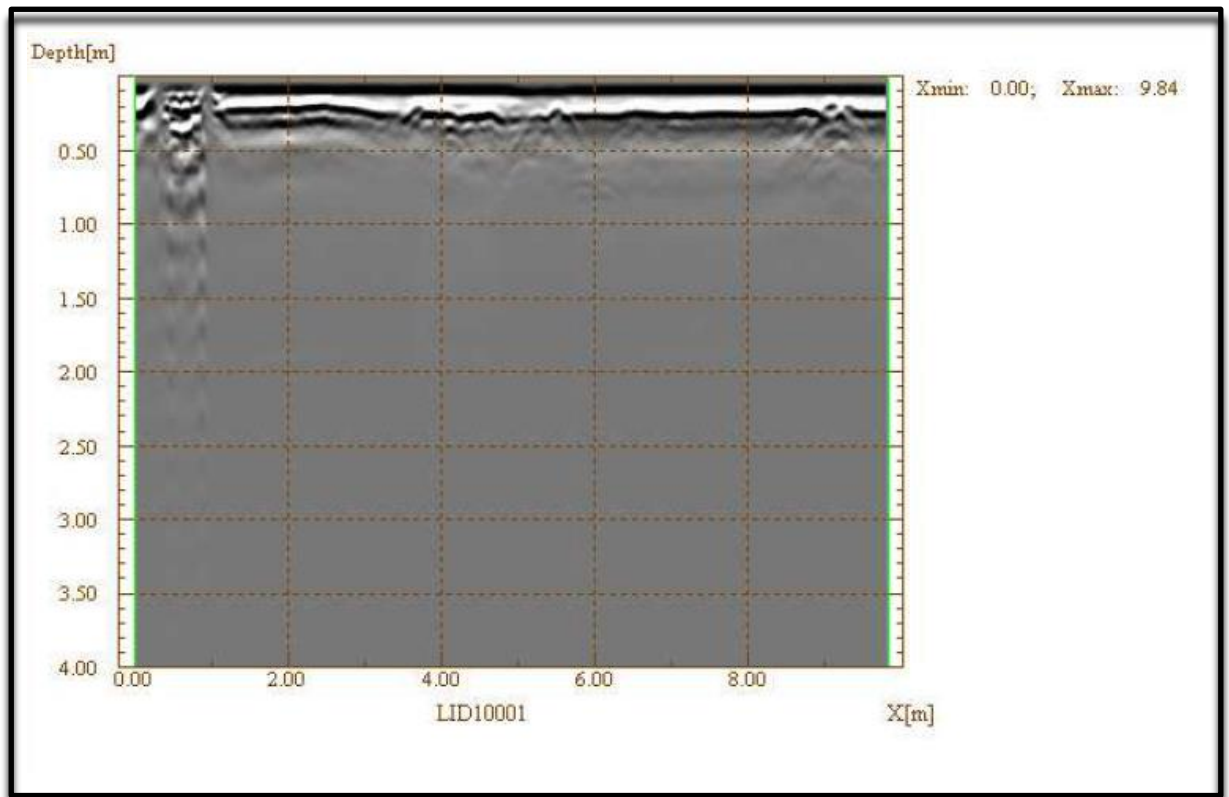


Figura 28. Radargrama sin procesar obtenido con K2 FAST WAVE.

Una vez aplicado los filtros antes mencionados el radargrama se modifica como se muestra en la figura 29.

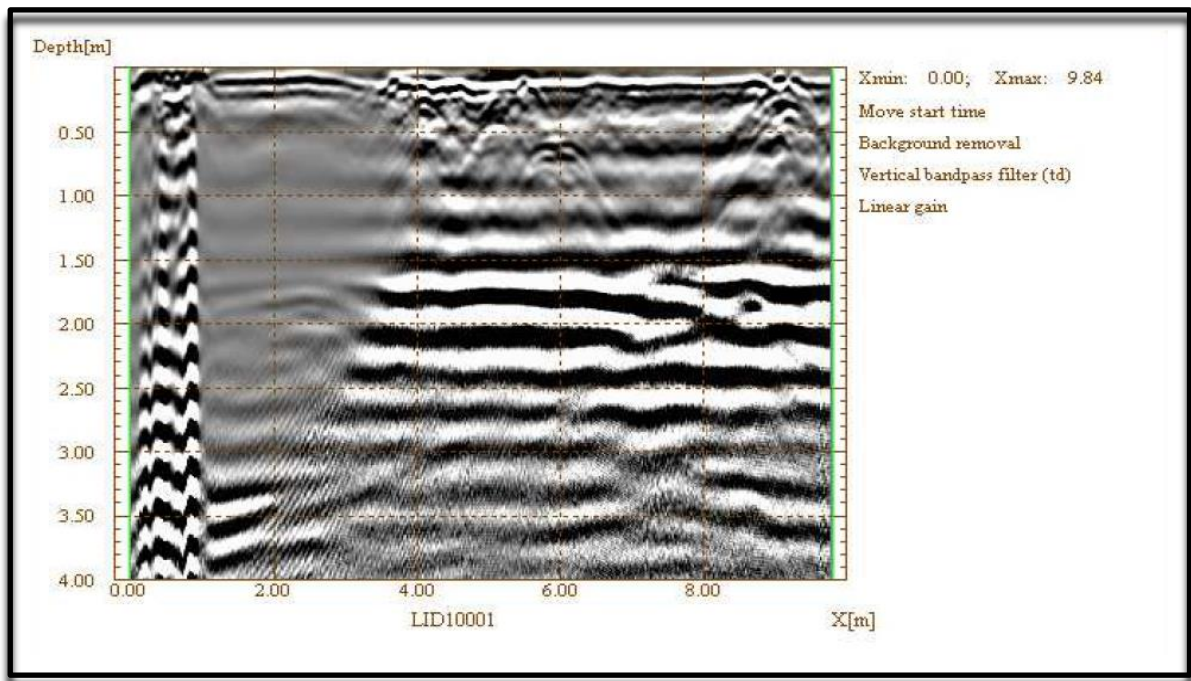


Figura 29. Radargrama procesado con GRESWIN2.

4.2. MÉTODOS GEOLÓGICOS.

Se hizo la recolección de muestras en el frente de obra de Bello Campo, a las cuales se le realizaron a los siguientes ensayos de laboratorio:

4.2.1 Granulométricos

Se utilizó un tambor vibratorio con el juego de tamices (figura 30), ordenados según el tamaño de la abertura de forma decreciente: C, A, 5, 7, 10, 14, 18, 25, 35, 45, 60, 80, 120, 170, 230, bandeja. Además se utilizaron otros implementos como: brocha para limpiar los tamices, bandeja para el pesado de los sedimentos y 36 bolsas para guardar los sedimentos de cada matiz y muestra. Se seleccionaron las muestras y se dejaron secando aproximadamente un mes, luego se pesaron las muestras y se procedió al tamizado. Se tamizaron las muestras durante 8 min haciendo pasar la muestra por todos los tamices, una vez hecho esto, se procedió a pesar los sedimentos retenidos en cada tamiz, con esa información se llenó la tabla

con los datos granulométricos (figura 31). Con estos datos se elaboraron las curvas de frecuencias, curvas acumulativas e histogramas y por último se realizaron los cálculos por métodos visuales y análisis de parámetros estadísticos para cada muestra.

- **Métodos visuales:**
 - Tabla de tamaños de granos.
 - Histogramas de frecuencias con su respectiva moda y modalidad.
 - Curva de frecuencia para establecer asimetría y angulosidad.
 - Curva acumulativa o curva de frecuencia acumulativa, para determinar el escogimiento y los percentiles.

- **Métodos estadísticos granulométricos.**
 - Mediana (ecuación 1).
 - Coeficiente de escogimiento (ecuación 2).
 - Coeficiente de asimetría (ecuación 3).
 - Coeficiente de angulosidad (ecuación 4).
 - Peso corregido (ecuación 5).



Figura 30. Tambor vibratorio de laboratorio de sedimentología de la EGMG de la UCV, Caracas, Venezuela.

TIPO DE SEDIMENTO: _____
 LOCALIDAD: _____
 P_{TI}: _____

TAMIZ	ABERTURA Φ	P _{RET}	P _{CORR}	% P _{CORR}	% P _{ACUM}	INTERVALO DE CLASES	% P _{CORR} (Clase)
C	-3.0						
A	-2.5						
5	-2.0						
7	-1.5						
10	-1.0						
14	-1/2						
18	0						
25	1/2						
35	1.0						
45	1.5						
60	2.0						
80	2.5						
120	3.0						
170	3.5						
230	4.0						
BANDEJA	4.5						
P _{TF}							

Figura 31. Modelo de tabla de datos granulométricos. Modificado de (Navarro, 1999).

4.2.2. Descripción de muestra de mano.

Se realizó una descripción breve de los minerales componentes que en escala mesoscópica con lupa de 10X (figura 32) se pueden distinguir. En este caso se le hizo el análisis de unos cantos rodados de la muestra “M2” para determinar la fuente del mismo. También se utilizó el ácido clorhídrico para comprobar la presencia de cualquier material carbónico además de la prueba de dureza y raya.



Figura 32. Lupa de 10X. Modificado (Geequipos, s.f.)

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y ANÁLISIS

La campaña de adquisición fue dividida en tres sectores con diferentes intereses enmarcados dentro de los objetivos de estudio de esta investigación. Dividido por método (geológico y geofísico), la campaña se realizó en el siguiente orden cronológico:

5.1 ADQUISICIÓN 1

Bello Campo. Caracterización de tubería matriz de agua.

Esta adquisición fue realizada por los operadores de FUNVISIS en colaboración con el personal que opera en las labores de excavación de las obras del Metro de Caracas. En esta zona el objetivo era ubicar una tubería matriz de 72” que suministra agua a un importante número de ciudadanos del valle capitalino. Se lograron adquirir siete perfiles en total pero ninguno de ellos mostro resultados precisos de la ubicación de la tubería, debido a la alta interferencia presente en la zona a causa de tuberías más someras destinadas al tendido eléctrico y telefónico de la localidad (figura 34). La figura 33 muestra el croquis donde se levantaron los perfiles y se identifica el frente de obra de Bello Campo.



Figura 33. Croquis I del tendido realizado en la adyacencia del frente de obra Bello Campo;
"Tomado y editado de Google Map"

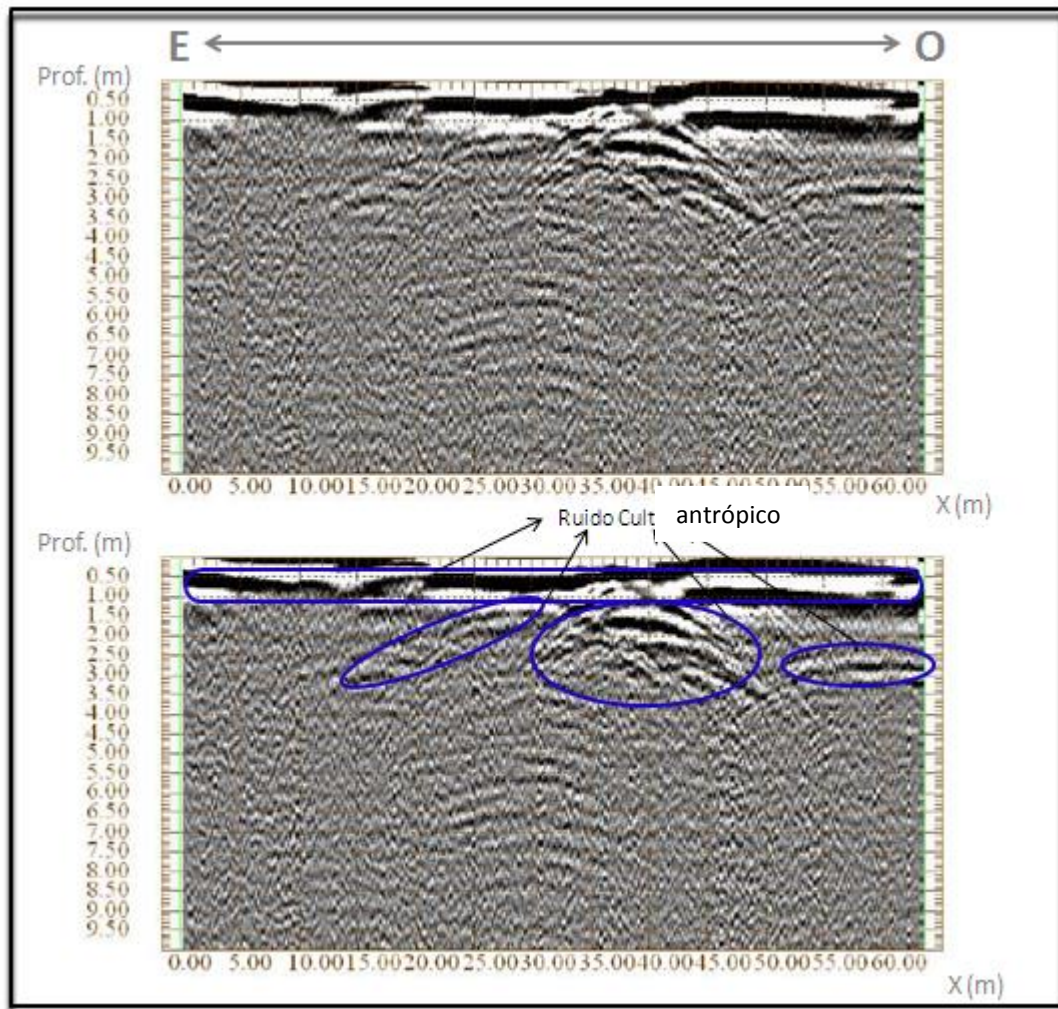


Figura 34. Radargrama obtenido para perfil 5E, con antena de 40 MHz

Esta adquisición se pudo complementar con la recolección de varias muestras extraídas del frente de obra mencionado para correlacionarlas con los estudios de suelos precedentes *in situ* (figura 35)

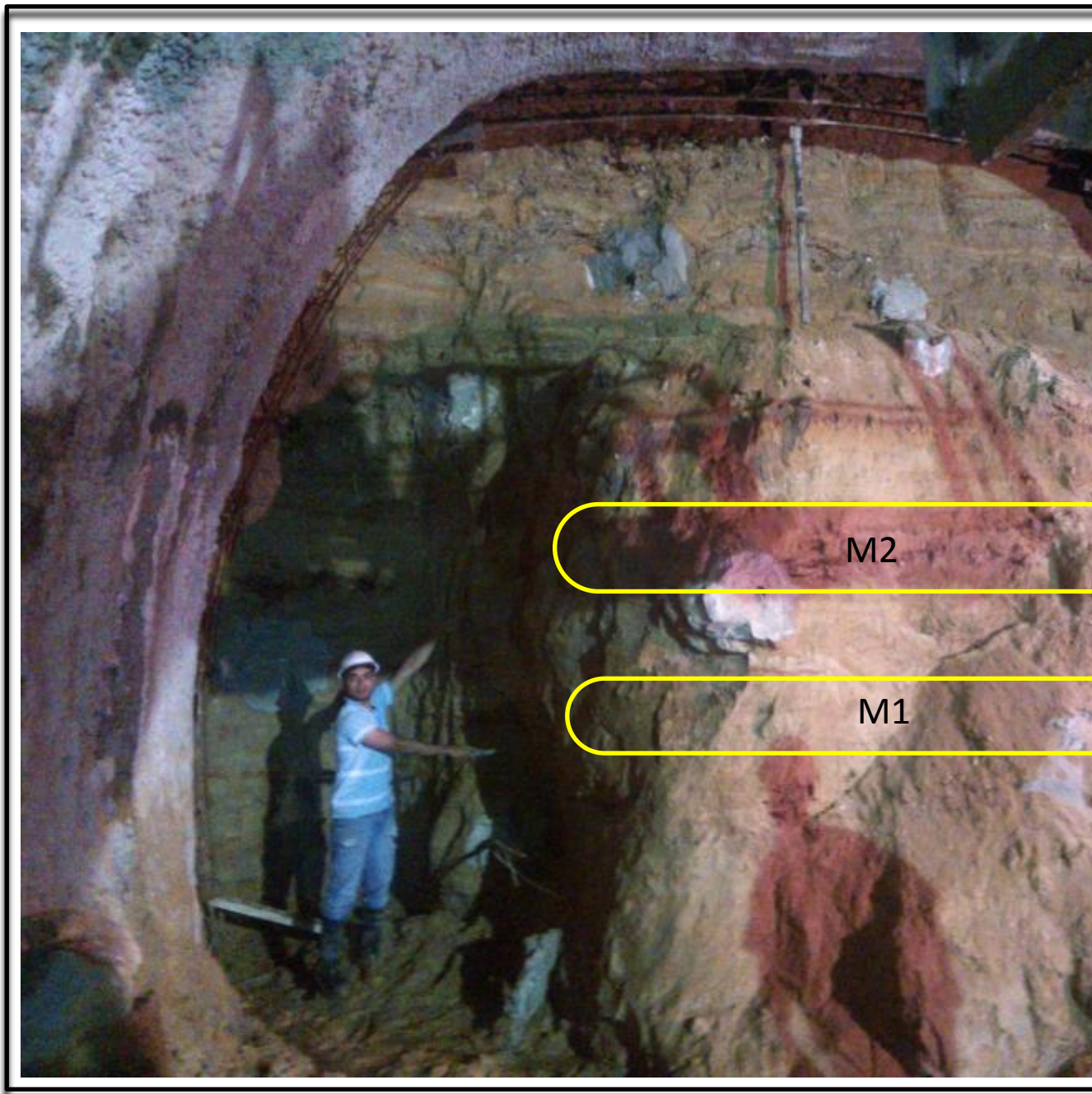


Figura 35. Frente de excavación Bello Campo, M1 y M2 corresponde a las muestras extraídas del frente.

Los datos granulométricos mostraron los resultados que se presentan en la tabla 5:

Tabla 5. Resultados granulométricos "M1".

Datos granulométricos **M 1**
TIPO DE SEDIMENTO: Aluvionales
Localidad: Frete de obra Bello Campo
Pti: 2180 gr

TAMIZ	ABERTURA Φ	P RET	P Corr	P Acum	% P CORR	% P ACUM	INTERVALO DE CLASES	% P CORR (CLASE)
C	-3.0	50,0	51,1	51,1	2,3 %	2,3 %	Peñones - guijarros	3,3 %
A	-2.5	20,2	20,6	71,7	0,9 %	3,3 %		
5	-2.0	46,4	47,4	119,1	2,2 %	5,5 %	Gránulos	4,2 %
7	-1.5	44	44,9	164,1	2,1 %	7,5 %		
10	-1.0	65	66,4	230,5	3,0 %	10,6 %	Arenas muy gruesas	6,5 %
14	-0.5	73	74,6	305,0	3,4 %	14,0 %		
18	0.0	91,3	93,3	398,3	4,3 %	18,3 %	Arenas gruesas	7,8 %
25	0.5	74,8	76,4	474,7	3,5 %	21,8 %		
35	1.0	178	181,8	656,6	8,3 %	30,1 %	Arenas medias	18,2 %
45	1.5	210,4	214,9	871,5	9,9 %	40,0 %		
60	2.0	350	357,5	1229,0	16,4 %	56,4 %	Arenas finas	27,8 %
80	2.5	242,3	247,5	1476,6	11,4 %	67,7 %		
120	3.0	426,3	435,5	1912,0	20,0 %	87,7 %	Arenas muy finas	22,9 %
170	3.5	62,2	63,5	1975,6	2,9 %	90,6 %		
230	4.0	69,9	71,4	2047,0	3,3 %	93,9 %	Limos - arcillas	9,4 %
BANDEJA	4.5	130,2	133,0	2180,0	6,1 %	100,0 %		
P Tt.		2134 gr	2180 gr		100 %			100 %

Luego de obtener los resultados antes expuestos se procedió a construir un histograma con su respectivo polígono de frecuencia (figura 36) y la curva acumulativa para esta muestra (figura 37).

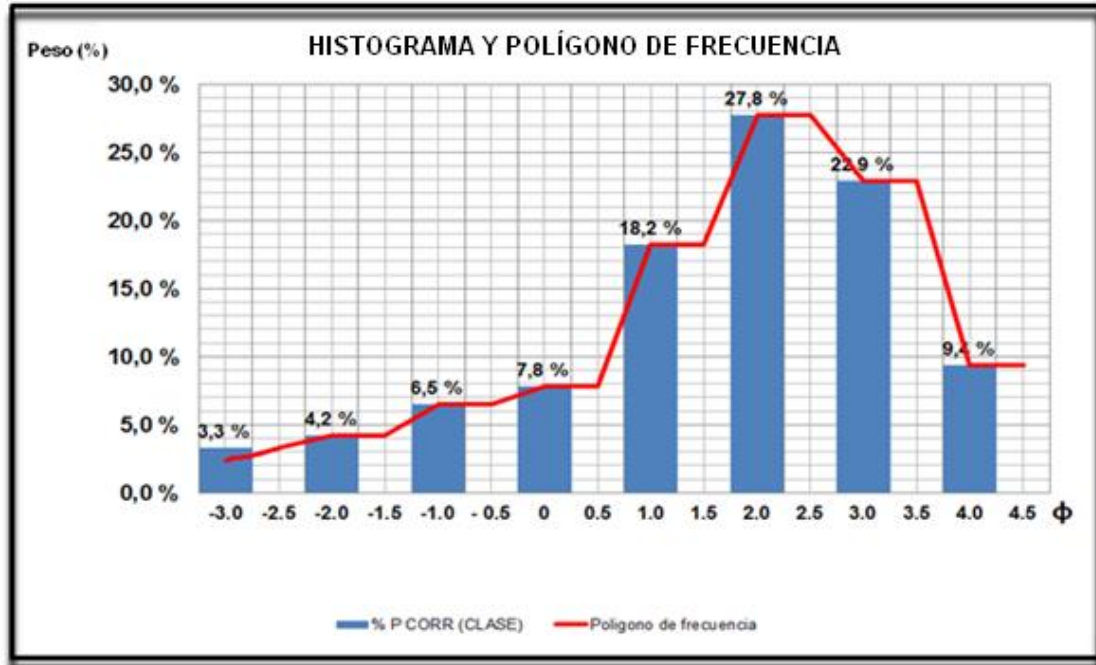


Figura 36. Histograma y polígono de frecuencia de "M1".

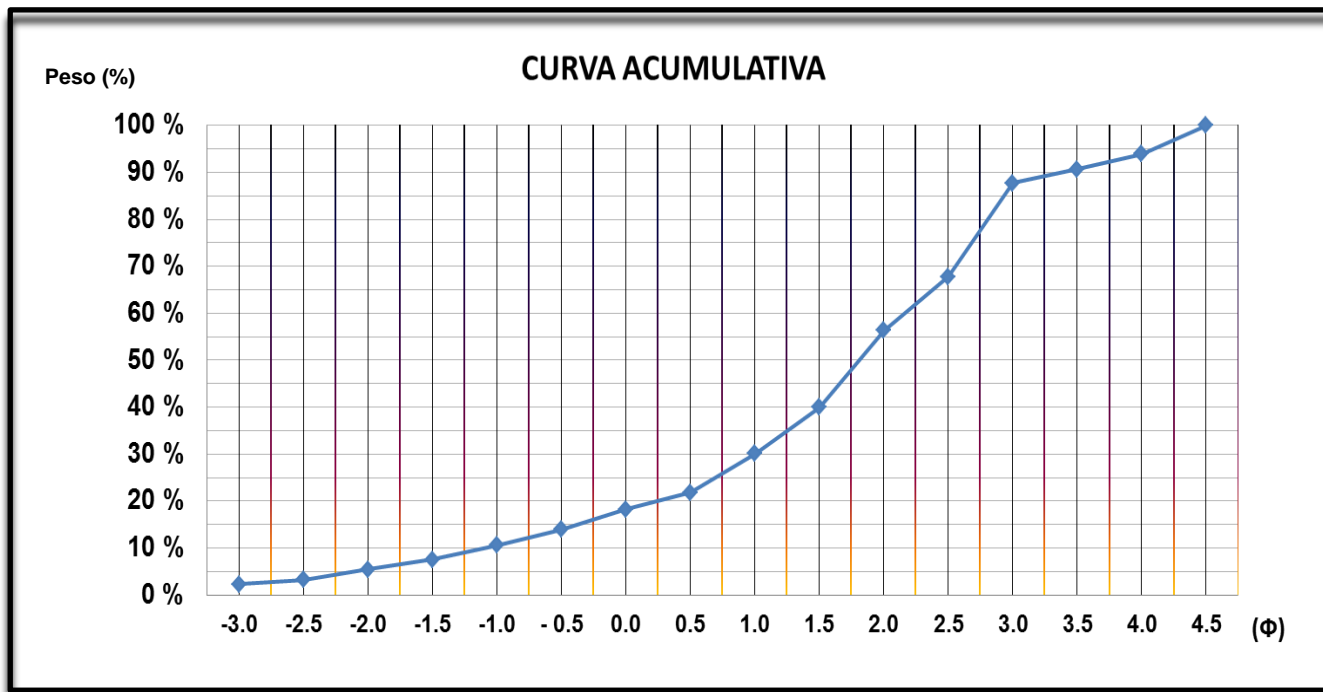


Figura 37. Gráfica de curva acumulativa para "M1".

Según métodos visuales hechos a la muestra "M1": el tamaño de grano predominante o *moda* corresponde a las arenas finas. La modalidad de la curva es unimodal, a pesar que las arenas muy finas y arenas medias también representan un porcentaje importante dentro de la muestra.

Mientras los análisis estadísticos arrojaron los siguientes resultados:

- Mediana

$$Md = 1.8 \Phi$$

El percentil 50 corresponde al intervalo de las arenas medias que se ajusta a niveles de depositación de entre baja y media energía.

- Coeficiente de escogimiento según Folk:

$$\sigma_I = \frac{(2,9 + 0,3)}{4} + \frac{(4,1 - 2)}{6,6}$$

$$\sigma_I = 1,72$$

Según Folk el grado de escogimiento está definido como “mal escogido”.

- Coeficiente de asimetría

$$SK_I = \frac{2,9 - 0,3 - 2 * (-1,8)}{2(2,9 + 0,3)} + \frac{4,1 - 2 - 2 * (1,8)}{2(4,1 + 2)}$$

$$SK_I = -0,28$$

Según el coeficiente de asimetría gráfica incluyente la muestra tiende a ser asimétrica hacia los tamaños gruesos de grano. Es decir la tendencia de la energía promedio del agente de transporte es “asimétrica hacia tamaños gruesos”.

- Coeficiente de angulosidad

$$K_G = \frac{4,1 + 2}{2,44(2,7 - 0,7)}$$

$$K_G = 1,25 \text{ (leptocúrtica)}$$

Para la muestra M2, se hizo el análisis granulométrico y se muestran los resultados en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados granulométricos para la muestra "M2".

Datos granulométricos **M2**
 TIPO DE SEDIMENTO: Aluvionales
 Localidad: Frente de obra Bello Campo
 Pti: 2165 gr

T.AMLZ	ABERTURA Φ	P RET	P CORR	P Acum	% P CORR	% P ACUM	INTERVALO DE CLASES	% P CORR (CLASE)
C	-3.0	808,3	827,1	827,1	38,2 %	38,2 %		
A	-2.5	55	56,3	883,3	2,6 %	40,8 %	Peñones - guijarros	40,8 %
5	-2.0	95	97,2	980,5	4,5 %	45,3 %	Gránulos	7,9 %
7	-1.5	72,9	74,6	1055,1	3,4 %	48,7 %		
10	-1.0	40	40,9	1096,1	1,9 %	50,6 %	Arenas muy gruesas	6,5 %
14	-0.5	97,6	99,9	1195,9	4,6 %	55,2 %		
18	0.0	91,2	93,3	1289,2	4,3 %	59,5 %	Arenas gruesas	6,6 %
25	0.5	49,4	50,5	1339,8	2,3 %	61,9 %		
35	1.0	91,8	93,9	1433,7	4,3 %	66,2 %	Arenas medias	8,9 %
45	1.5	97,2	99,5	1533,2	4,6 %	70,8 %		
60	2.0	165,6	169,4	1702,6	7,8 %	78,6 %	Arenas finas	11,0 %
80	2.5	67	68,6	1771,2	3,2 %	81,8 %		
120	3.0	199,8	204,4	1975,6	9,4 %	91,3 %	Arenas muy finas	12,1 %
170	3.5	56,7	58,0	2033,6	2,7 %	93,9 %		
230	4.0	44,4	45,4	2079,1	2,1 %	96,0 %	Limos - arcillas	6,1 %
BANDEJA	4.5	84	85,9	2165,0	4,0 %	100,0 %		
P Tf.		2116 gr	2165 gr		100 %			100 %

Después de obtener los resultados antes expuestos se procedió a construir un histograma y polígono de frecuencia (figura 38) y la curva acumulativa para estos datos (figura 39)

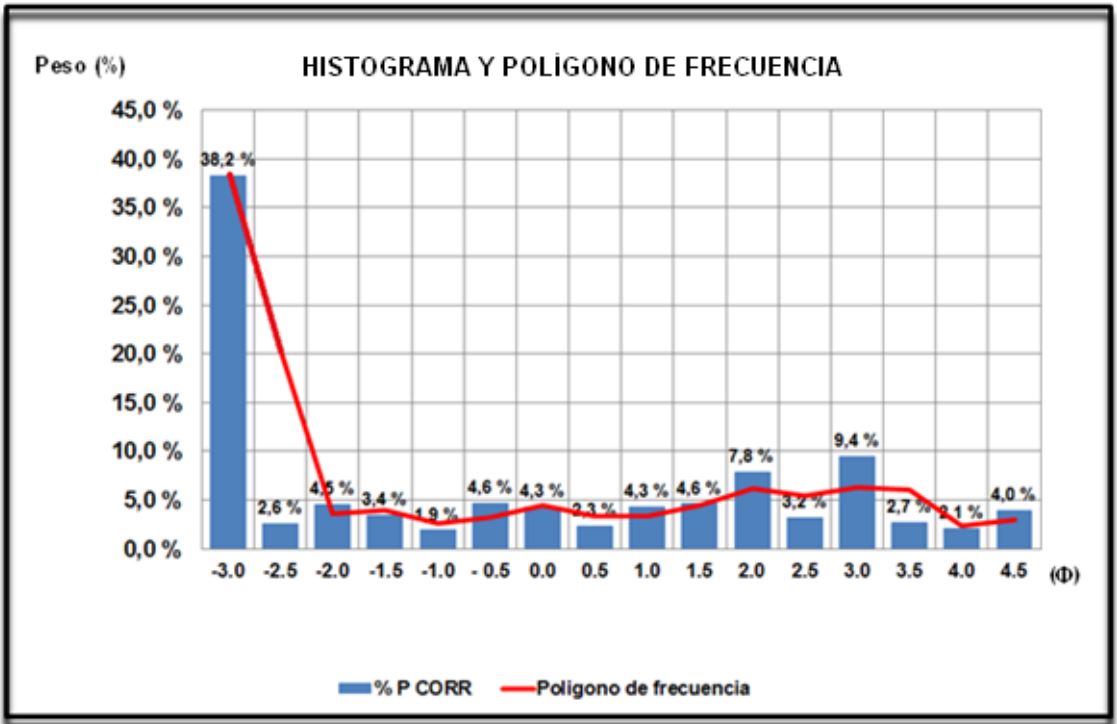


Figura 38. Histograma y polígono de frecuencia para la muestra "M2".

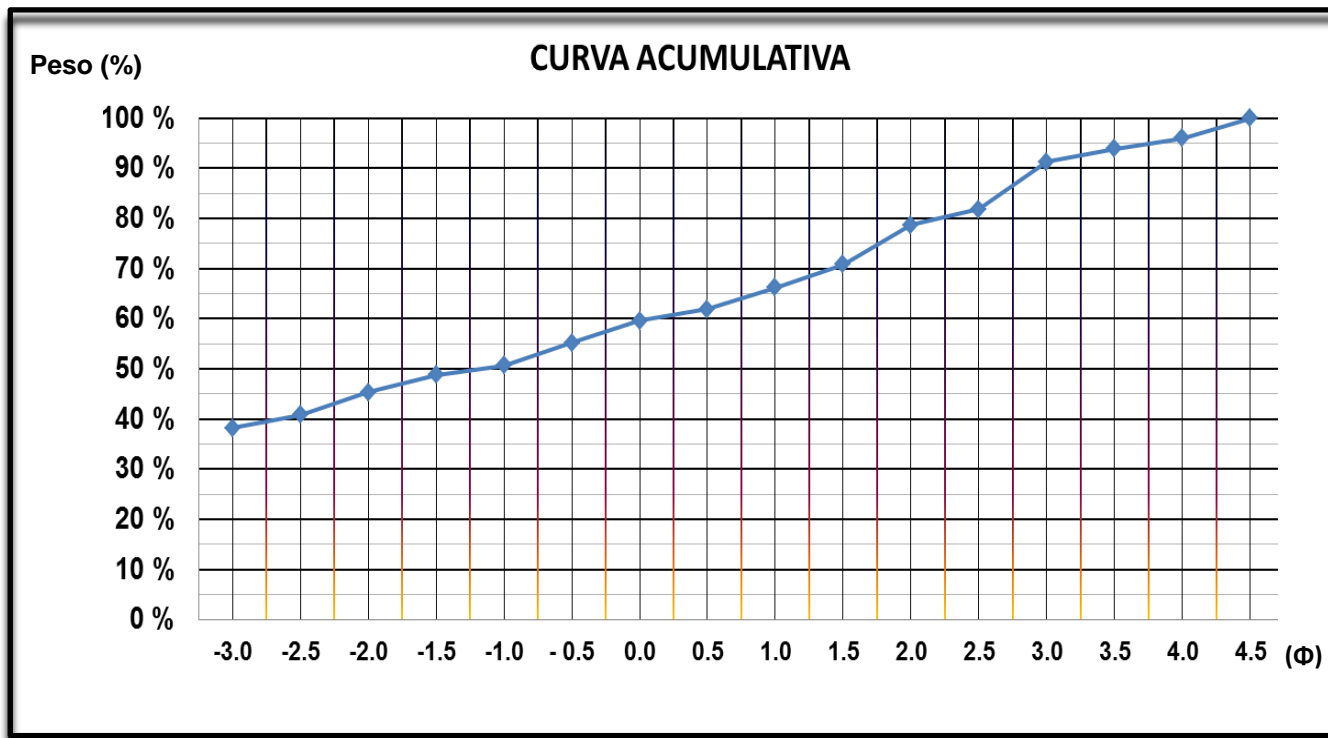


Figura 39. Gráfica de curva acumulativa para la muestra "M2".

Según métodos visuales hechos a la muestra "M2", el tamaño de grano predominante o *moda* corresponde a las gravas "peñones". La modalidad de la curva es unimodal.

Mientras que los análisis estadísticos mostraron los siguientes resultados:

- Mediana

$$Md = -1.1 \Phi$$

Según el resultado obtenido, el percentil 50 corresponde al intervalo de los gránulos que se ajusta a niveles de depositación de alta energía.

- Coeficiente de escogimiento según:

$$\sigma_I = \frac{(2,7 + 3)}{4} + \frac{(3,8 + 3)}{6,6}$$

$$\sigma_I = 2,46$$

El grado de escogimiento está definido como “muy mal escogido”.

- Coeficiente de asimetría

$$SK_I = \frac{2,7 - 3 + 2 * (1,2)}{2(2,7 + 3)} + \frac{3,75 - 3 + 2 * (1,2)}{2(3,75 + 3)}$$

$$SK_I = -0,41$$

Según el coeficiente de asimetría gráfica incluyente obtenido, la muestra tiende a ser muy asimétrica hacia los tamaños finos de grano. Es decir la tendencia de la energía promedio del agente de transporte es “asimétrica hacia tamaños finos”.

- Coeficiente de angulosidad

$$K_G = \frac{3,75 + 3}{2,44(1,75 + 3)}$$

$$K_G = 0,58 \text{ (muy platicúrtica)}$$

Adicionalmente a la muestra “M2” se le hicieron análisis de “muestra de mano” solamente a las partículas retenidas en el tamiz C correspondiente a peñones y guijarros (figura 40) los cuales mostraron resultados representados en la tabla 7.



Figura 40. Muestras de mano de peñones y guijarros tomados del frente de obra Bello Campo.

Tabla 7. Resultados de análisis a muestra de mano de "M2"

Minerales	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Cuarzo	40%	44%	45%	42%
Plagioclasas	38%	34%	35%	36%
Micas	22%	22%	20%	22%

Descripción: Cantos bandeados muy angulosos de color blanquecino muy meteorizado, sub-angular y de esfericidad baja.

Según la clasificación de rocas metamórficas basada en la composición porcentual de los minerales estas muestras se pueden clasificar como un gneis cuarzo plagioclásico micáceo o metagranodiorita.

Protolito: roca ígnea de origen plutónico. Por la mineralogía descrita y según su composición porcentual el protolito de estas muestras corresponde a una granodiorita.

Fuente: la procedencia de estos cantos es de una fuente cercana, muy probablemente del Ávila específicamente de la Formación SAN JULIAN en un rango de 5-15 km de recorrido.

El mapa de cuaternario del Valle de Caracas propuesto por (Oropeza & Zambrano, 2007), establece esta zona como una “facie distal con canales” de edad Pleistoceno superior-Holoceno, tomando como referencia la proximidad al macizo rocoso del Ávila, que en este caso sería la fuente de los sedimento analizados en esta zona.

5.2 ADQUISICIÓN 2

Supermercado Cada Las Mercedes. Caracterización de la arquitectura del subsuelo

La zona en estudio se encuentra en la urbanización Las Mercedes, más específicamente en el estacionamiento del supermercado CADA, en la intersección entre la av. Principal de Las Mercedes y la av. Jalisco, y en ambas avenidas inclusive.

A continuación, en la figura 41 se aprecia un croquis que representa la zona en estudios, y las perforaciones precedentes del sitio.

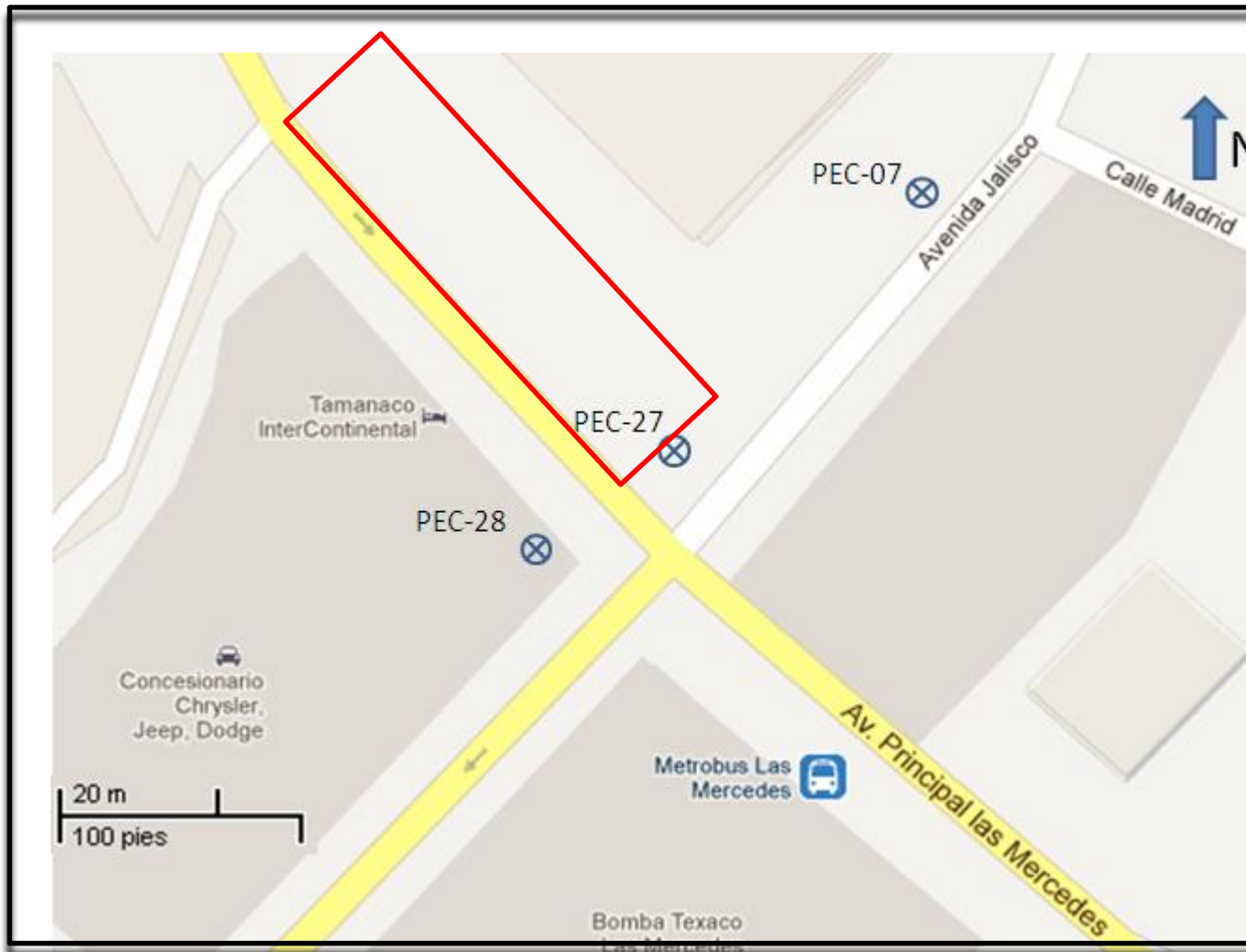


Figura 41. Segunda etapa de adquisición con perforaciones (PEC) en las adyacencias del Supermercado CADA de las Mercedes, Municipio Baruta, Edo Miranda. Tomado y modificado de Google Map.

La figura 42 muestra la disposición de los radargramas obtenidos en la zona estudiada así como una fotografía tomada mientras se adquiría el perfil T4 con la antena de 40 MHz

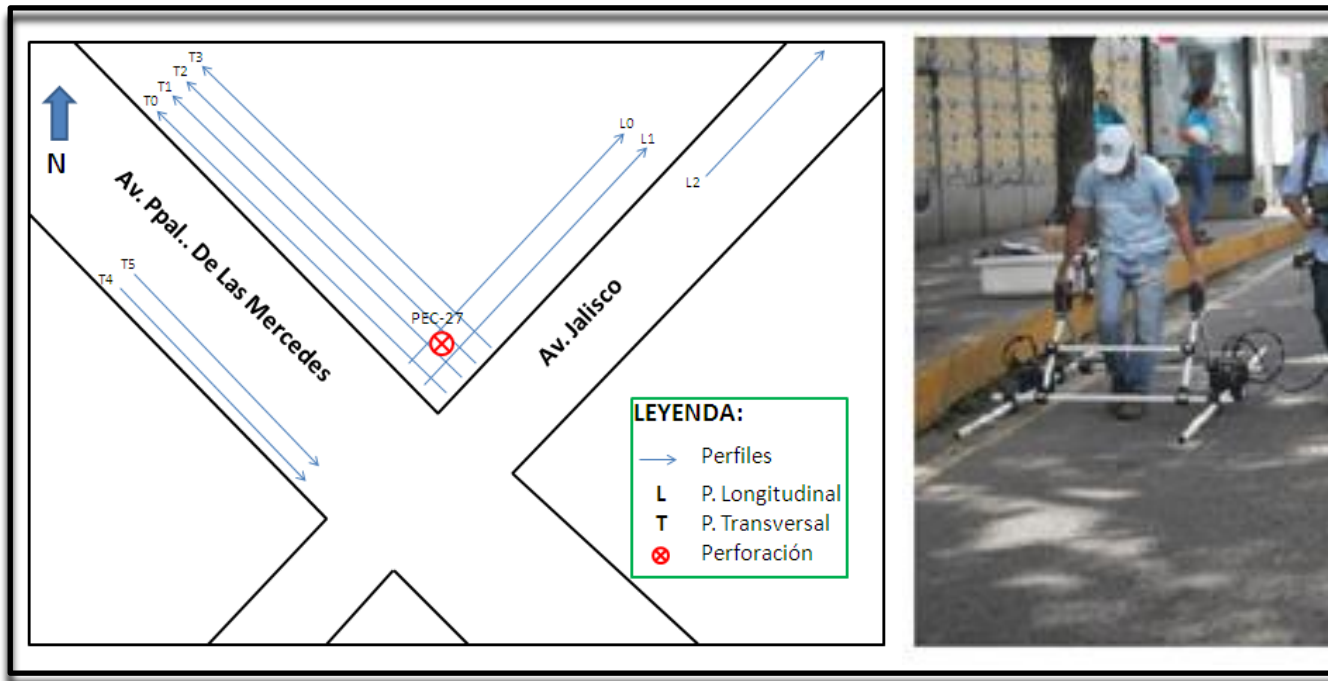


Figura 42. Izquierda, disposición de perfiles (segunda etapa de adquisición). Derecha, adquisición de radargrama para perfil T4, con antena de 40 MHz

La tabla 8 muestra los rumbos de cada uno de los perfiles, tanto geológicos, como de GPR.

Tabla 8. Rumbos de perfiles de GPR y geológicos en Adquisición #2 “Las Mercedes”.

Perfil	Rumbo
T0, T1, T2 y T3	N43°W
T4 y T5	N45°W
L0 y L1	N40°E
L2	N18°E
PEC 07 – PEC 27	N471E
PEC 27 – PEC 28	N52°E

Los resultados más relevantes durante esta adquisición son los correspondientes a los perfiles T0, T1, T2 y T3. Estos, muestran un reflector, que al integrar dicho resultado con el de los estudios precedentes se observa una marcada coincidencia en profundidad con una de las trazas sedimentarias presentes en el perfil geológico PEC27- PEC28. Los demás perfiles se utilizaron para complementar el modelo 3D correspondiente a esta adquisición.

A continuación, las figuras 43, 45, 46 y 47 muestran los radargramas antes citados, una vez que fueron aplicados los parámetros correspondientes en la etapa de procesamiento.

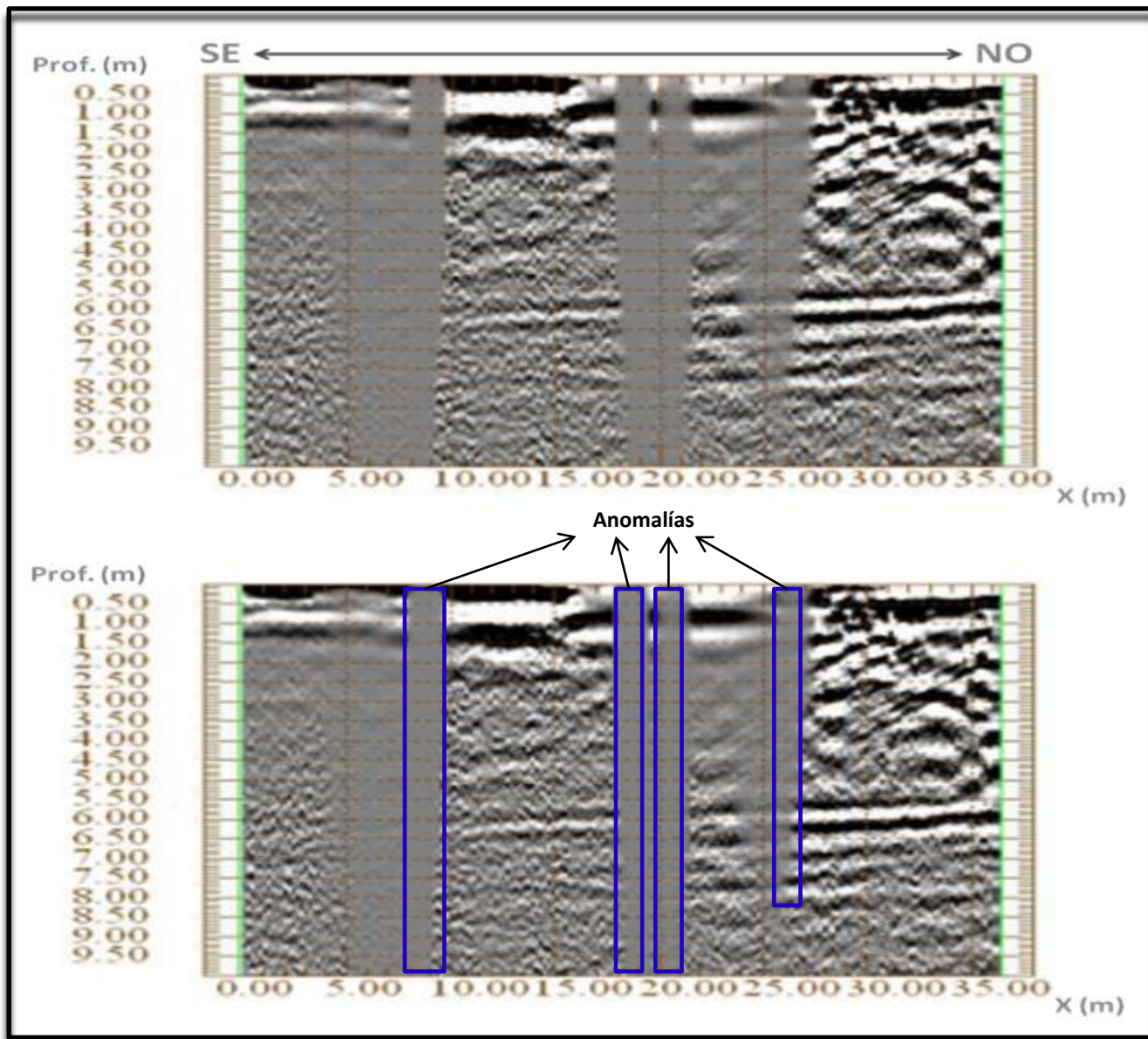


Figura 43. Radargrama obtenido para perfil T0, con antena de 40 MHz

La figura 43 muestra que en distancias en X de 8, 18, 20 y 26 m el equipo de GPR no registro nada, esto es debido a que en superficie se encontraban manchas de fluidos proveniente de los vehículos que diariamente hacen uso del estacionamiento. Estos fluidos, al ser altamente conductivos “anulan” la

respuesta del equipo. La figura 44 muestra una imagen de una de esas manchas y del momento en que se levantó el perfil.



Figura 44. Derecha, Momento en que se obtuvo radargrama para perfil T1, con antena de 40 MHz Izquierda, ampliación de una de las manchas de fluido.

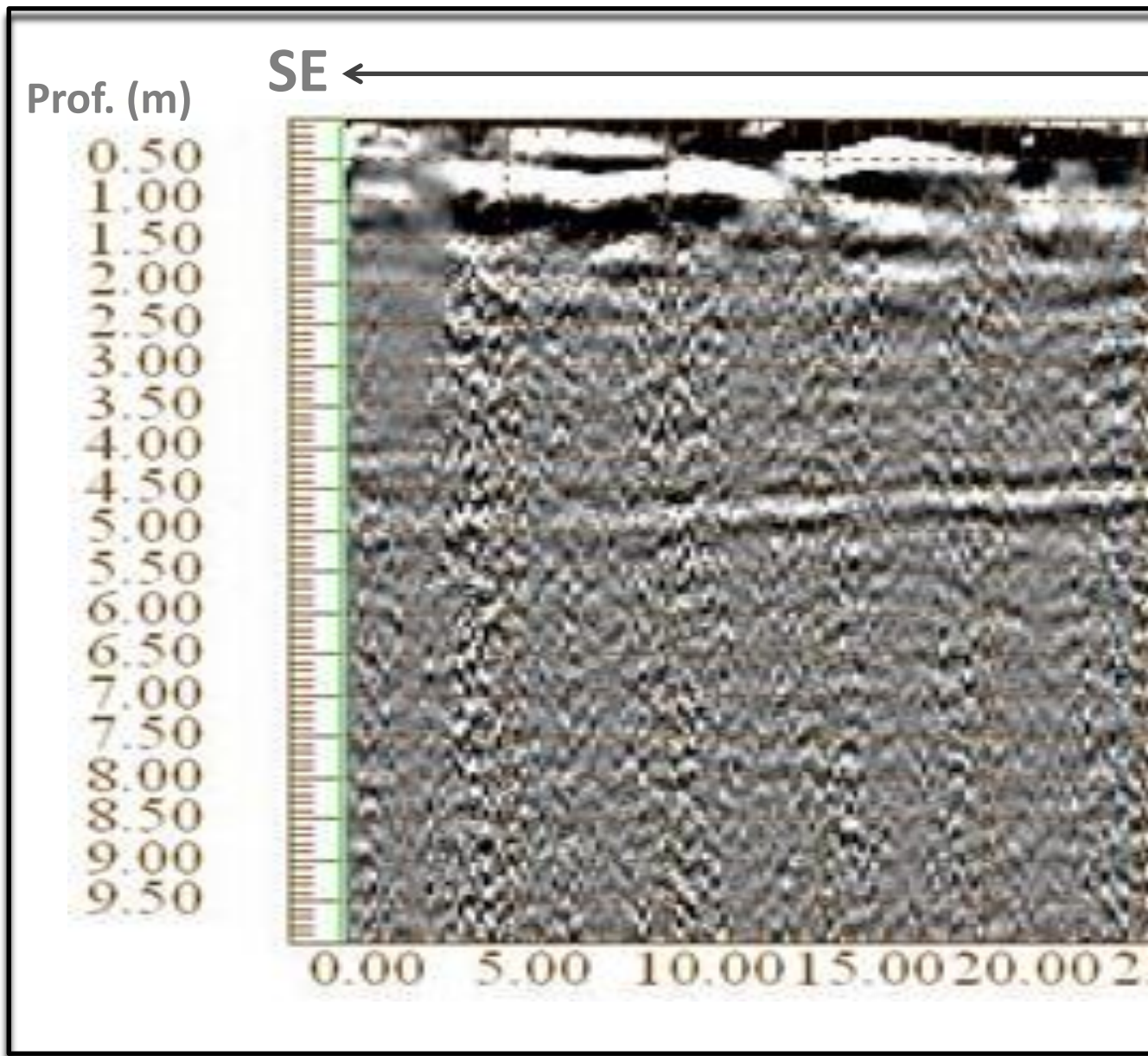


Figura 45. Radargrama obtenido para perfil T2, con la antena de 40 MHz

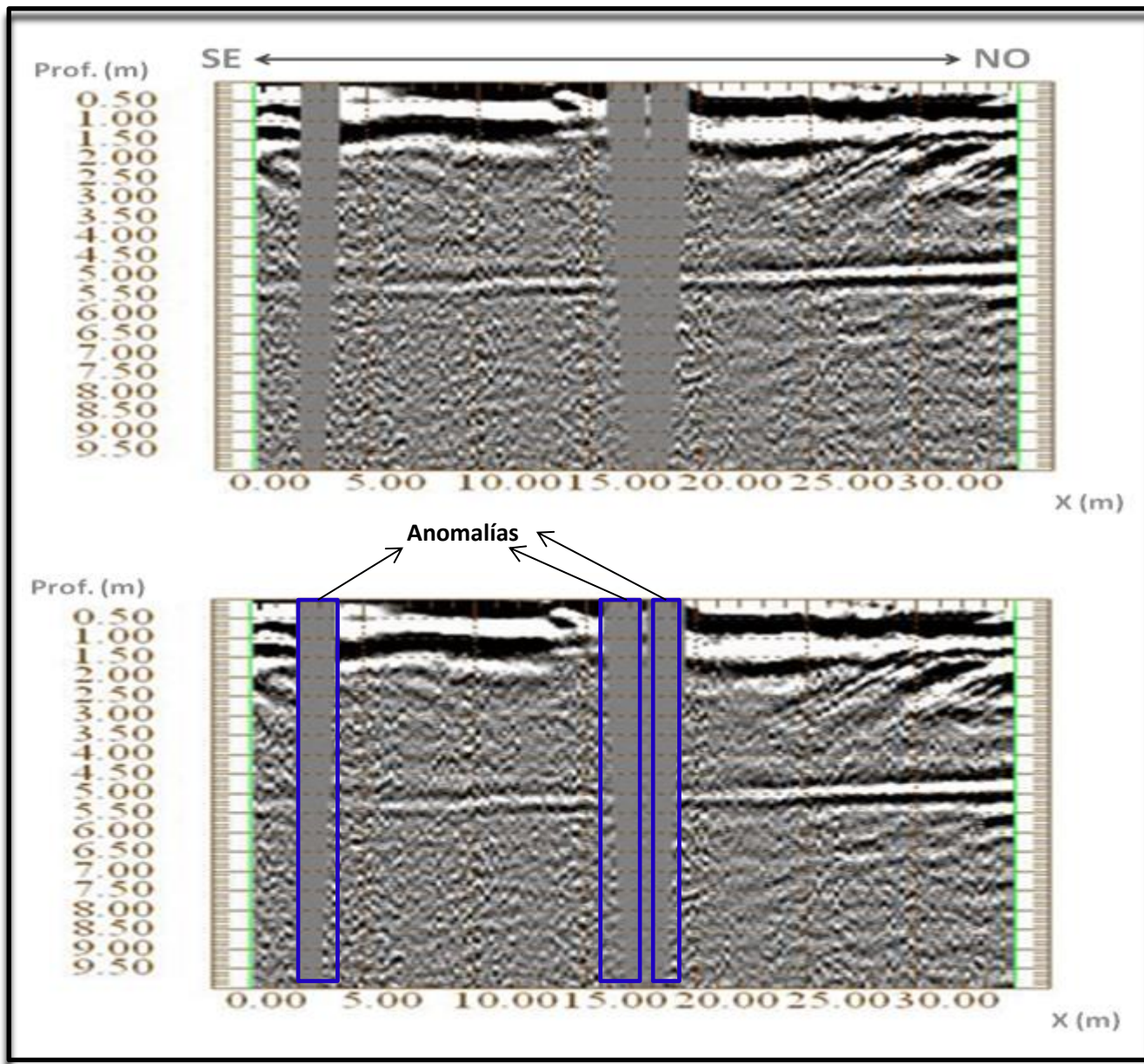


Figura 46. Radargrama obtenido para perfil T2, con la antena de 40 MHz

En el radargrama correspondiente al perfil T2 (figura 46), se obtuvieron resultados similares a los 2, 16 y 18 m en X, observando una anomalía en el registro producto de las manchas de fluidos en superficie.

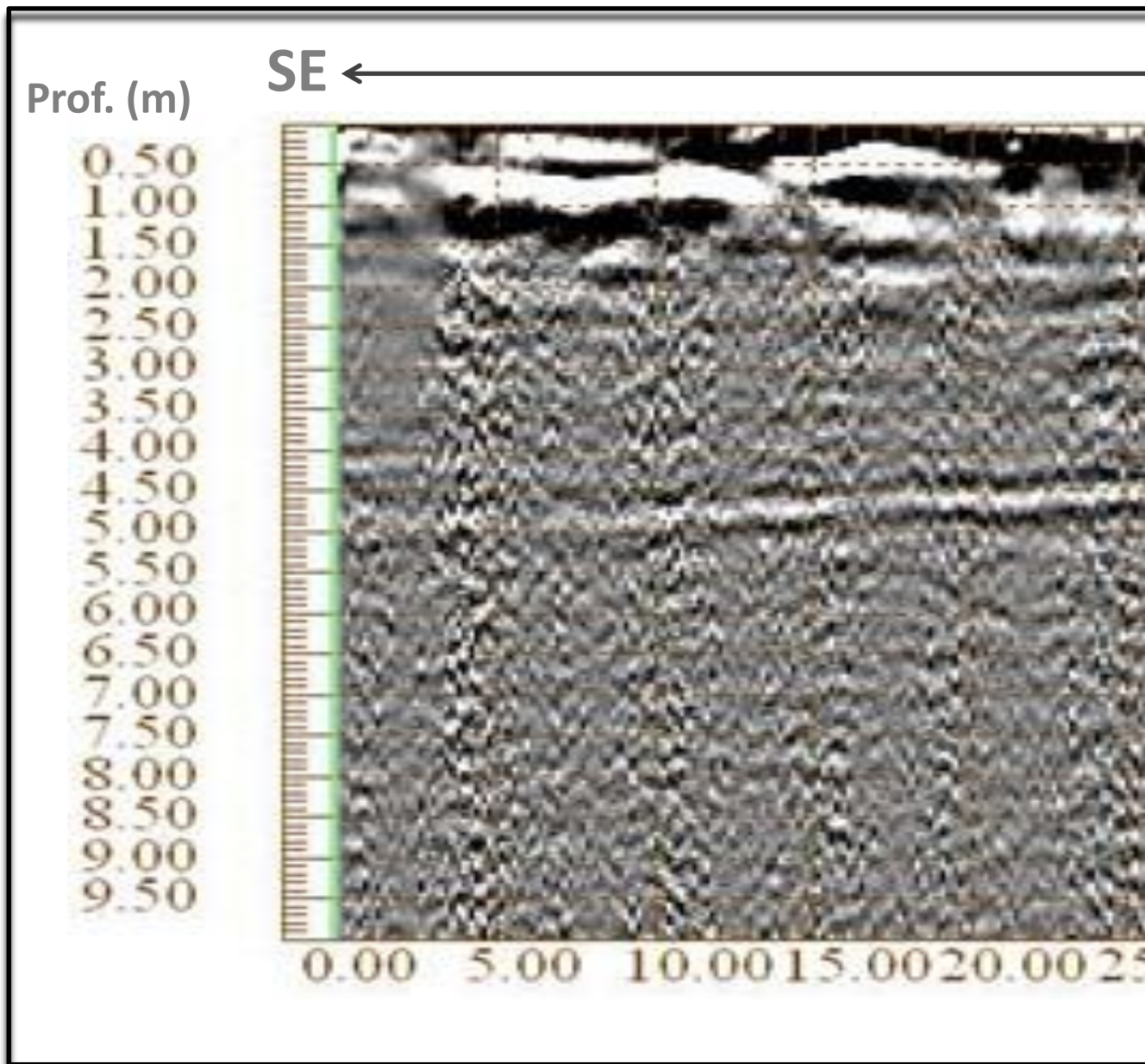


Figura 47. Radargrama obtenido para perfil T3, con antena de 40 MHz

Además de estos resultados, se cuenta con dos perfiles geológicos, uno es el PEC27 – PEC07 (figura 48) y el otro es PEC28 – PEC27 (figura 49)

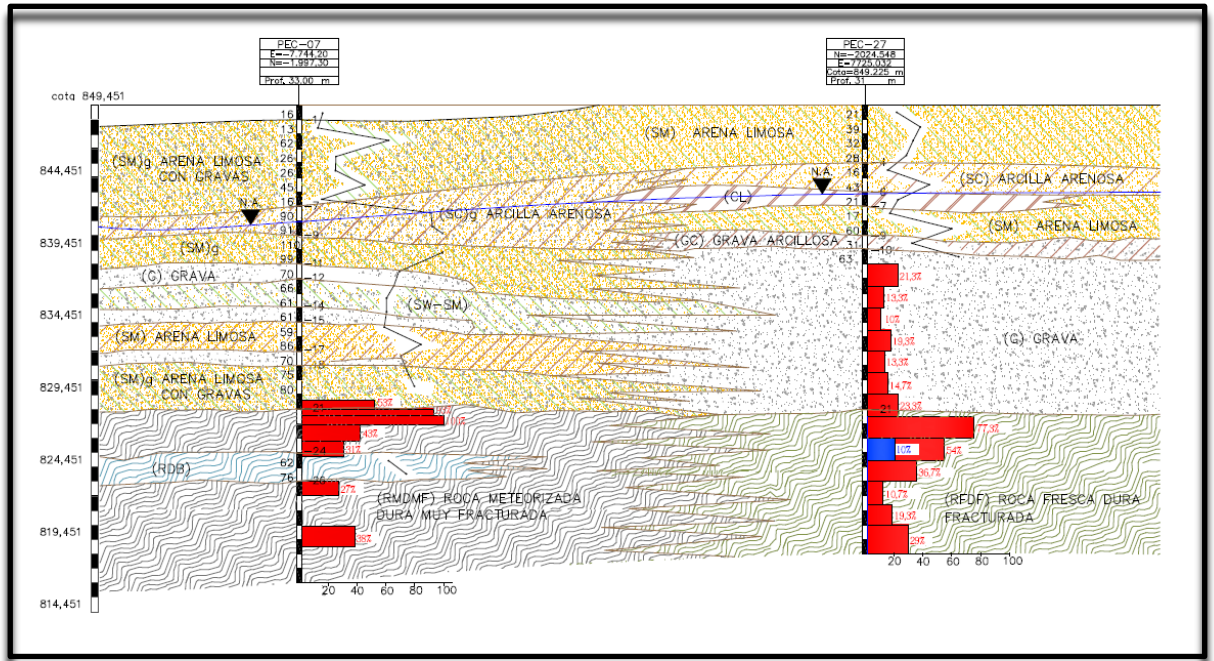


Figura 48. Perfil geológico PEC-07; PEC-27. Tomado y modificado de la Gerencia de Construcción del Metro de Caracas C.A. (Anexos).

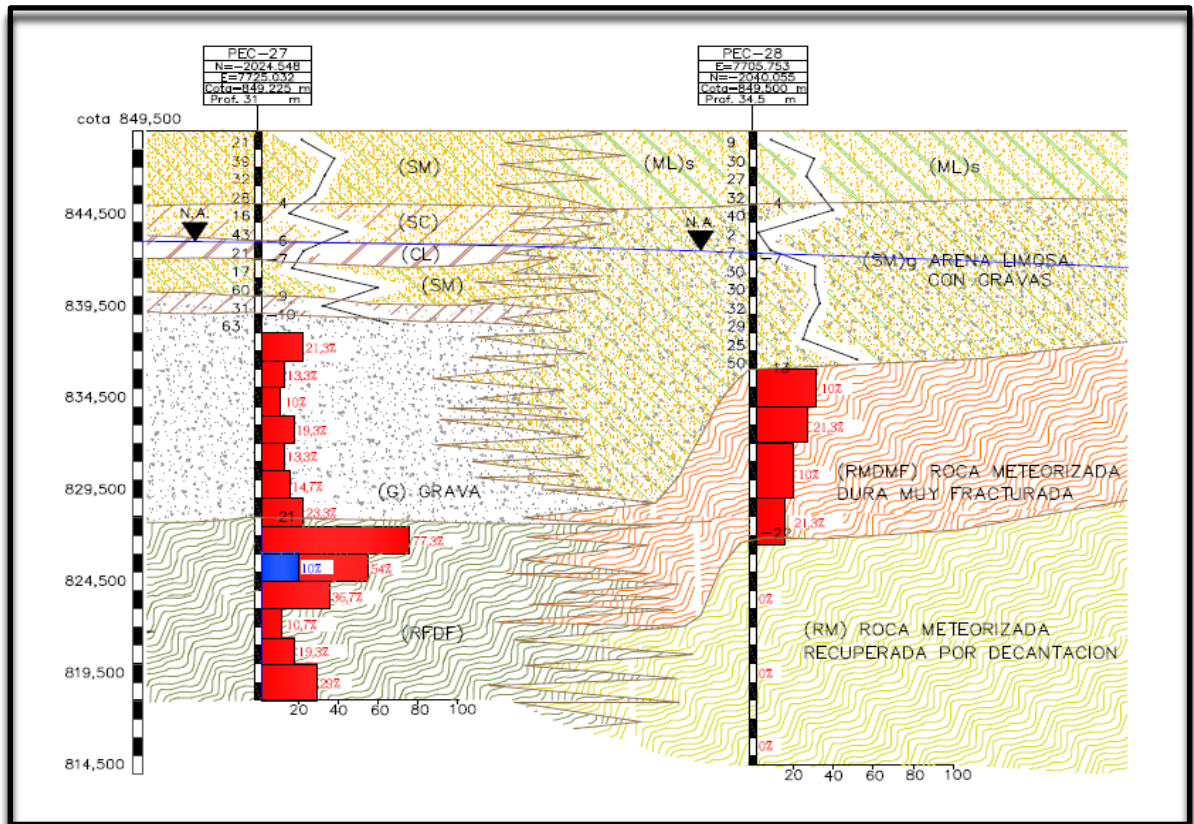


Figura 49. Perfil geológico PEC-27; PEC-28. Tomado y modificado de la Gerencia de Construcción del Metro de Caracas C.A. (Anexos).

Al integrar todos los datos antes presentados, se elaboró un modelo 3D que permite apreciar en conjunto los resultados obtenidos en esta fase (figuras 50 y 51).

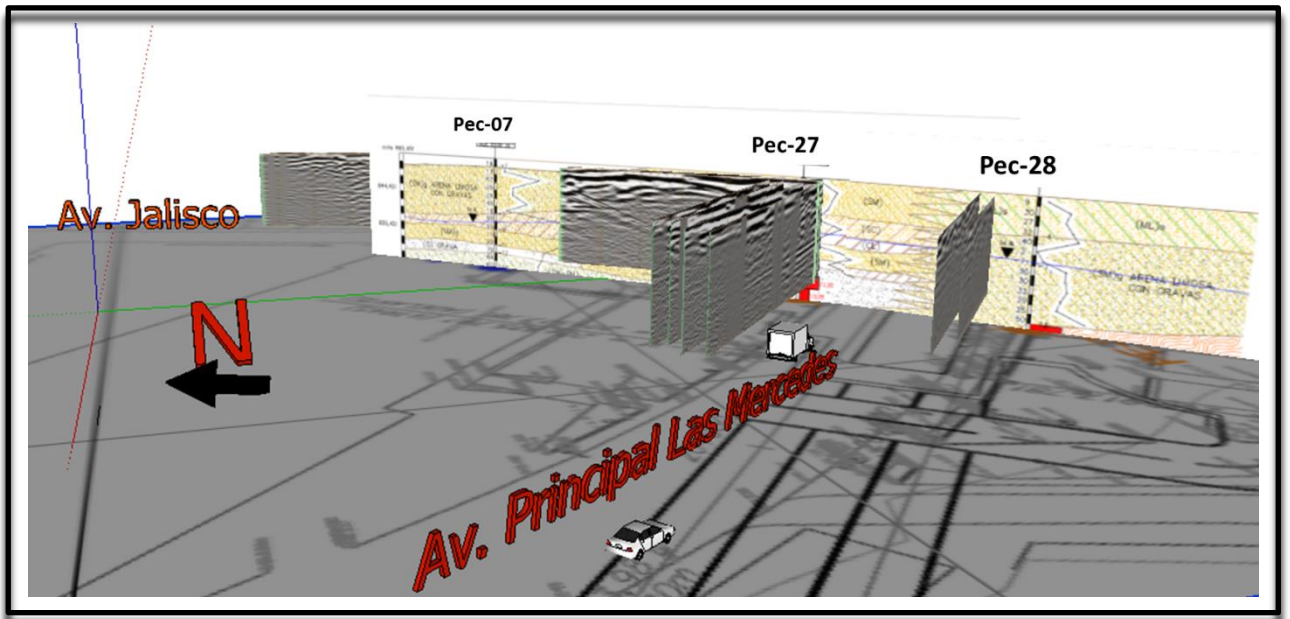


Figura 50. Modelo 3D “Las Mercedes” generado con radargramas de espectro de frecuencia de 40 MHz y perfiles de suelos para segunda adquisición. Vista de oeste a este

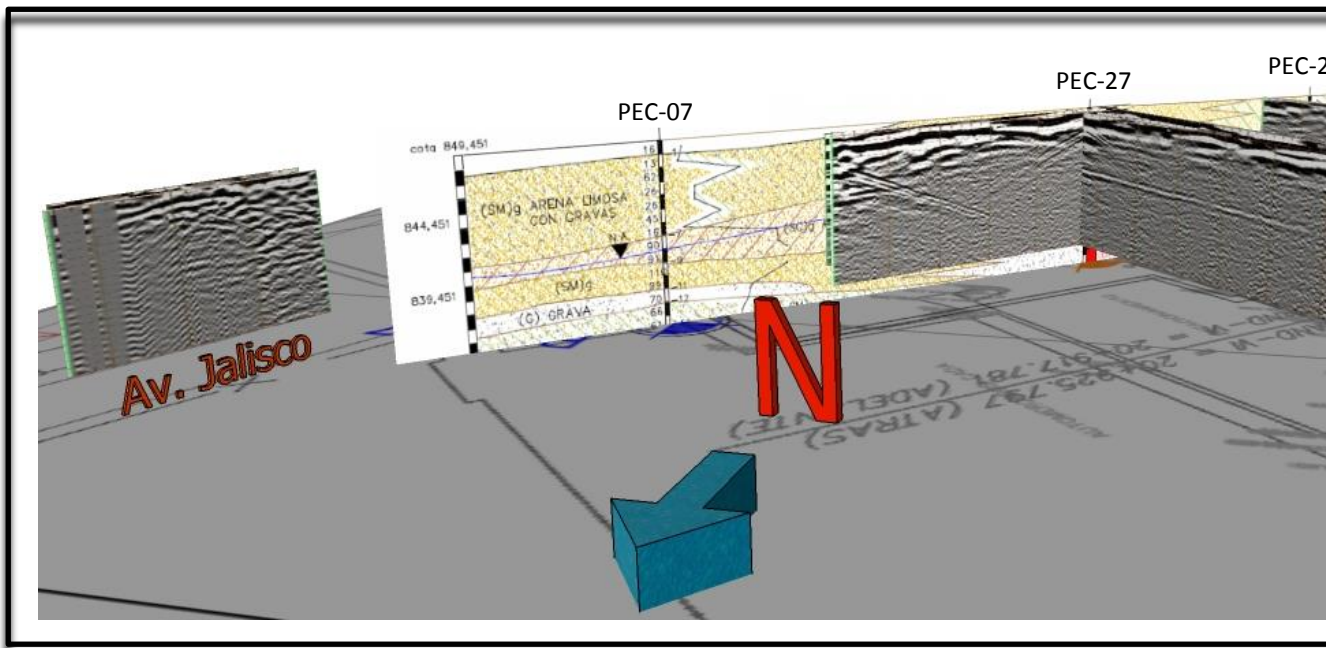


Figura 51. Modelo 3D “Las Mercedes” generado con radargramas de espectro de frecuencia de 40 MHz y perfiles de suelos para segunda adquisición. Vista de norte a sur.

Cuando se observa a detalle el Modelo 3D, se aprecia la coincidencia de un reflector bien marcado en el radargrama T0 a una profundidad de aproximadamente 6,5 m con una traza de roca sedimentaria ubicada a la misma profundidad en el perfil geológico (figura 52).

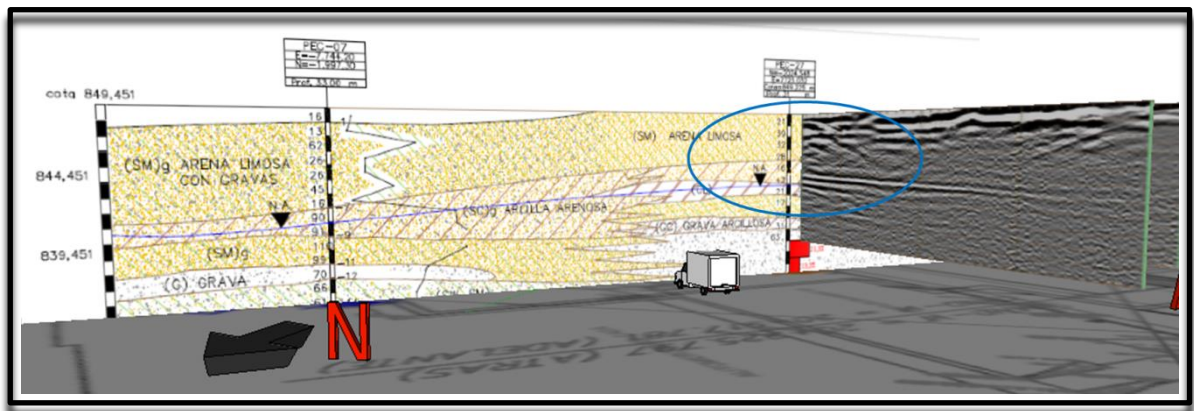


Figura 52. Modelo 3D de correlación de perfil de suelo PEC-07 – PEC-27 con radargrama obtenido para perfil T0, con la antena de 40 MHz

Según el mapa de unidades depositacionales cuaternarias del valle de Caracas (figura 5), la zona en estudio se encuentra sobre sedimentos holocenos que corresponden a los paleo-bancos aluviales del drenaje principal del valle de Caracas. Los espesores de sedimentos para esta zona son de aproximadamente 21 m. Por debajo de los 21 m se encuentra una roca fresca dura fracturada (RFDF) que mineralógicamente está compuesta por calcita, cuarzo, micas y grafito, con una textura bandeada. Según la descripción, esta litología se asocia a la formación LAS MERCEDES específicamente al esquistos cuarzo micáceo calcítico grafitoso. En el estudio de suelo propuesto para esta zona se observa que infrayacente al punto PEC-27, en sus primeros 10 metros de perforación, tenemos una facie sedimentaria de energía baja a media controlada esencialmente en su mayoría por granos de tamaño arena, con un alto porcentaje de granos finos

e incluso se describe un lente de arcilla intercalado entre las mismas arenas que pudiera clasificarse desde una perspectiva macro como una estructura *flasher* (arcillas intercaladas entre arenas) o como un paleo-canal de muy baja energía que marca las fluctuaciones de energía de esta zona.

Por debajo de los diez metros y fuera del alcance del GPR tenemos una acumulación de aproximadamente once metros de grava que pudiera asociarse a un paleo-canal tributario de energía alta que tuvo un gran significado en cuanto al aporte de sedimentos al río Guaire.

Como es de esperarse en esta zona los radargramas que interceptan a PEC-27 dentro del alcance del GPR se marcaron unos reflectores, aunque existe una discrepancia y desfase con el estudio de suelo. Hacia la parte superior del radargrama se caracterizó un “medio conductivo A” que se extiende desde los 0 hasta los 4 metros de profundidad. El segundo medio se caracterizó como un “medio permeable no conductivo” que envuelve a la tercera unidad caracterizada como un “medio conductivo B” (figura 53). La correspondencia de cada una de estas unidades con respecto a las litologías presentes en el área fue asociada de la siguiente manera:

- Medio conductivo (A): emulsión asfáltica, capa subrasante o base granular (estas capas no representan más de 300 cm de esta unidad, quizás menos). El resto de esta unidad corresponde a las arenas limosas finalizando aproximadamente en el cambio de facies areno limoso-arcilla arenosa.
- Medio permeable no conductivo: esta unidad está compuesta por las litologías de arcillas arenosas, arenas limosas, grava arcillosa y grava. Vale destacar que el conjunto de litologías anteriormente mencionada según sus propiedades físicas poseen cierto grado de porosidad y permeabilidad, que puedan estar condicionando la respuesta del equipo, de esta forma a excepción de las arcillas

arenosas por su alto contenido de granos fino, pero que fue incluido en esta unidad ya que la respuesta a la señal se aprecia similar a las demás, a pesar a la interferencia que genera el tapón en superficie de la perforación PEC-27.

- Medio conductivo (B): esta unidad posee el reflector mejor marcado en los perfiles adquiridos adyacentes a PEC-27. La señal en este medio se comporta muy bien, incluso pareciera que no hubiese mucha distorsión de la señal. Este reflector coincide aproximadamente entre los 6 y 7 metros de profundidad con una traza de arcilla descrita en los estudios de suelos suministrados por el Metro de que Caracas que a su vez también coincide con el nivel freático de esta zona, vale destacar que la fecha del estudio de suelo corresponde al mes de marzo de 2009, lo que implica un cambio en el nivel freático producto de las labores del Metro de Caracas C.A... Las arcillas poseen fluidos tanto a nivel molecular como en sus intersticio por tal razón tiende a ser un medio conductivo proporcional a la cantidad de agua acumuladas en la mismas, es por ello que resulta coherente que la señal se refleje de esta manera a estas profundidades al coincidir con el medio arcilloso.

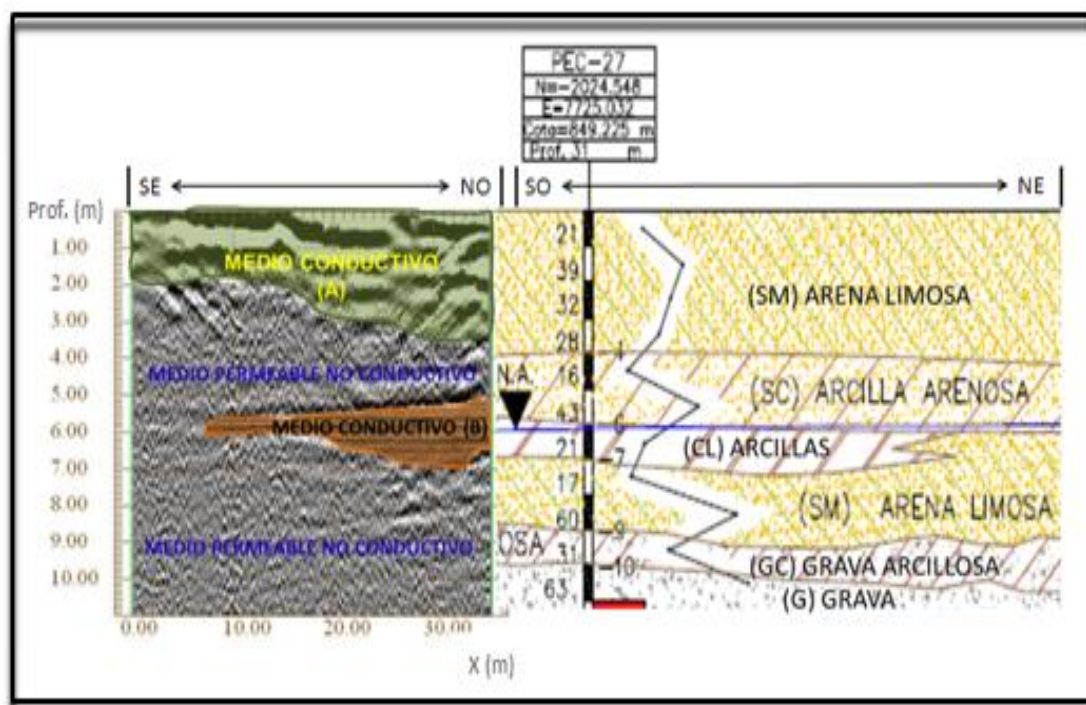


Figura 53. Modelo 3D de correlación de perfil de suelo PEC-07 – PEC-27 con radargrama obtenido para perfil T0, con la antena de 40 MHz

5.3 ADQUISICIÓN 3

Estación de servicio (E/S) Miguel Ángel. Delimitación de plumas de hidrocarburo.

La E/S Miguel Ángel es el tercer y último sector donde se desarrolló la campaña de adquisición, esta zona se encuentra ubicada en la urbanización Bello Monte, del municipio Baruta de la ciudad de Caracas, específicamente en la intersección de la av. Principal de Bello Monte con la calle Harward (figura 54).



Figura 54. Ubicación de E/S Miguel Ángel (E/S PDV) en la Urb. Bello Monte de Caracas.

Para este lugar se levantaron 25 perfiles con cada antena (40 MHz no blindada, 80 MHz blindada y 200 MHz blindada). Con la antena de 40 MHz (no blindada) no se obtuvieron buenos resultados que puede ser atribuido al tipo de área a estudiar donde la presencia de ruido o interferencia, se reflejó en la calidad de la imagen, resultando un radargrama poco coherente. Por el contrario con las antenas blindadas de 80 MHz y 200 MHz se obtuvieron resultados de gran utilidad. De los 50 perfiles restantes, se trabajó con 10 de ellos ya que estos fueron los que evidenciaron el objetivo esperado. La E/S fue dividida en dos bloques como se muestra en la figura 55.

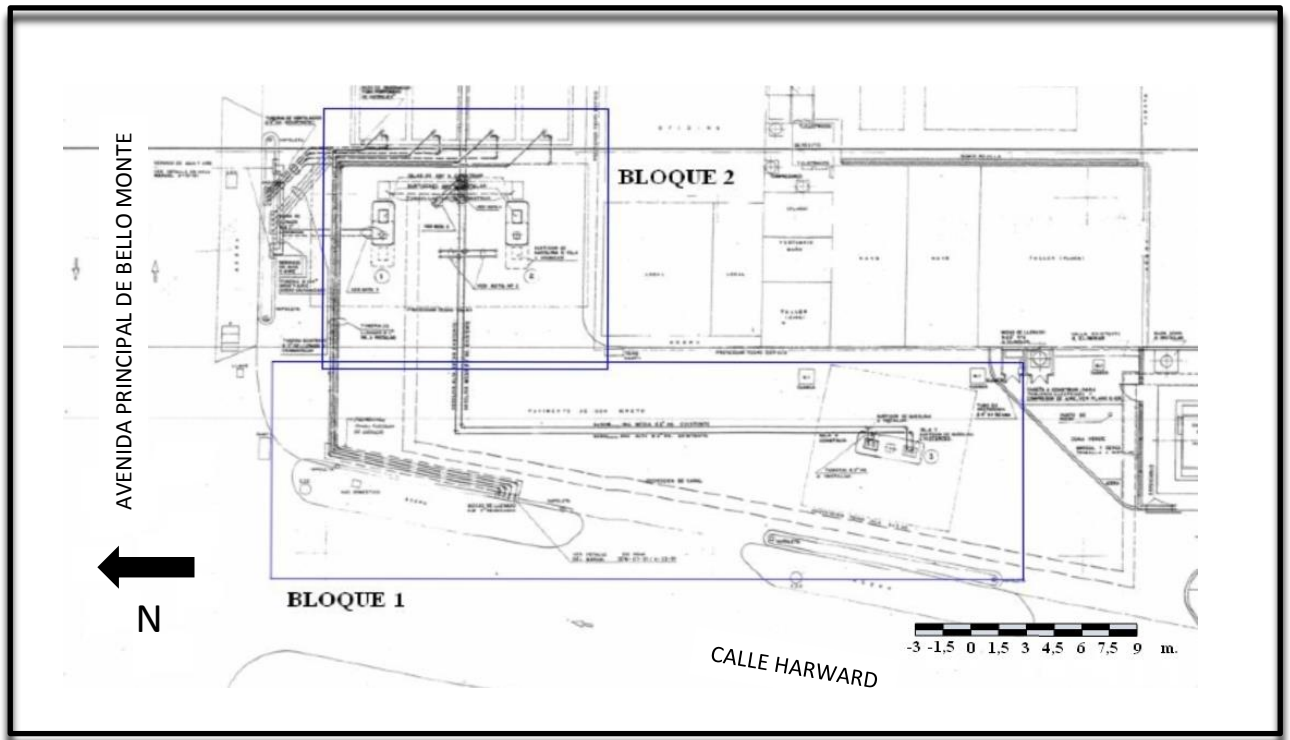


Figura 55. Estación de servicio Miguel Ángel dividida en bloques de trabajo.

Para el Bloque 1 los perfiles se dispusieron de la siguiente manera (figura 56)

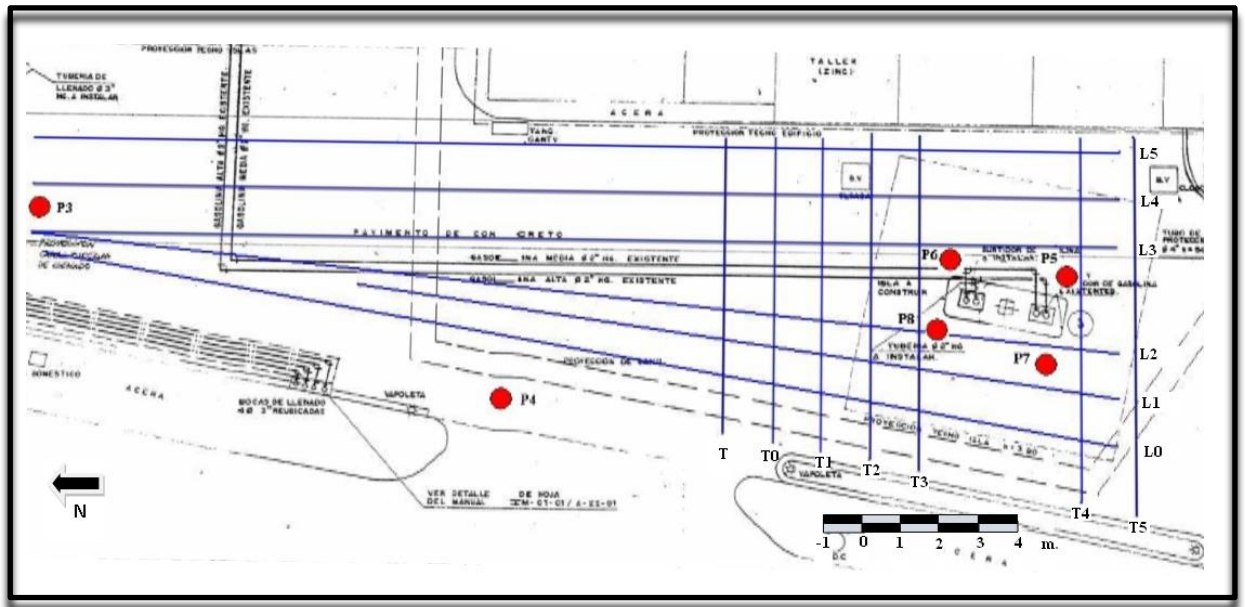


Figura 56. BLOQUE 1 mostrando distribución de perfiles y perforaciones de estudios previos. ● Los puntos representan las perforaciones.

La tabla 9 que se presenta a continuación muestra los rumbos geográficos de cada uno de los perfiles del BLOQUE 1.

Tabla 9. Rumbos geográficos de perfiles en BLOQUE 1

PERFIL	RUMBO
T, T0, T1, T2, T3, T4 y T5	E-O
L0	N10°E
L1	N8°E
L2	N5°E
L3, L4 y L5	N-S

Para este bloque se planteó el mallado, tomando en cuenta la ubicación de las perforaciones P4, P5, P6, P7 y P8 de manera de poder comparar resultados. Las perforaciones mencionadas indican valores de moderado a alto en concentraciones de vapores de compuestos orgánicos (VCO) (tabla 10). Se intentó cubrir la mayor área posible tomando en cuenta las limitaciones específicas del sitio. Tanto con la antena de 80 MHz como con la de 200 MHz se obtuvieron buenos resultados, no obstante la de 80 MHz nos muestra resultados más claros a mayor profundidad.

Tabla 10. Datos de perforaciones de estudios previos en la E/S Miguel Ángel. (Geohidra, 2008)

AREA DE LA E/S	PERFORACIÓN	VOC A 0,75 m (PPM)	VOC A 1,5 m (PPM)	GRADO DE CONTAMINACIÓN
Surtidores de combustible	P5	1062	1048	Alto
	P6	1257	41.3 - 378	Moderado
	P7	976	842 - 948	Alto
	P8	884	557 - 831	Alto
Llenadero de combustible	P4	1150	122 - 260	Moderado

Entrada/Salida de la E/S (aguas abajo)	P1	580	23 - 480	Moderado
	P2	380	206 - 655	Alto
	P3	447	11.7 - 208	Bajo
Entrada/Salida de la E/S (aguas arriba)	P9	112	-	Bajo

Como se muestra en la figura 56, los radargramas que se obtuvieron más cercanos a las perforaciones fueron L0 (figura 57), que pasa cerca de P4, L2 (figura 58), que cruza por encima de P7 y P8, L3 (figura 59) que pasa por P5 y P6, y de los transversales T4 (figura 60) y T3 (figura 61) cubren el área cercana a P5, P6, P7 Y P8.

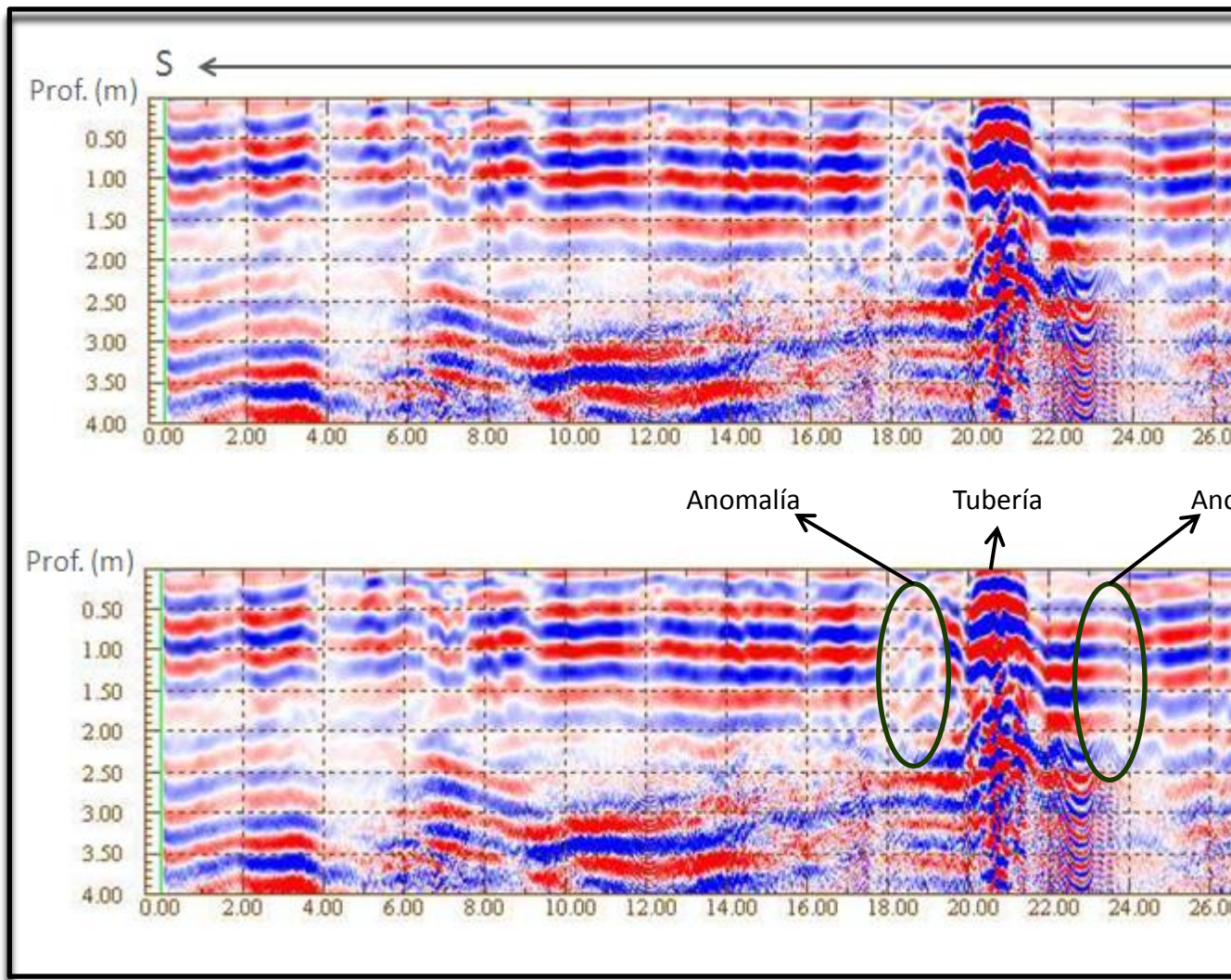


Figura 57. Radargrama obtenido para perfil L0, con antena de 80 MHz

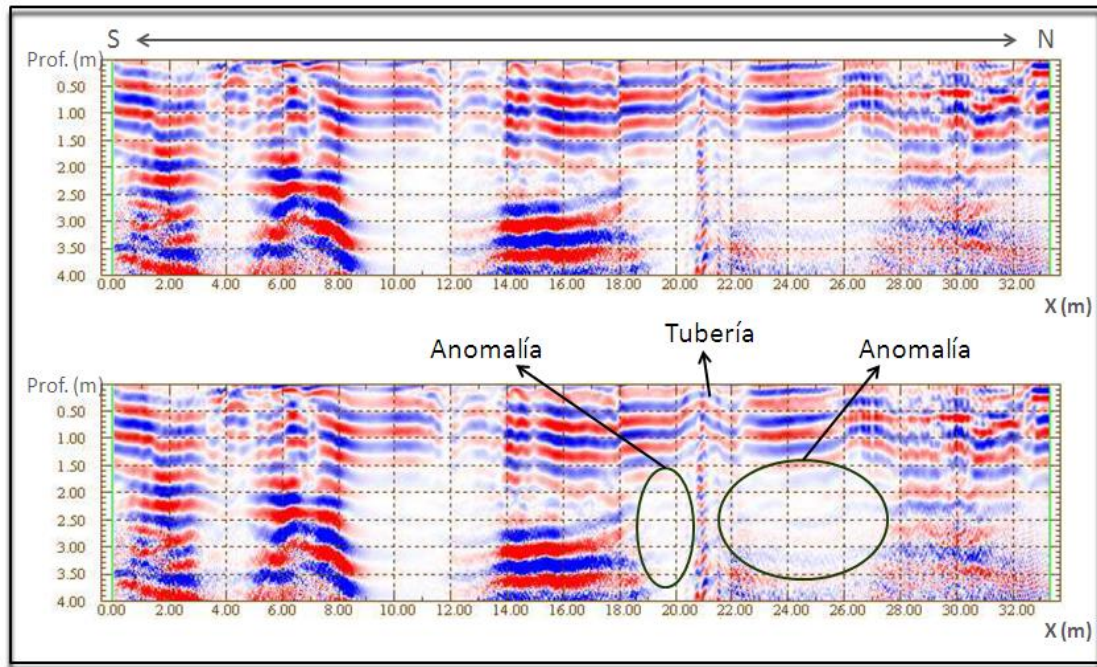


Figura 58. Radargrama obtenido para perfil L2, con antena de 80 MHz

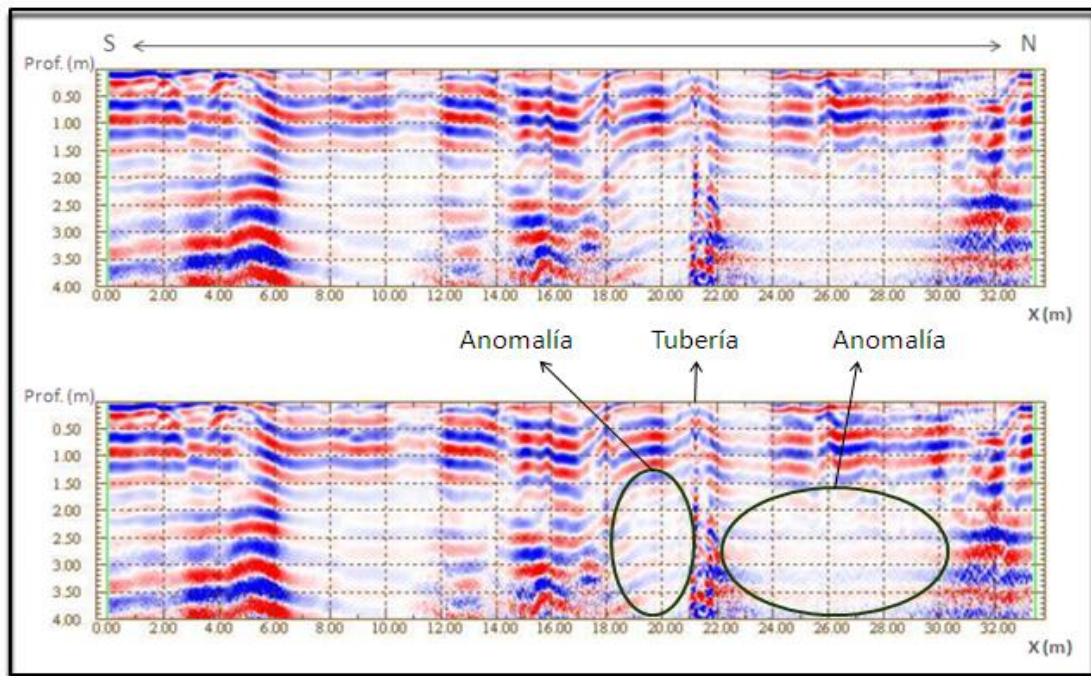


Figura 59. Radargrama obtenido para perfil L3, con antena de 80 MHz

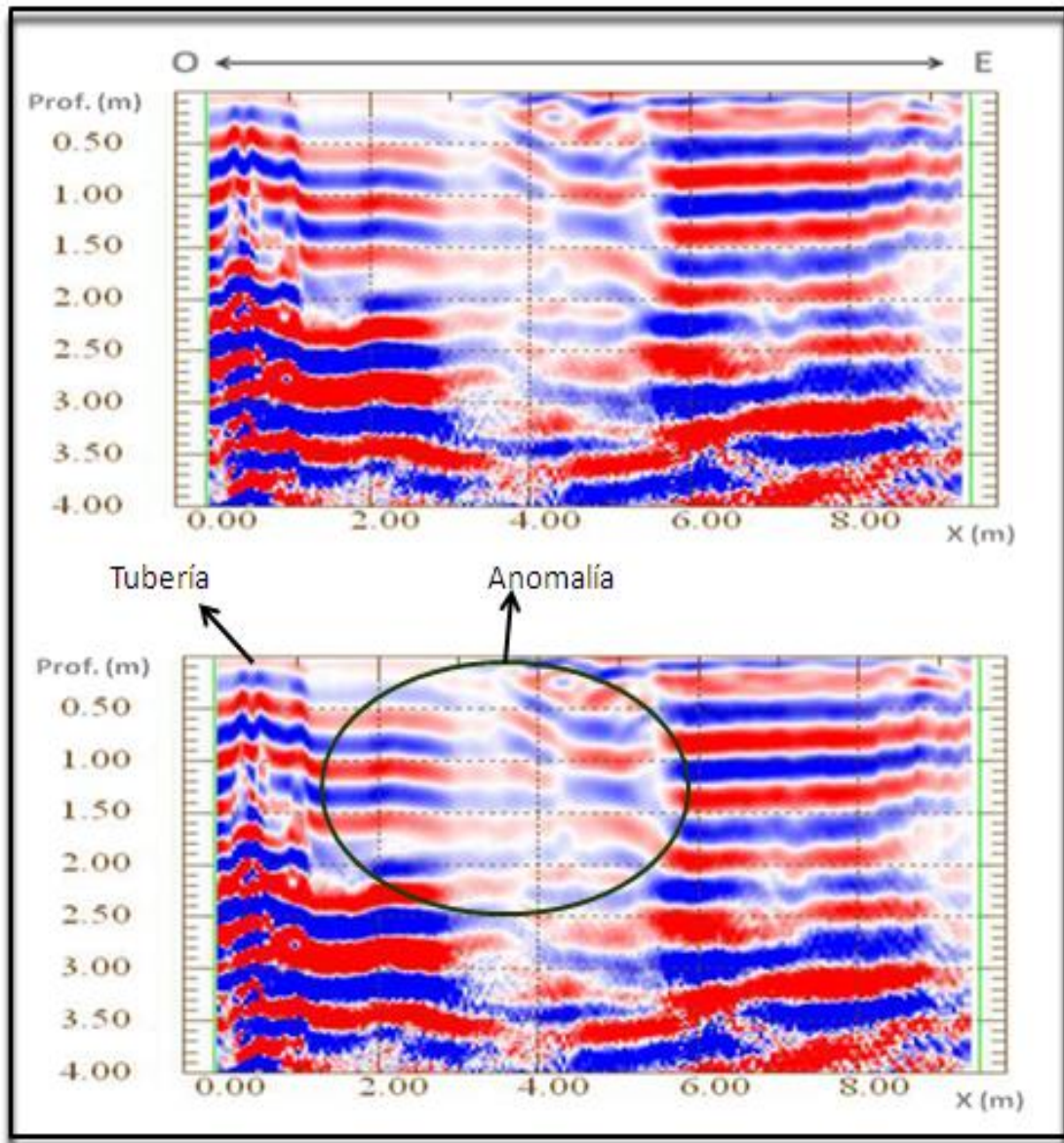


Figura 60. Radargrama obtenido para perfil T3, con antena de 80 MHz

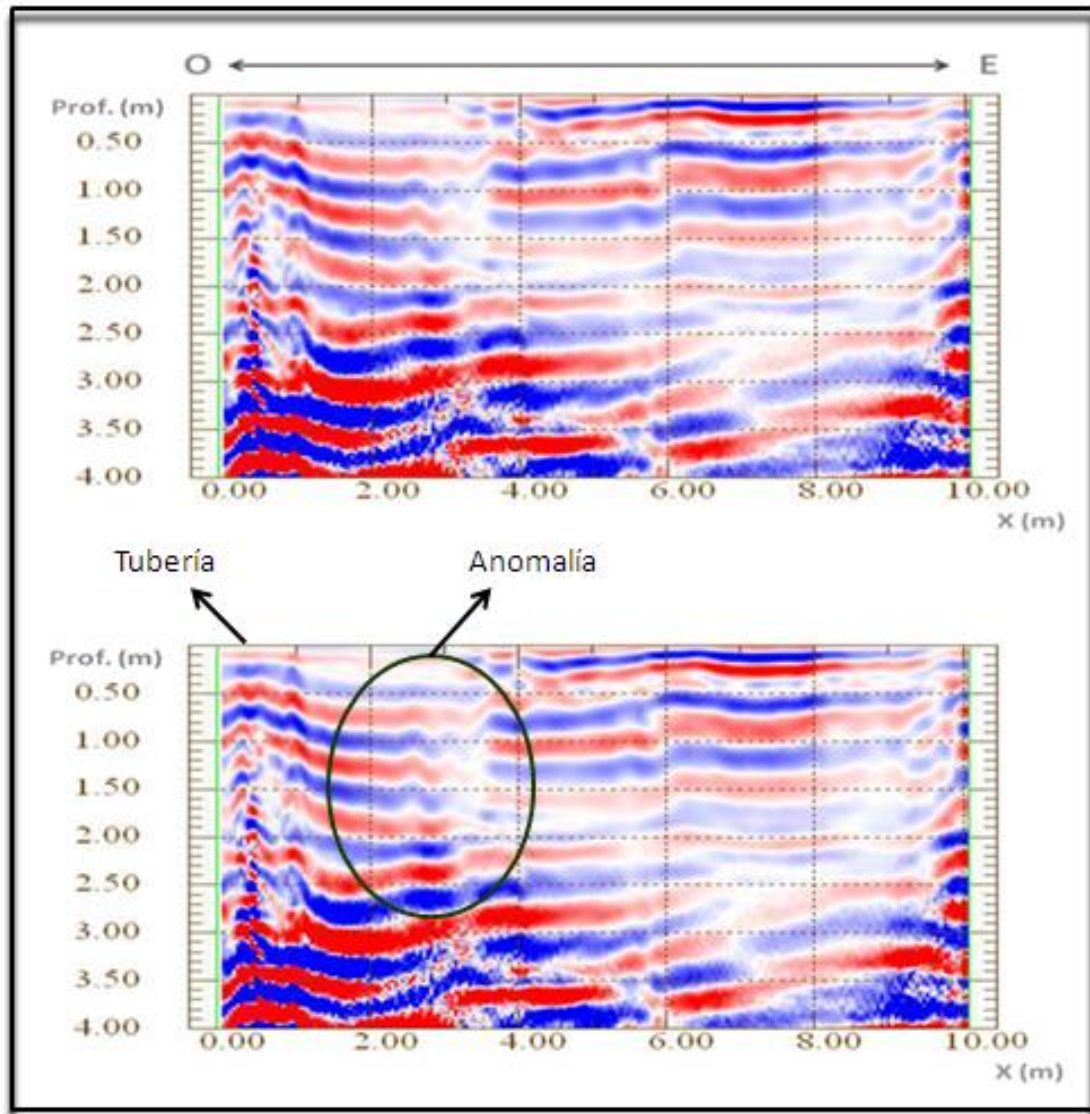


Figura 61. Radargrama obtenido para perfil T4, con antena de 80 MHz

Al analizar los radargramas antes mostrados (figuras 57-61) se observa que en los longitudinales (L0, L2 y L3) se presenta una anomalía alrededor de los 21 metros en dirección X, similar a la que se observa en los perfiles transversales (T3 y T4) alrededor de los 0,5 metros en dirección X. Esta anomalía está asociada a la presencia de una tubería de gas natural para vehículos “GNV” implantada en la estación a una profundidad aproximada de

0,5 m. Así mismo, en la mayoría de los radargramas se observó, en regiones ubicadas en las adyacencias de la tubería de GNV, una atenuación de la señal caracterizada por sectores del registro con espacios en blanco como lo señalan las figuras 50–54. Esta anomalía se manifiesta cuando el material en el subsuelo es altamente conductivo, similar a lo que sucedió en superficie en el perfil T0 (figura 43) del segundo sector que se adquirió.

Luego de analizar las imágenes del GPR individualmente, se construyó un modelo en 3D, el cual se muestra a continuación en la figura 62.

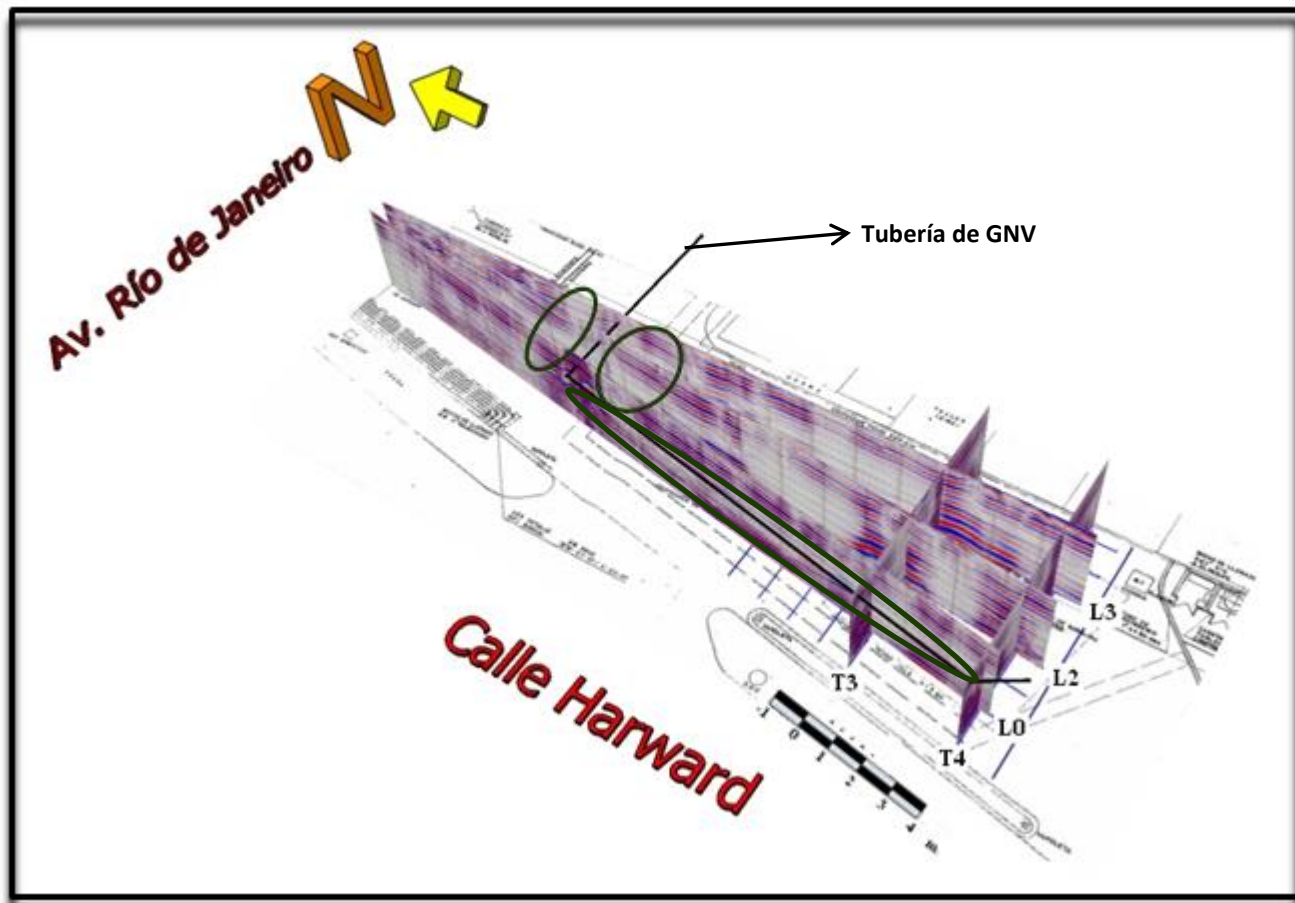


Figura 62. Modelo 3D del BLOQUE 1 donde se resalta las anomalías a lo largo de la tubería de GNV

En la figura 62, se señala con una línea color negro la tubería de GNV, y los óvalos verde muestra la ubicación de la anomalía con respecto a la tubería, lo cual sugiere que posiblemente en algún punto de la trayectoria de la tubería debe haber una fuga, forzando al combustible a ocupar los espacios de menor resistencia que estén disponibles, y por tal motivo migrar a lo largo de las capas de material menos consolidado, ubicado a lo largo de la tubería, ya que representan las zonas de debilidad generadas por la colocación de la tubería. Adicionalmente entre los perfiles T3, T4, L2 y L3, se repite el mismo tipo de respuesta; es difícil discernir si se trata de gas o de gasolina, sin embargo, al observar la figura 64, vemos que las tuberías que llevan la gasolina de los tanques a los surtidores se encuentran exactamente bajo los mismos, y concuerda con los resultados de las perforaciones P5, P6, P7 y P8 (tabla 10).

Una vez analizados los distintos radargramas individualmente, se construyó un modelo donde se simula el volumen de material en subsuelo afectado por esta invasión de hidrocarburo, el cual se muestra en la figura 63.

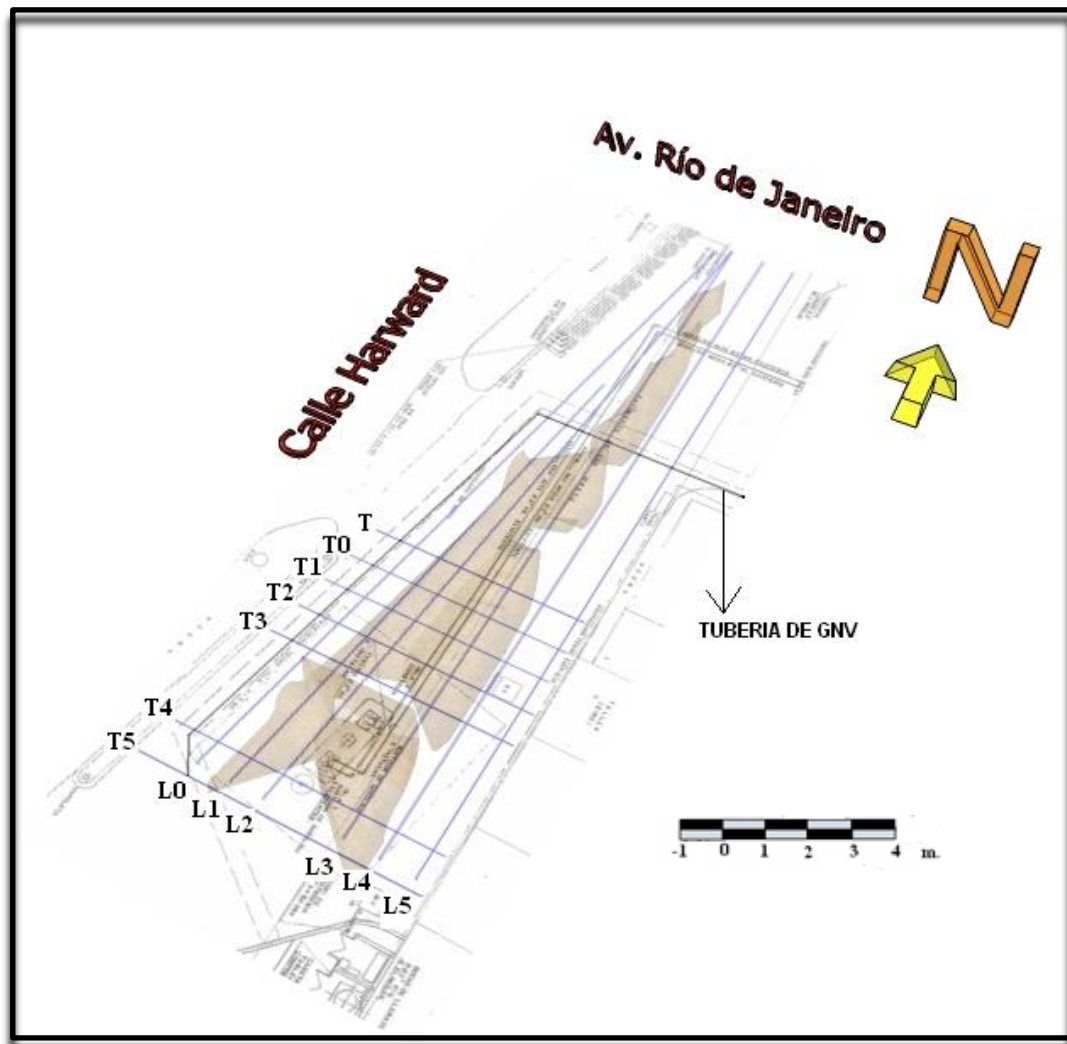


Figura 63. MODELO 3D de material afectado por invasión de hidrocarburo en BLOQUE 1

La figura 64 muestra una vista de planta del MODELO 3D mostrado en la figura 63, donde se identifican las tuberías tanto de gas como de gasolina, así como también las perforaciones realizadas en estudios previos por (Geohidra, 2008).

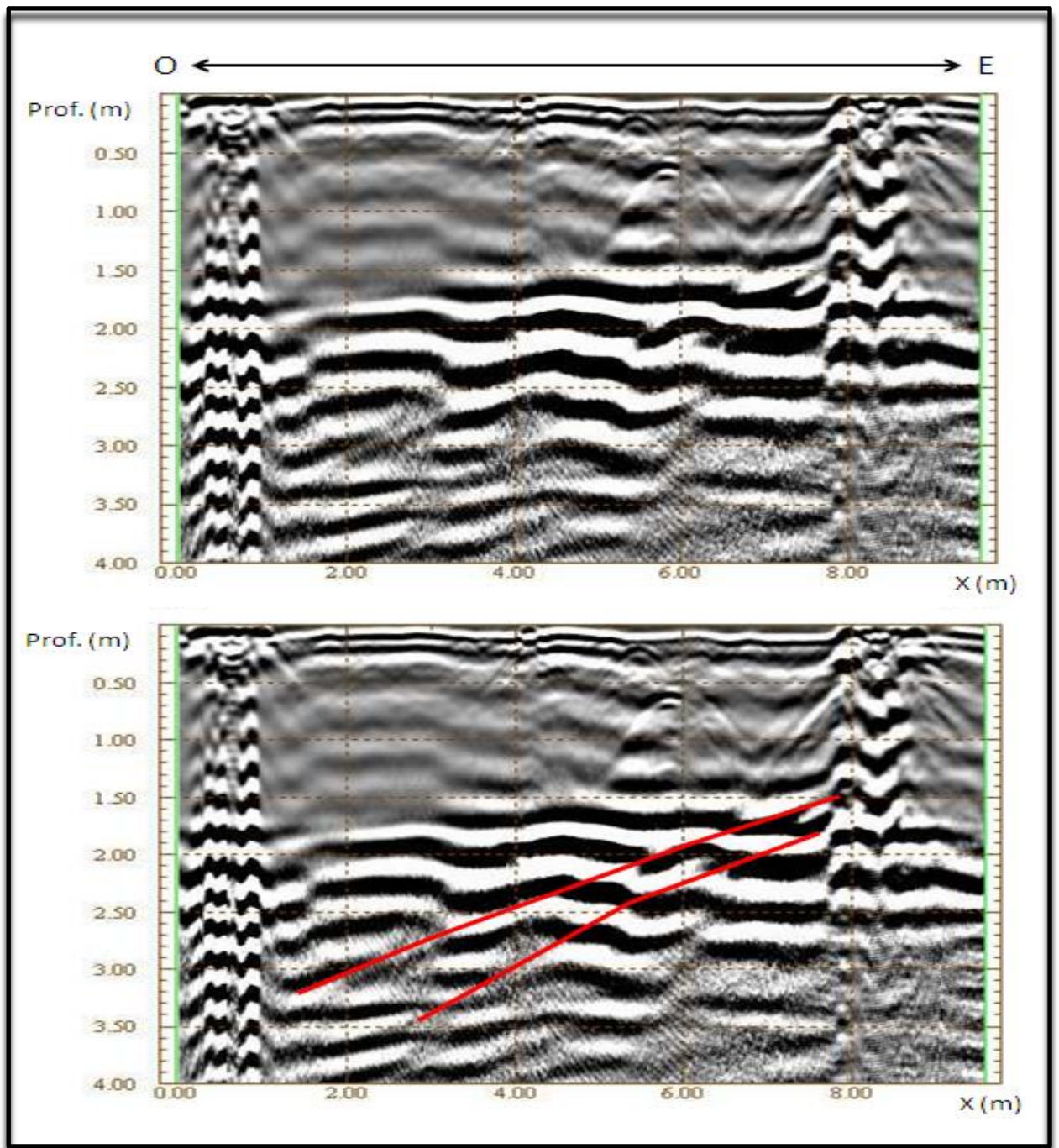


Figura 65. Radargrama obtenido para perfil T2, con antena de 200 MHz

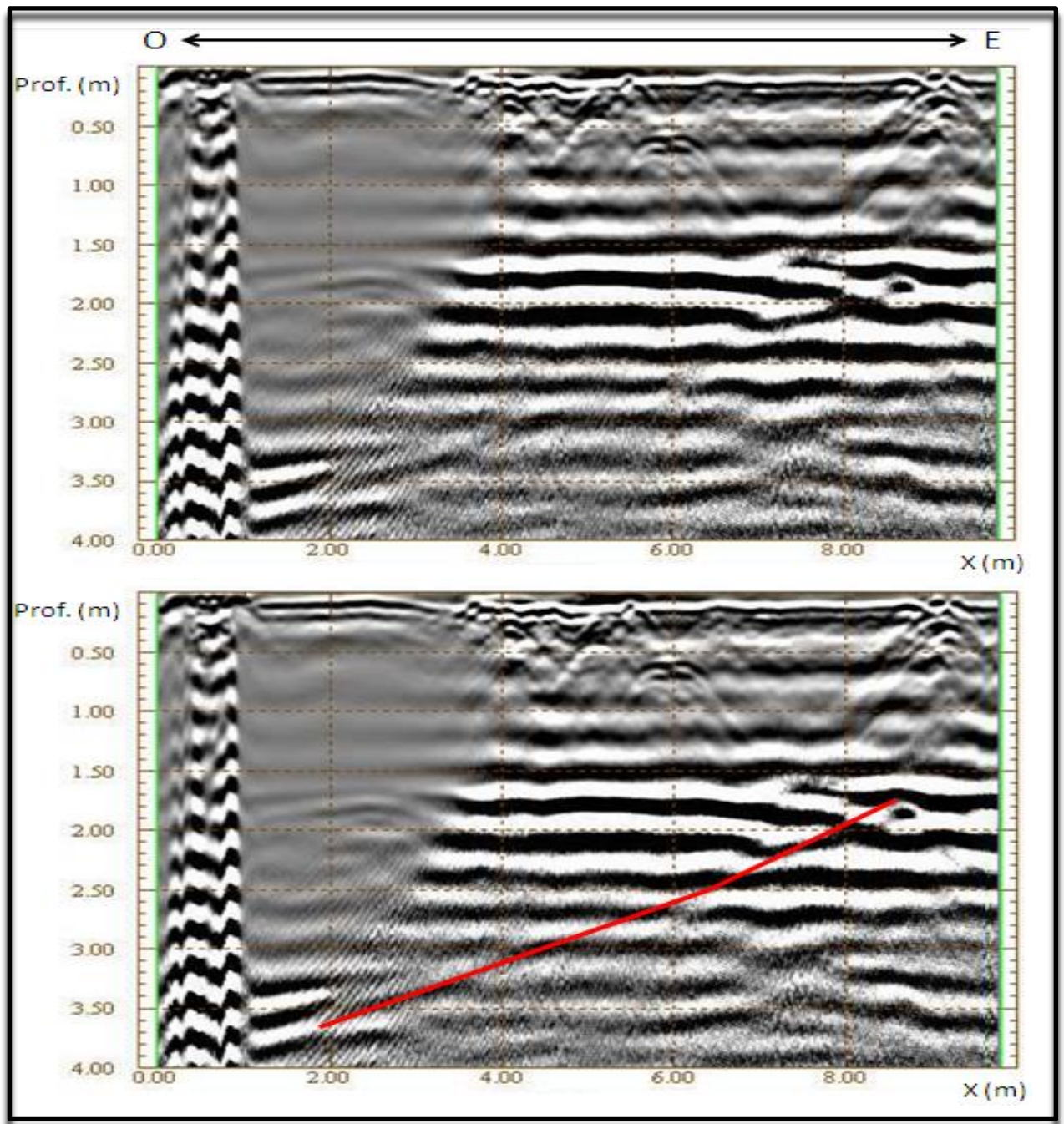


Figura 66. Radargrama obtenido para perfil T3, con antena de 200 MHz

Al analizar las figuras 65 y 66, la línea roja nos indica que existe un desplazamiento estructural en los sedimentos, dando origen a porosidades de tipo secundario.

Para el Bloque 2, la distribución del mallado fue como se muestra en la figura 67

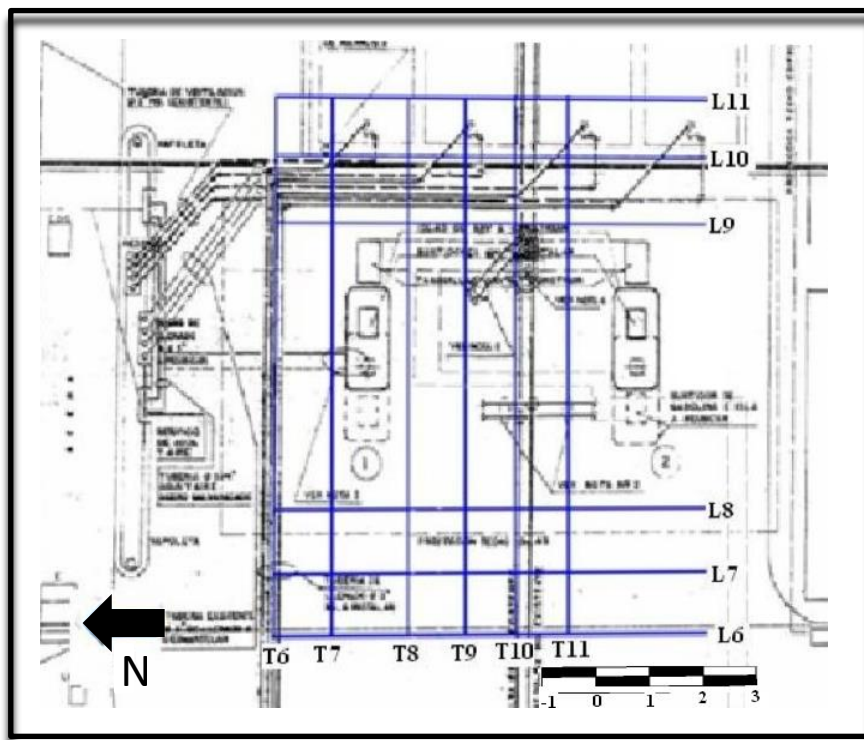


Figura 67. BLOQUE 2 mostrando distribución de perfiles.

La tabla 11 muestra los rumbos geográficos de los perfiles de este bloque

Tabla 11. Rumbos geográficos de perfiles en Bloque 2

PERFILES	RUMBOS
L6, L7, L8, L9, L10 y L11	N-S
T6, T7, T8, T9, T10 y T11	E-W

El objetivo de la disposición de estos perfiles fue cubrir el área cercana a los surtidores de GNV, con lo que se construyó un cubo alrededor de ellos.

Para este BLOQUE 2 se muestran los radargramas más representativos obtenidos para la antena de 200 MHz que corresponden a los perfiles T9, T10 y T11 (figuras 68, 69 y 70 respectivamente). En estos registros se observa una mejor resolución a profundidades más someras, como es de esperarse para éste tipo de antena, y se evidenció igualmente una anomalía, en las adyacencias a la tubería de GNV que puede asociarse a una fuga de gas por las razones antes expuestas.

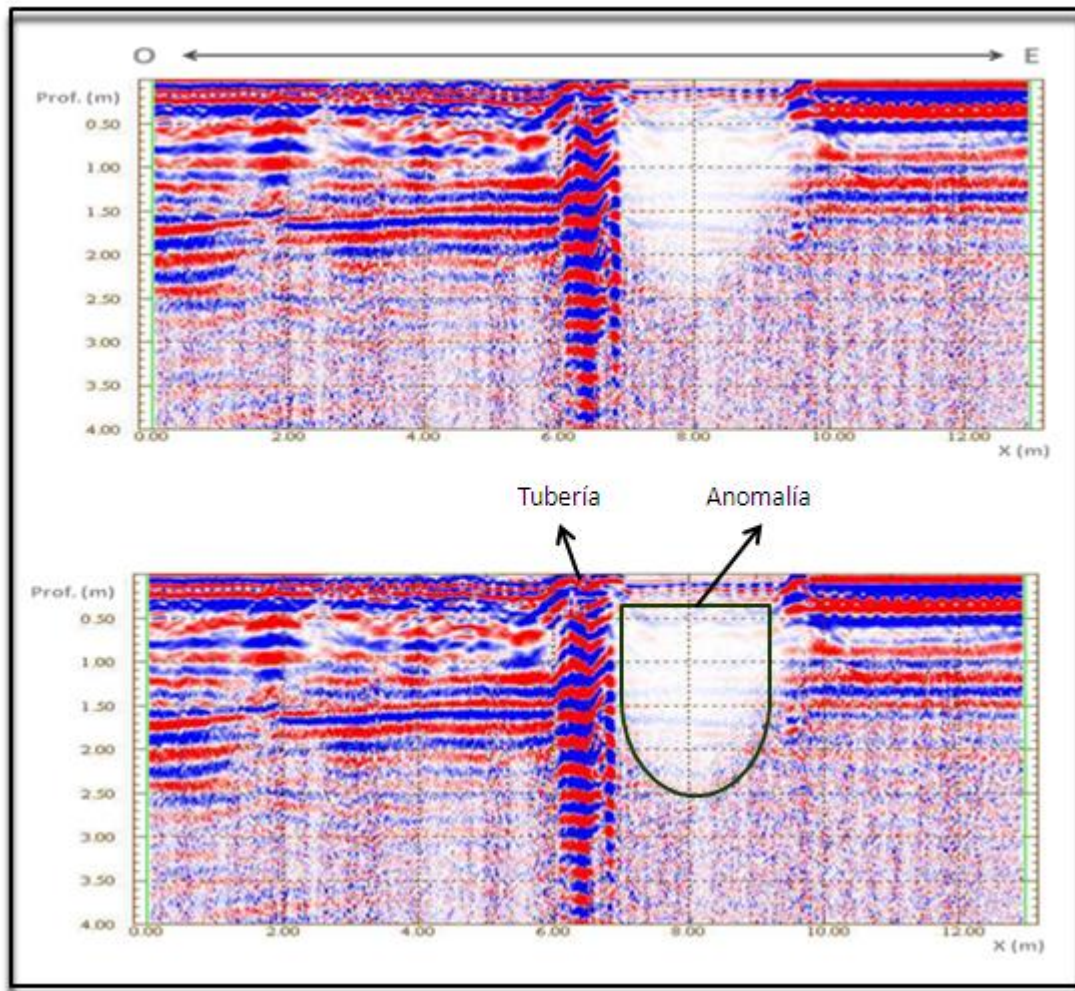


Figura 68. Radargrama obtenido para perfil T9, con antena de 200 MHz.

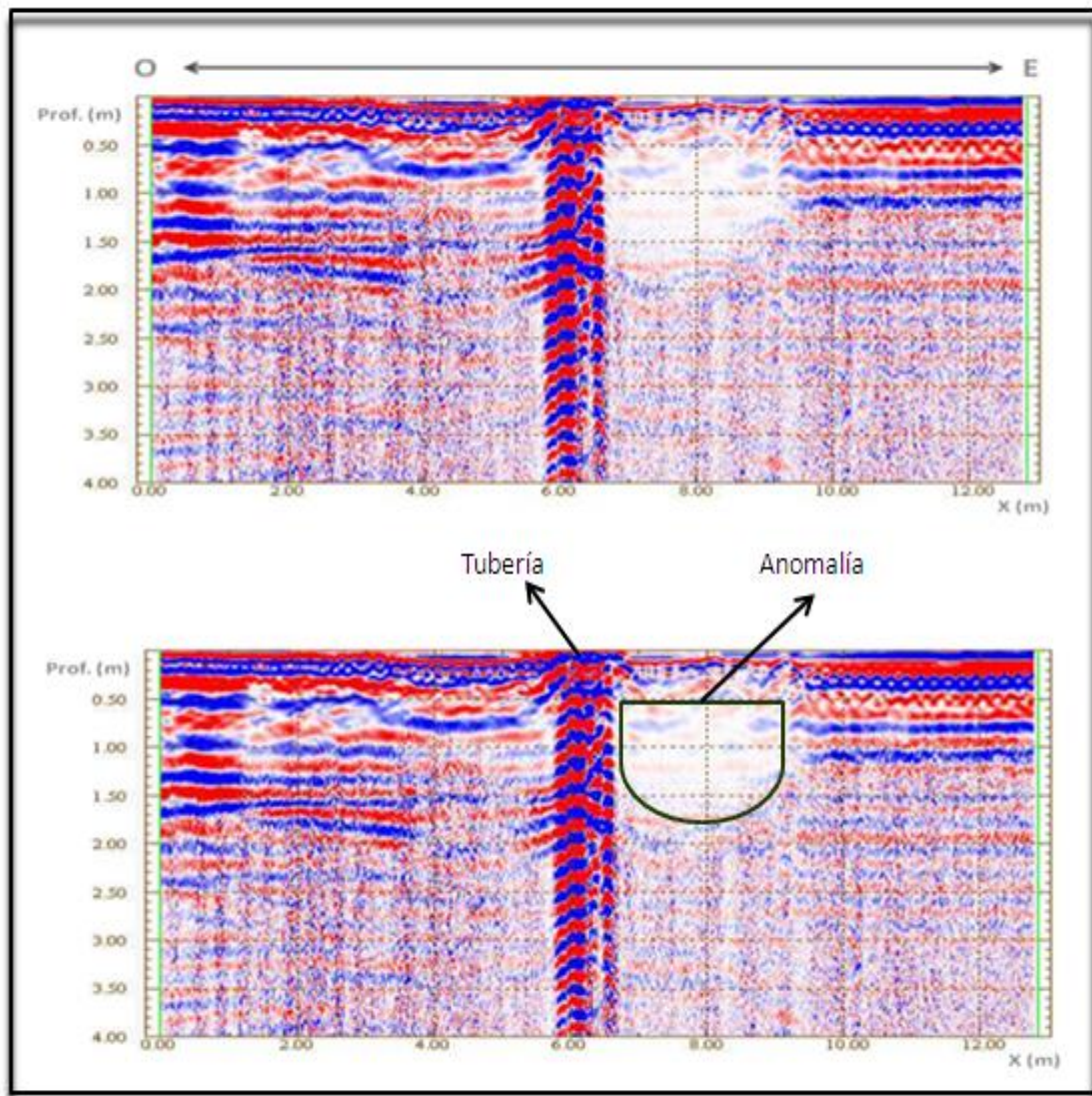


Figura 69. Radargrama obtenido para perfil T10, con antena de 200 MHz.

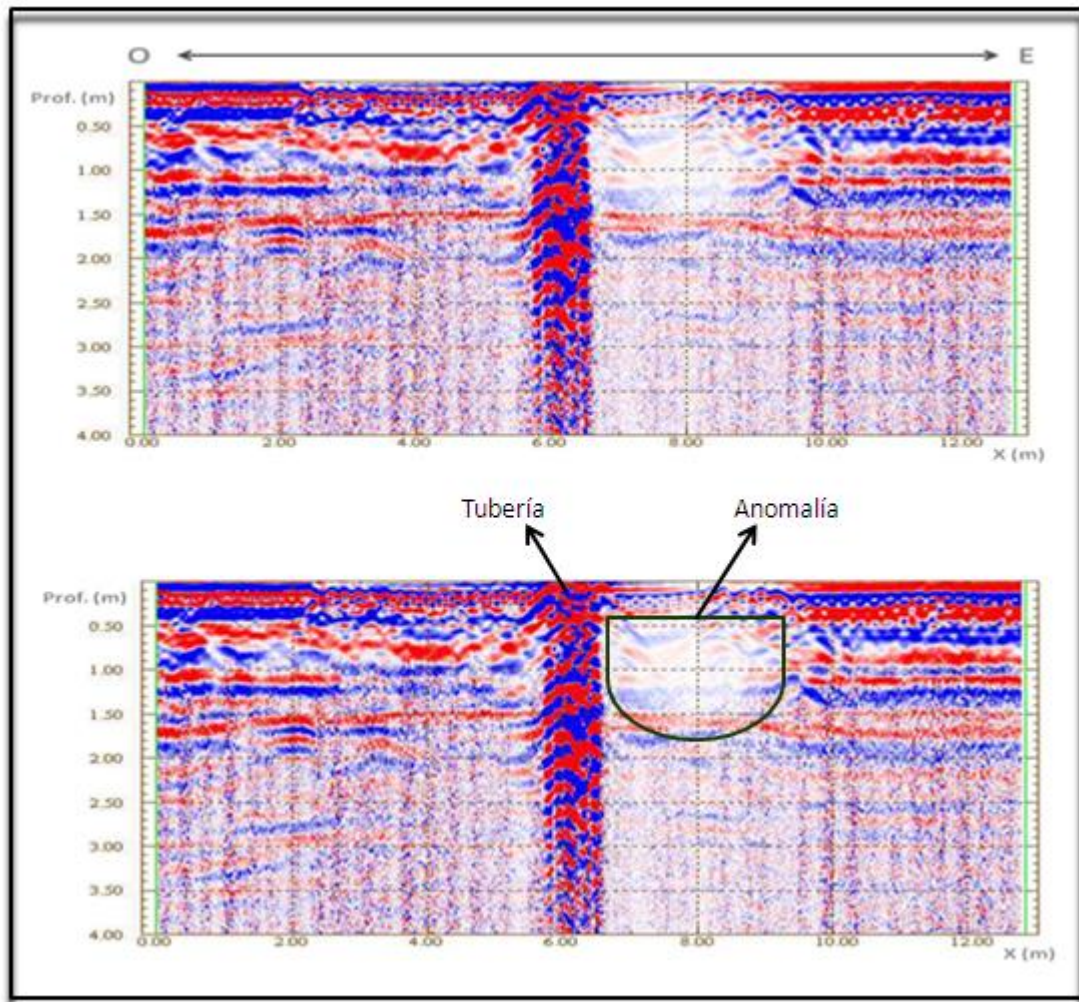


Figura 70. Radargrama obtenido para perfil T11 con antena de 200 MHz.

En los tres perfiles mostrados anteriormente (figuras 66, 67 y 68) se identifica la tubería de gas a una distancia de 6 metros en dirección X aproximadamente, y la anomalía asociada a la fuga de la tubería de gas al costado este de la misma. Al integrar estos resultados, con la representación de la tubería se generó un modelo 3D, que se muestra en la figura 71.

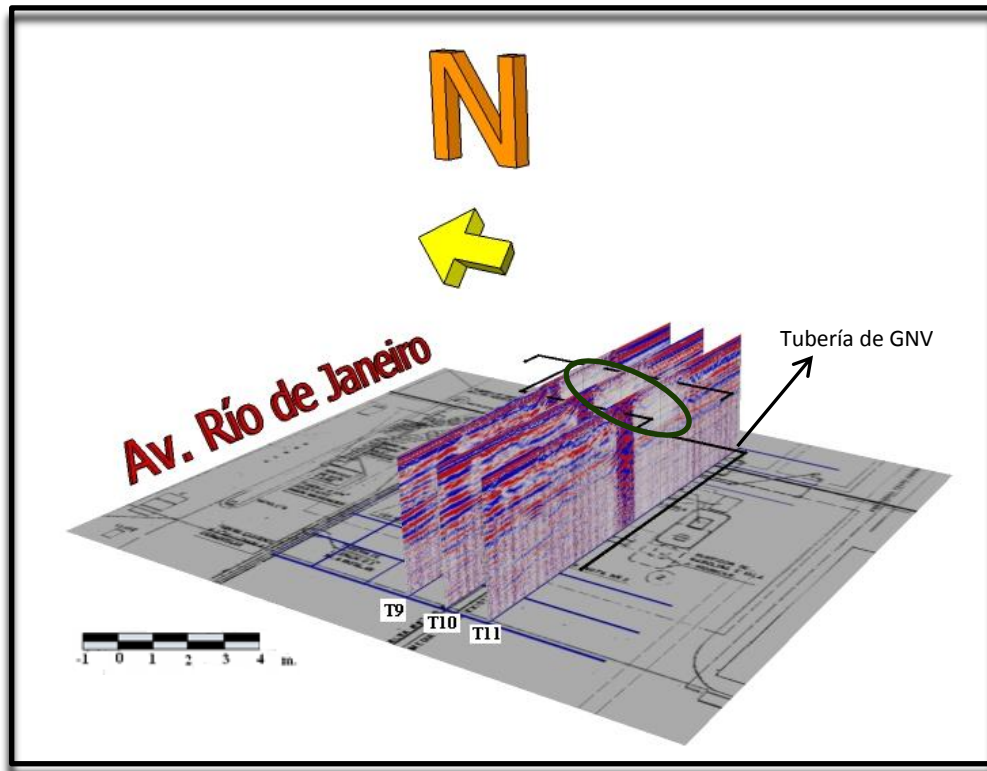


Figura 71. Modelo 3D del BLOQUE 2

Al observar el modelo de la figura 65, se puede apreciar encerrada dentro del óvalo verde la anomalía, que es constante en los tres perfiles, lo cual da pie para otro modelo en el cual se muestra la vista de planta del volumen de material en el subsuelo afectado por el fluido inflamable (figura 72).

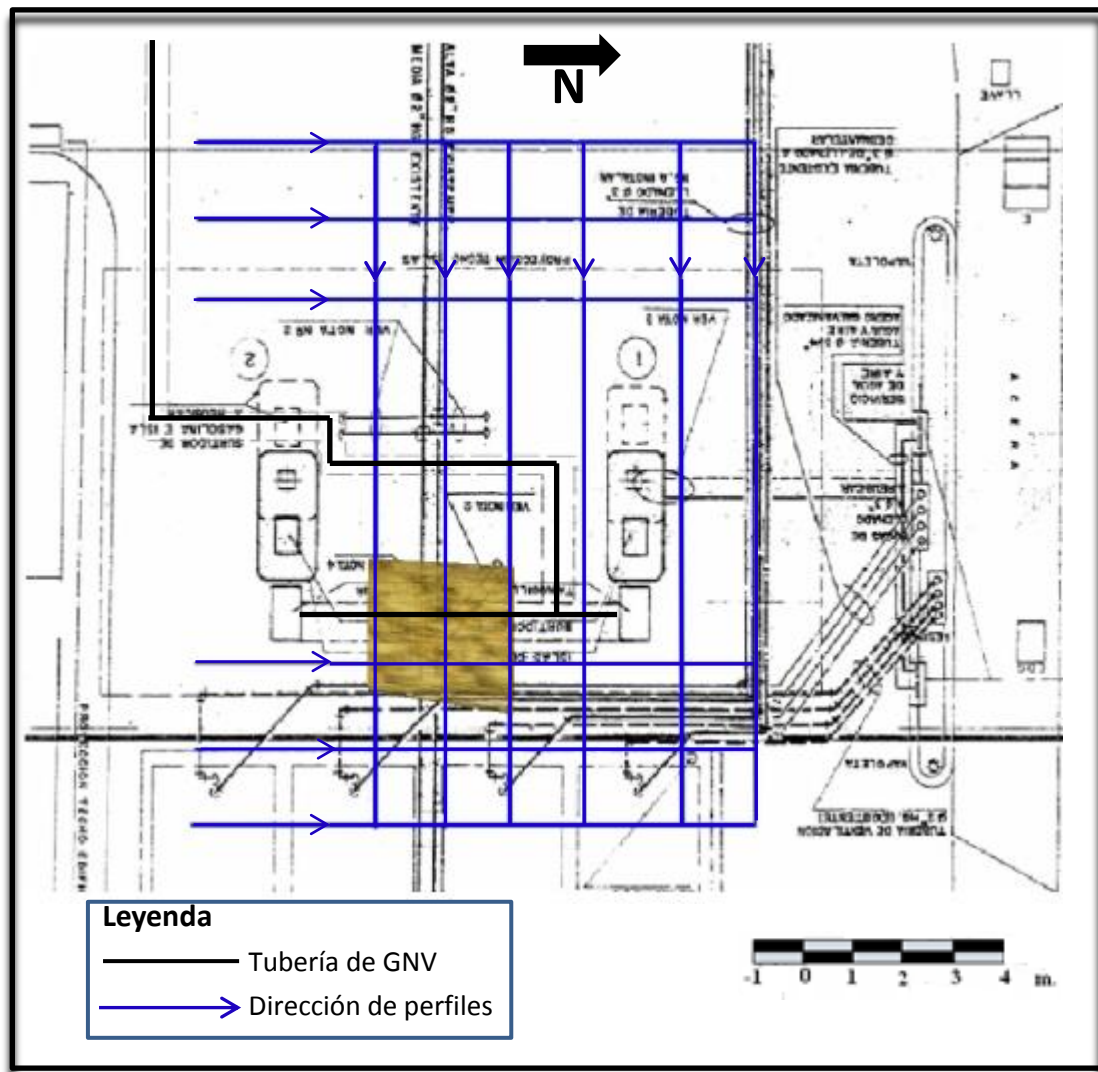


Figura 72. Vista de planta de BLOQUE 2, donde se muestra material en subsuelo afectado por invasión de hidrocarburo.

Como se ha mencionado anteriormente, existe una diferencia en la profundidad de penetración y resolución de los registros obtenidos con las diferentes antenas. La de 80 MHz nos ofrece una mayor profundidad de penetración en el suelo pero con una menor resolución, mientras que, la antena de 200 MHz nos brinda mejor resolución a una menor profundidad. A continuación, se hace una comparación directa entre dos radargramas

tomados sobre un mismo perfil, específicamente sobre el perfil T7 correspondiente al bloque 2 (figuras 73 y 74).

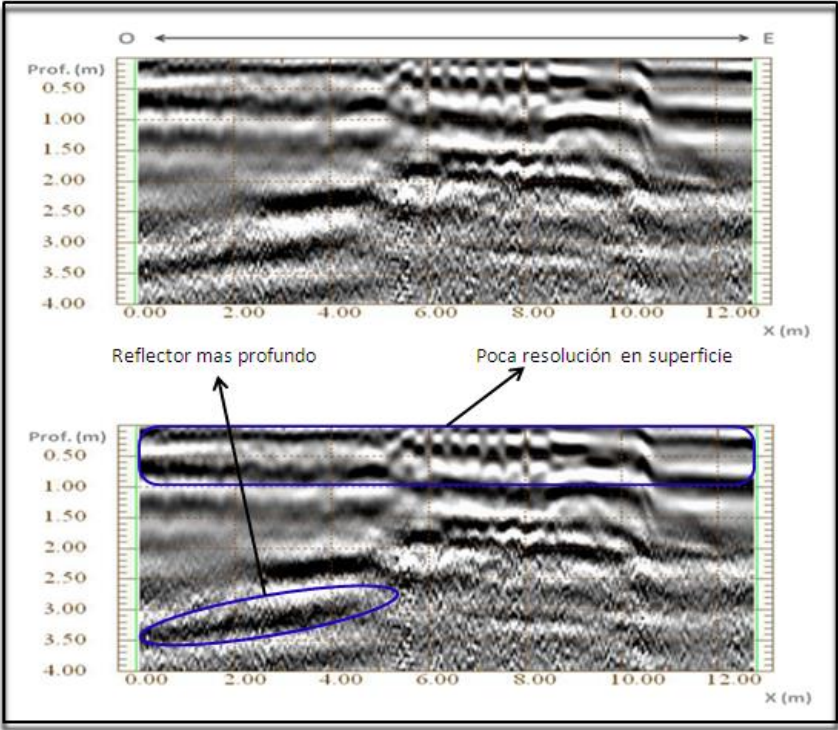


Figura 73. Radargrama obtenido para perfil T7 con antena de 80 MHz

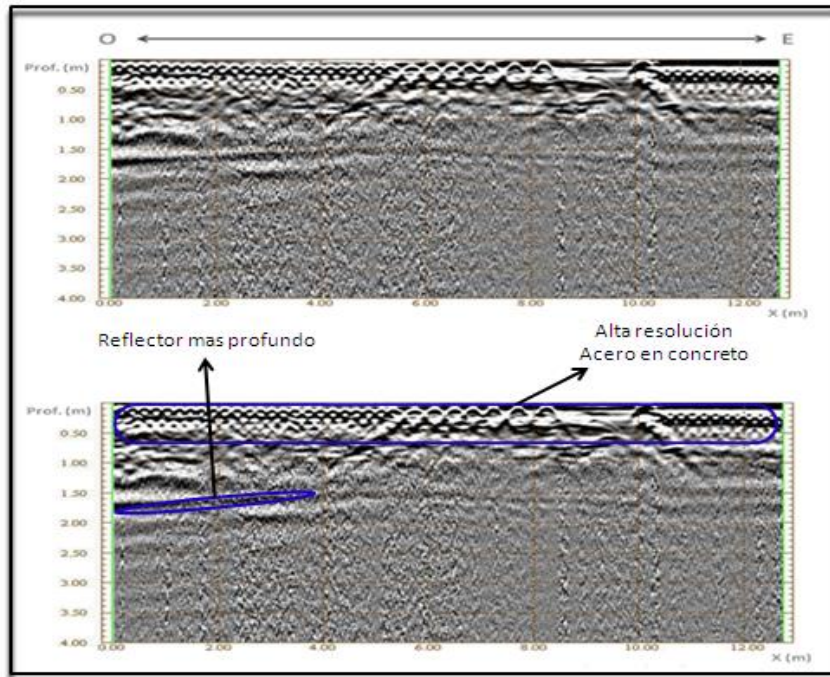


Figura 74. Radargrama obtenido para perfil T7 adquirido con antena de 200 MHz

Como se puede observar en la figura 71, el radargrama con la antena de 80 MHz alcanza profundidades de alrededor de 3,5 metros, pero a profundidades más someras no nos da mayor detalle, sin embargo al compararlo con el radargrama mostrado en la figura 72, vemos que en este caso si se observa mayor detalle en superficie, indicando una anomalía que va desde 0 a 0,5 m de profundidad, esta anomalía se asocia directamente a la placa superior de concreto la cual está compuesta por una armazón de acero, sin embargo, en profundidad vemos el ultimo reflector a 1,5 metros aproximadamente. Por tal motivo, puede decirse que resulta conveniente trabajar con una combinación de antenas que permitan mejorar la interpretación de la zona en estudio.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

A través de la adquisición, interpretación, integración y análisis de todos los datos obtenidos de métodos geofísicos y geológicos para este trabajo de investigación, se ha concluido lo siguiente:

- En la adquisición 1 quedo en evidencia que para aplicar la técnica de GPR es necesario que el área a estudiar se encuentre despejada y libre de elementos que generen ruido e interferencia a la señal de interés.
- Con relación a la caracterización de la arquitectura del subsuelo, el uso del GPR aporta información importante, mostrando planos de discontinuidad, además de litologías como arcillas, ya que las mismas poseen una alta conductividad, no solo vinculada al agua intersticial y molecular sino también a la composición de hierro que hace de estas medios ferromagnéticos. Aun cuando en esta investigación solo se realizó estudio sobre sedimentos, Audemard y Ollarves (2006) demuestra que para unidades litodemicas más complejas hacia la Cordillera Andina el equipo caracteriza muy bien tanto la arquitectura del subsuelo como porosidades secundarias asociadas a planos de fallas.
- Los análisis de perforación, descripción de frente de obra y descripción de muestra de mano, tienen un significado crucial durante la campaña de caracterización de subsuelo. Este dato duro permite estimar un pronóstico de rendimiento del equipo, ya que con la mineralogía y condiciones del sitio se puede asociar las propiedades dieléctricas de las rocas con los registros (radargramas),

para de esa forma poder asociar reflectores a litologías y así caracterizar la arquitectura del subsuelo con una mayor resolución.

- La técnica de GPR ha probado ser una herramienta de gran utilidad en la exploración no invasiva, mostrando una alta sensibilidad al contraste de material en el suelo somero en función de sus propiedades dieléctricas, lo cual, en condiciones específicas, permite la caracterización del mismo. Además resulto ser altamente eficiente en la caracterización de fluidos en el subsuelo, debido a que estos presentan una mayor conductividad, lo cual quedo demostrado en la adquisición 3, donde se establece un volumen aproximado de material, el cual se encuentra invadido por combustible, producto de fugas en el sistema de tuberías de la estación de servicio Miguel Ángel
- Los sedimentos analizados del frente de obra Bello Campo corresponden al macizo Ávila, específicamente al Complejo SAN JULIAN en su facie gneis que fueron depositados en este lugar de la cuenca producto de los aludes torrenciales proveniente del Ávila. Estos son producido y condicionado por la geodinámica interna o procesos endógenos como también a esa geodinámica o procesos exógenos que han modelado y siguen modelando la geomorfología del valle caraqueño.
- Es importante tener bien definido el tipo de objetivo y sobre todo, la profundidad aproximada del mismo, ya que en función de estos dos parámetros principales se definirá el tipo de antena a utilizar y la geometría de adquisición.

- Una vez adquiridos los resultados, se debe correlacionar los mismos con los de estudios previos de la zona, de manera tal que se reduzca al mínimo la incertidumbre.

6.2 RECOMENDACIONES

- Para la aplicación de la técnica de GPR, es necesario que el área de barrido del equipo se encuentre libre de cualquier agente conductor, por consiguiente no puede operarse bajo lluvia, ni en días inmediatamente posteriores a estas, ya que hay que esperar que los fluidos drenen y garantizar así las mejores condiciones para la adquisición.
- Los operadores del equipo deben estar libres de objetos metálicos al momento de manipularlo para evitar la interferencia de los mismos.
- La condición de blindaje de las antenas va cobrar importancia en función del tipo de área a estudiar. Si se van a realizar tendidos en un área rural, que no presente gran cantidad de ruido antrópico, tal como tráfico vehicular, o estructuras metalizas de gran tamaño, se recomienda el uso de antenas no blindadas, si por el contrario, la adquisición se realiza en un área cuyas condiciones presenten estructuras o situaciones que interfieran en la respuesta del equipo es necesario utilizar antenas blindadas para garantizar una mejor calidad en los datos.
- Tomando en cuenta la profundidad del objetivo que se desea caracterizar, se elegirá la frecuencia de la antena a utilizar, siempre guardando la relación que a mayor frecuencia menor profundidad de penetración y mayor resolución de respuesta.

- Para cuantificar volúmenes de fluidos en el subsuelo hace falta integrar estudios petrofísicos más avanzados que determine valores de permeabilidad y porosidad, además de los valores de densidad de los fluidos presentes en el mismo, que permitan realizar estos cálculos volumétricos. Incluso la integración de secciones finas permitiría con más certeza la caracterización de porosidades secundarias.
- Al recolectar muestras de sedimentos, es necesario dejarlas secar lo suficiente para evitar que la humedad altere los valores reales de la misma cuando se realice los estudios granulométricos.

BIBLIOGRAFÍA

Adrian Nieves, J. E. y González Ruiz, V. D., (2006). "Estudio Geológico y ambiental, para la determinación de la contaminación por hidrocarburo en las adyacencias de la estación de remboqueo-2, Troncal 54, Km 52, Edo. Anzoátegui". Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Aguerrevere, S. Z. G., (1937). Observaciones geológicas en la parte central de la Cordillera de la Costa, Venezuela. Caracas: Bol. Geol. y Min..

Audemard, F. y Ollarves, R. e. A., (2006). "El geo-radar como herramienta para la definición de fallas activas: aplicación en el sector central de la falla de Boconó, estado Mérida, Venezuela"., Caracas: s.n.

Cocha, F., s.f. [Último acceso: 27 Febrero 2013]. <http://es.scribd.com>

Dengo, G., (1951). Geología de la Región de Caracas. Caracas: Bol. Geol.

Departamento de Geología - Universidad de Oviedo, s.f. Petrología y Geoquímica. [Último acceso: 25 febrero 2013]. <http://petro.uniovi.es/>

Fajardo, L., (2011). Guía de Laboratorio de Sedimentología. Caracas: Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela.

Galvis, R. G., (2011). La Técnica GPR como herramienta en la detección de tuberías y filtraciones.. Caracas: TRX Consulting.

Gambini, J., s.f. Ingeniería y Construcción. [Último acceso: 15 Febrero 2013]. <http://civilgeeks.com>

Geoequipos., s.f. [Último acceso: 15 Febrero 2013]. <http://www.geoequipos.cl/>

Geohidra Consultores C.A., (2011). PLAN DE CONTINGENCIA. "Presencia de hidrocarburo libre en el subsuelo de la E.S PDV Las Mercedes", Caracas: s.n.

Geohidra, C. C., (2008). Remediación ambiental (FASE I) de la estación de servicio Miguel Angel Urb. Bello Monte, Municipio Baruta., Caracas: s.n.

- Gonzalez de Juana, C. et. al., (1980). Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. Caracas: Foninves. Tomo II.
- Hess, H. H., (1972). Basamento gnésico, Cordillera de la Costa, Venezuela. Caracas: Circular Soc. Venezolana Geólogos.
- IDS, I. d. S. S., (2003). THE GRESWIN 2 SOFTWARE MODULE. Pisa: s.n.
- IDS, I. d. S. S., (2005). Easy Guide. How to assemble the backpack kit. Pisa: s.n.
- IDS, I. d. S. S., (2009). SOFTWARE K2_FW Acquisizione dati. Pisa: s.n.
- Martin, J., (2004). Análisis del subsuelo utilizando técnicas geofísicas. Sistema Georadar RAMAC/GPR. Memoria del VIII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía TOPCART 2004, p. 17.
- Mendez, A., (1966). Tectónica de la parte central de las montañas occidentales del Caribe, Venezuela.. En: Caracas: Bol. Geol., pp. 116-139.
- Navarro, L., (1999). Guía de Laboratorio de Sedimentología.. Caracas: Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela..
- Oropeza, J. y Zambrano, A., (2007). Elaboración de una base de datos de geología urbana para fines de microzonificación sísmica para la ciudad de Caracas. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela. Caracas: s.n.
- Ostos, M., (1990). Evolución tectónica del margen sur-central del Caribe basado en datos geoquímicos. Caracas: Geos.
- Parasnis, D. S., (1970). Principios de geofísica aplicada.. Madrid: s.n.
- Romero J., (2009). Prospección geofísica aplicando GPR en la iglesia Santa Ana del norte, municipio Gómez, estado Nueva Esparta., Caracas: s.n.
- Singer, A., (1977). Tectónica reciente, morfogénesis sísmica y riesgo geológico en el graben de Caracas. Caracas: Memorias V Congreso Venezolano de Geología.
- Smith, J., (1952). Geología de la región de Los Teques-Cúa. Caracas: Bol. A.V.G.M.P..

TRX Consulting. Engineering Earth Sciences., 2005. TRXconsulting.
Ingeniería & Ciencia de la Tierra.
[Último acceso: 23 Julio 2011]. <http://www.caracasprueba1.com/>

Universidad Católica de Valparaíso. [Último acceso: 20 01 2013]. www.ucv.cl

Urbani, F. 2000 Revisión de las unidades de rocas ígneas y metamórficas de la cordillera de la costa, Venezuela.(Versión original: diciembre de 1997. Adiciones: agosto 2000). GEOS (33): 1-170

Werhmann, M., (1972). Geología de la región de Guatire -Colonia Tovar. Caracas: IV Cong. Geol. Venez..

Weston Geophysical Engineers, I. I., (1969) Seismic investigations Valley of Caracas and the Litoral Central, Caracas, Venezuela: s.n.

Wtorek, J., (2003). EUDEM2 Technology Survey Electrical and Magnetic Properties of Soil.. s.l.:s.n.

Zurita, O. et. al., (2002). Adquisición y procesamiento avanzado de datos de Ground Penetrating Radar. Caracas: Memorias del XI Congreso Venezolano de Geofísica.

ANEXOS