

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE GEOLOGÍA, MINAS Y GEOFÍSICA
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA
TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**APLICACIÓN DE RADAR DE PENETRACIÓN DE
SUELOS (GPR) PARA LA CARACTERIZACIÓN
GEOTÉCNICA DE SUELOS**

Tutor académico: Dr. Gustavo Malavé.
Tutor industrial: MSc. Miguel González.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela para
optar al título de Ingeniero Geofísico
por el Br. Kerly L. Sánchez Mederos

Caracas, Mayo del 2004

RESUMEN

Sánchez M. Kerly L.

APLICACIÓN DE RADAR DE PENETRACIÓN DE SUELOS (GPR) PARA LA CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE SUELOS.

Tutor académico: Prof. Dr. Gustavo Malavé. Tutor Industrial: MSc. Miguel González. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2004, n° pag. (146).

Palabras Claves: GPR, conductividad, permitividad eléctrica, Caracterización de suelos.

El método del Radar de Penetración de Suelos (GPR) se ha ido integrando en los estudios geotécnicos, ya que ha generado excelentes resultados en la definición estructural y litológica de los suelos. Bajo esta óptica, PDVSA – Intevep, en el año 2002 adquirió un GPR, de marca Sensors and Software. Asimismo surgieron las ideas en la corporación de desarrollar un trabajo con el objetivo de evaluar la aplicabilidad de la técnica GPR en la caracterización de suelos, cuyas propiedades geotécnicas fueran conocidas. La aplicación de este estudio se realizó en dos zonas de Lagunillas, Edo. Zulia: el dique de la Costa Oriental de Lago de Maracaibo y un área donde se realizó una inyección, caracterizadas por suelos arcillosos y saturados de agua.

La propuesta metodológica del proyecto de investigación es una nueva estrategia sistemática para la caracterización geotécnica de suelos. Esta estrategia se conformó en tres fases: La primera, es la determinación matemática de los parámetros electromagnéticos del subsuelo, los cuales determinan la factibilidad de éxito del estudio del radar, y permiten la construcción de trazas sintéticas, que ayudan a las interpretaciones de los radargramas. La segunda fase describe el procesamiento aplicado en los radargramas, con el objeto de mejorar las imágenes. Por ultimo, la tercera fase corresponde a la visualización de las imágenes resultantes, con la cual se busca optimizar la correlación entre radargramas, y entre las trazas sintéticas. Del desarrollo de la investigación se comprobó que: (a) la evaluación de la aplicabilidad de la técnica de GPR, en conjunto con datos geotécnicos para la extrapolación de la caracterización geotécnica de los suelos, resultó eficaz, principalmente en la identificación del volumen y la conductividad del agua; (b) una baja penetración representada en los radargramas es un indicativo de la presencia de grandes volúmenes de agua en los estratos; (c) la frecuencia de las antenas determina la resolución y la profundidad de observación en los radargramas; (d) el desarrollo de un modelo litológico y volumétrico previo del área a prospectar, son factores útiles en la estimación de las respuestas de los radargramas y determinan las posibilidades y limitaciones de reconocer el objetivo de prospección.

Con todo amor,
a mis Padres...

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada quiero agradecerle a Dios por ser la fortaleza de esta y todas las metas de mi vida.

A la digna Universidad Central de Venezuela por permitirme desarrollar mi carrera universitaria y esencialmente a profesores de la calidad de José Cavada, Marco Figueroa, a mi tío Alfredo Mederos, Orlando Méndez y María Vona por haberme formado en el profesional que soy.

A PDVSA-Intevep por concederme sus instalaciones y todo el apoyo financiero e intelectual que hizo posible la realización de este trabajo.

A mis tutores, Dr. Gustavo Malavé y MSc. Miguel González por su confianza y apoyo a lo largo de la realización del proyecto de investigación.

Un especial agradecimiento al Dr. José Alvarelllos, *mi tutor sentimental*, que con sus valiosos conocimientos y ayuda prestada se hizo parte fundamental del presente trabajo.

A la Ing. Moralis González, al Lic. en Física Cesar Vázquez y a los TSU Henry Duque y Jaime Azuaje por la ayuda prestada...

Gracias a todos mis amigos, por estar conmigo en todo momento...

A Ricardo por su amor, comprensión, apoyo...

Finalmente quiero agradecerle a toda mi familia, especialmente a las personas que más admiro: a mis padres Rafael e Yvelisse, y a mi hermana Keyla por su apoyo incondicional en toda mi vida y carrera universitaria.

INDICE

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

	pp.
LISTA DE TABLAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
 CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	1
 CAPITULO II	
MARCO TEÓRICO	4
2.1 Propiedades electromagnéticas de los suelos: características y Relaciones empíricas	4
2.1.1 Permeabilidad magnética	4
2.1.2 Conductividad	5
2.1.3 Permitividad	7
2.2 Ondas electromagnéticas	11
2.2.1 Producción de una onda electromagnética	12
2.2.2 Proceso de emisión de las ondas electromagnéticas	13
2.3 Fundamentos teóricos del electromagnetismo	14
2.3.1 Leyes de Maxwell	14
2.3.2 Parámetros de propagación	15
2.3.3 Constante de propagación	15
2.3.4 Velocidad de fase	16
2.3.5 Atenuación y <i>profundidad de piel</i>	16

2.4 Propagación de las ondas electromagnéticas en medios heterogéneos	18
2.4.1 Impedancia electromagnética	18
2.4.2 Coeficientes de reflexión y transmisión	19
CAPÍTULO III	
TÉCNICAS APLICADAS	20
3.1 Técnica Geofísica: Radar de Penetración de Suelos (GPR)	20
3.1.1 Profundidad de investigación	21
3.1.2 Distancia entre medidas	21
3.1.3 Direccionalidad de las antenas	22
3.1.4 Procesamientos en Radargramas	23
3.1.4.1 Control de Ganancia Automática	24
3.1.4.2 Filtro Temporal “ <i>Dewow</i> ”	25
3.1.4.3 Análisis de CMP	26
3.2 Técnica Geotécnica: Ensayo de Penetración Estándar (SPT)	26
3.3 Relaciones volumétricas y gravimétricas de los suelos	28
CAPITULO IV	
METODOLOGÍA	29
4.1 Fase 1	30
4.1.1 Cálculo de los parámetros electromagnéticos mediante datos geotécnicos	30
4.1.2 Construcción de trazas sintéticas	31
4.2 Fase 2	33
4.2.1 Procesamiento en radargramas	33
4.2.2 Elaboración de gráficas para el análisis de CMP	33
4.3 Fase 3	33
4.3.1 Visualización de los radargramas y sus trazas sintéticas	33
4.3.1.1 Criterios generales para el análisis de perfiles y trazas sintéticas	35

4.3.2 Visualización 3D de los mallados	36
CAPITULO V	
ADQUISICIÓN DE DATOS	38
5.1 Ubicación	38
5.2 Estudio de datos geotécnicos	40
5.3 Determinación de la conductividad del agua	49
5.4 Adquisición de radargramas	50
5.4.1 Distribución de los perfiles de campo	50
5.4.2 Procedimiento de adquisición	54
5.4.3 Parámetros de adquisición	56
CAPITULO VI.	
REULTADOS Y ANÁLISIS	57
6.1 Conductividad del agua del Lago de Maracaibo	57
6.2 Parámetros electromagnéticos obtenidos mediante datos geotécnicos	58
6.3 Procesamiento de los radargramas	65
6.4 Perfiles de tipo CMP	66
6.5 Perfiles adquiridos sobre rocas	80
6.6 Perfiles y trazas sintéticas sobre el dique	86
6.7 Perfiles y trazas sintéticas sobre el terreno natural	95
6.8 Perfiles de la zona de inyección	108
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
REFERENCIAS	116
APENDICES	
APÉNDICE A. Superficie Específica de los minerales	120

APÉNDICE B. Deducción de la ecuación de ondas electromagnéticas	122
APÉNDICE C. Constante de propagación en función de los parámetros electromagnéticos	125
APÉNDICE D. Deducción de los coeficientes de Reflexión y Transmisión	128
APÉNDICE E. Valores empíricos para γ_h , de suelos basados en N (numero de golpes)	131
APÉNDICE F. Deducción de las ecuaciones de porosidad y saturación mediante datos geotécnicos	133
APÉNDICE G. Deducción de la utilización del valor absoluto de los Coeficientes de Reflexión y Transmisión	137
APÉNDICE H. Selección del intervalo de muestreo en tiempo	139
APÉNDICE I. Descripción de los tendidos adquiridos con el GPR	141
APÉNDICE J. Impedancia y Coeficientes de Reflexión y Transmisión de los estratos procedentes de los datos geotécnicos	144

LISTA DE TABLAS

Tabla	pp.
2.1. Fórmulas que definen la conductividad de los suelos	7
2.2. Parámetros electromagnéticos de las rocas y suelos	11
2.3. Velocidades y Atenuación de las ondas electromagnéticas en medios característicos	17
5.1. Resultados de datos geotécnicos sobre el Dique de la Sección A	47
5.2. Resultados de datos geotécnicos sobre el Dique de la Sección B	47
5.3. Resultados de datos geotécnicos realizado en el terreno natural de la Sección B	48
5.4. Resultados de datos geotécnicos sobre la zona de inyección	48
5.5. Conductividad y sales disueltas (TDS) de las muestras 1 y 2 tomadas en el Lago de Maracaibo	49
5.6. Relación de pozos de monitoreos encontrados en la zona de inyección	49
6.1. Parámetros electromagnéticos, calculados por parámetros geotécnicos, sobre el dique de la sección A	61
6.2. Parámetros electromagnéticos, calculados por parámetros geotécnicos, sobre el dique de la sección B	62
6.3. Parámetros electromagnéticos, calculados por parámetros geotécnicos, sobre el terreno natural de la sección B	63
6.4. Parámetros electromagnéticos, calculados por parámetros geotécnicos, sobre la zona de inyección	64
E.1 Valores empíricos para γ_h , de suelos cohesivos basados en n (número de golpes)	132
E.2 Valores empíricos para γ_h , de suelos granulares basados en n (número de golpes)	132
I Descripción de los tendidos de GPR adquiridos	142
J.1 Impedancia, coeficientes de reflexión y transmisión sobre el tope de la Sección A	145
J.2 Impedancia, coeficientes de reflexión y transmisión sobre la Berma 1	

	de la Sección A	145
J.3.	Impedancia, coeficientes de reflexión y transmisión sobre el dique de la Sección B	145
J.4	Impedancia, coeficientes de reflexión y transmisión sobre el terreno natural de la Sección B	146

LISTA DE FIGURAS

Fig.		pp.
2.1.	Comportamiento de la conductividad de las arenas y arcillas	7
2.2.	Comportamiento de la permitividad real e imaginaria en el proceso de relajación, y en función de la frecuencia.	10
2.3	Situación de los campos eléctrico y magnético para la polarización (a) vertical y (b) horizontal	12
2.4.	Proceso que sigue una antena en la emisión de ondas electromagnéticas. a) primer ciclo de la onda emitida (b) segundo ciclo de la onda emitida y (c) ciclo completo de la onda emitida	13
2.5.	Proceso de reflexión y transmisión de una onda electromagnética plana incidente en una interfaz plana	18
3.1.	Esquema de funcionamiento del GPR.	21
3.2.	Percepción del subsuelo en diferentes distancias de mediciones	22
3.3.	Distribución de la energía emitida por las antenas y su dependencia con la permitividad del subsuelo	23
3.4.	Aplicación de control de ganancia automática AGC	25
3.5.	Análisis de CMP, forma de su adquisición y cálculo de sus tiempos de llegadas, según la velocidad del medio de propagación.	26
3.6.	Equipo utilizado para el ensayo de penetración estándar (SPT)	27
4.1	Flujograma de la secuencia del manejo de datos	30
4.2	Disposición de los datos de entrada de la traza sintética para su visualización, realizada por el programa realizado en Matlab	34
4.3	Disposición de los radargramas en la visualización	36
5.1.	Ubicación geográfica de la zona de estudio.	39
5.2.	Partes del Dique, donde se realizaron los tendidos adquiridos con el GPR	40
5.3.	Perfil litológico de la sección A, definido por intercalaciones de estratos de arcillas y limos . Mediante los SPT 3 y 4	41
5.4.	Perfil litológico de la sección B, definido principalmente de arcillas. Mediante los SPT 1 y 2	42
5.5.	Diseño litológico del terreno natural de la sección B, definido	

principalmente de limos y arcillas. Mediante el SPT 5	43
5.6. Diseño litológico del área de inyección, definido principalmente de limos y arcillas. Mediante el SPT 6,	44
5.7. Croquis de la adquisiciones de tipo reflexión y tipo CMP, ejecutadas con el radar de penetración de suelos	50
5.8. Disposición de los tendidos obtenidos en la etapa de adquisición para la Sección A.	51
5.9. Disposición de los tendidos obtenidos en la etapa de adquisición, para la Sección B. (a) realizado sobre el dique. (b) mallado realizado sobre terreno natural.	52
5.10. Imágenes de campo, de la sección B (a) sobre el terreno natural. (b)sobre las rocas (c)sobre talud aguas arriba	53
5.11. Disposición de los tendidos obtenidos en la etapa de adquisición, para la zona de inyección.	54
5.12. Conexión de los equipos que conforman el Radar de Penetración de Suelos.	55
5.13. Despliegue en pantalla del programa Ekko 42, en ambiente DOS, mostrando todos los parámetros necesarios en las adquisiciones del radar.	55
6.1. Comportamiento de la conductividad de las arenas y las arcillas saturadas con agua del Lago de Maracaibo.	57
6.2. Comportamiento de la atenuación y las funciones que rigen su valor con respecto a la frecuencia	60
6.3. Perfiles de radargramas. (a) sin ningún tipo de procesamiento (b) con filtro “Dewow” y Ganancia AGC	65
6.4.(a) Análisis de CMP de perfiles adquiridos sobre el tope de la Sección B, utilizando la antena de 50 Mhz.	67
6.4.(b) Análisis de CMP de perfiles adquiridos sobre el tope de la Sección B, utilizando la antena de 100 Mhz.	68
6.5.(a) Análisis de CMP de perfiles adquiridos sobre el tope de la Sección A, utilizando la antena de 50 Mhz.	69
6.5.(b) Análisis de CMP de perfiles adquiridos sobre el tope de la Sección A, utilizando la antena de 100 Mhz.	70
6.6.(a) Análisis de CMP de perfiles adquiridos sobre la berma 1 de la Sección B, utilizando las antenas de 50 Mhz.	72
6.6.(b) Análisis de CMP de perfiles adquiridos sobre la berma 1 de la	

Sección B, utilizando las antenas de 100 Mhz.	73
6.7.(a) Análisis de CMP de perfiles long., adquiridos sobre terreno natural de la Sección B, utilizando las antenas de 50 Mhz.	74
6.7.(b) Análisis de CMP de perfiles long., adquiridos sobre terreno natural de la Sección B, utilizando las antenas de 100 Mhz.	75
6.8.(a) Análisis de CMP de perfiles trans., adquiridos sobre el terreno natural de la Sección B, utilizando las antenas de 50 Mhz.	76
6.8.(b) Análisis de CMP de perfiles trans., adquiridos sobre el terreno natural de la Sección B, utilizando las antenas de 100 Mhz.	77
6.9. Análisis de CMP de perfil adquirido sobre las rocas	78
6.10. Análisis de CMP de perfil adquirido en la zona de inyección	79
6.11. Perfil de tipo reflexión adquirido sobre el talud aguas arriba de la Sección A, utilizando antena de 100 Mhz	82
6.12. Perfiles de tipo reflexión, adquiridos sobre rocas de la Sección A. utilizando las antenas de (a) 100 Mhz. (b) 50 Mhz.	83
6.13. . Perfiles de tipo reflexión, adquiridos sobre rocas de la Sección B. utilizando las antenas de (a) 50 Mhz. (b) 100 Mhz.	84
6.14. Perfiles de tipo reflexión, adquiridos sobre el talud aguas arriba de la Sección B, utilizando las antenas de (a)50 Mhz. (b) 100 Mhz	85
6.15.(a) Perfil de tipo reflexión adquirido sobre el tope de la Sección A y su traza sintética correspondiente, utilizando las antenas de 100 Mhz.	88
6.15.(b) Perfil de tipo reflexión adquirido sobre el tope de la Sección A y su traza sintética correspondiente, utilizando las antenas de 50 Mhz.	89
6.16.(a) Perfil de tipo reflexión adquirido longitudinal a la berma 1 de la Sección A, con antena de 50 Mhz y la traza sintética correspondiente.	90
6.16.(b) Perfil de tipo reflexión adquirido transversal a la berma 1 de la Sección A, con antena de 50 Mhz y la traza sintética correspondiente.	91
6.17.(a) Perfil de tipo reflexión adquirido sobre el tope de la Sección B y la traza sintética correspondiente, utilizando la antena de 100 Mhz.	92
6.17.(b) Perfil de tipo reflexión adquirido sobre el tope de la Sección B y la traza sintética correspondiente, utilizando la antena de 50 Mhz.	93
6.18. Perfil de tipo reflexión adquirido sobre la berma 1 de la Sección B y la traza sintética correspondiente, utilizando la antena de 100 Mhz.	94
6.19. Perfiles, de tipo reflexión, adquiridos sobre el terreno natural de la Sección B, longitudinales al Dique, con las antenas de (a) 100 Mhz. (b) 50 Mhz.	96

6.20.	Perfiles, de tipo reflexión, adquiridos sobre el Terreno natural de la Sección B, transversales al Dique, con las antenas de (a) 100 Mhz. (b) 50 Mhz.	97
6.21.	Imágenes 3D, de perfiles adquiridos sobre el Terreno natural de la Sección B, con la antena de 100 Mhz (a) Long. (b) Trans.	98
6.22.	Relación entre intersecciones de perfiles de tipo reflexión long. y trans. al dique, adquiridos sobre el terreno natural.	100
6.23.(a)	Perfil de tipo reflexión adquirido sobre el terreno natural de la Sección B, long. al dique y su traza sintética correspondiente, utilizando las antenas de 100 Mhz.	103
6.23.(b)	Perfil de tipo reflexión adquirido sobre el terreno natural de la Sección B, long. al dique y su traza sintética correspondiente, utilizando las antenas de 50 Mhz.	104
6.23.(c)	Perfil de tipo reflexión adquirido sobre el terreno natural de la Sección B, long. al dique y su traza sintética correspondiente, utilizando las antenas de 50 Mhz.	105
6.24.(a)	Perfil de tipo reflexión adquirido sobre el terreno natural de la Sección B, trans. al dique y su traza sintética correspondiente, utilizando las antenas de 100 Mhz.	106
6.24.(b)	Perfil de tipo reflexión adquirido sobre el terreno natural de la Sección B, trans. al dique y su traza sintética correspondiente, utilizando las antenas de 50 Mhz	107
6.25.	Tomografía post-inyección mostrando la zona del bulbo resaltada por sus velocidades acústicas.	108
6.26.	Perfiles, de tipo reflexión, adquiridos sobre de inyección de ripios, con las antenas de 100 Mhz, (a) longitudinales, (b) transversales	110
6.27.	Relación entre intersecciones de perfiles long. y trans. de tipo reflexión, adquiridos sobre la zona de inyección de ripios.	112
F.	Modelo Trifásico	134
H	Intervalo de muestreo en el tiempo	140

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

La necesidad de implantar metodologías de estudios geotécnicos que disminuyan el uso de técnicas destructivas, tal como son perforaciones, calicatas, etc., ha permitido considerar los métodos geofísicos dentro de las opciones para obtener este tipo información sin necesidad de afectar el medio de estudio. Estos métodos permiten una mayor cobertura de prospección reduciendo a su vez, el tiempo de aplicación y los costos operativos.

Entre los métodos geofísicos mayormente utilizados en estudios geotécnicos se encuentran la refracción sísmica somera, el análisis espectral de ondas superficiales y la tomografía sísmica. En las últimas dos décadas del siglo *XX*, la aplicación del radar de penetración de suelos GPR [de las siglas en inglés ***Ground Penetrating Radar***] ha ido tomando importancia y creciente aceptación como uno de los métodos geofísicos de estudios no destructivos. El GPR es un método similar a la sísmica de reflexión de *offset* constante, pero con la diferencia que emplea ondas electromagnéticas. Un ejemplo de esta aceptación fue la creación de un congreso monotemático denominado “*International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*” organizado por primera vez en 1986 en Georgia USA [Facultad de Ingeniería Civil y Geociencias (CITG), 2003].

Parte de los trabajos importantes que implican la herramienta del GPR, y que son de interés dentro del contexto desarrollado en el presente trabajo son: (i) en el área que involucran ensayos de laboratorios para determinar propiedades electromagnéticas y definir comportamiento de las ondas, se cuenta con trabajos como el de Suman *et al.* (1997) y Santamarina (2001). (ii) También se pueden mencionar trabajos basados en ensayos de campo apoyados por pruebas de laboratorios, como el realizado por Saarenketo (1996). (iii) En otro ámbito se encuentran los trabajos que exponen el funcionamiento de un GPR comercial determinado, acompañado de ejemplos de

aplicaciones, entre ellos Annan (2002). (iv) Por último, los trabajos de Carcione (1996) y (1998) y Cai y McMechan (1995), describen simulaciones y desarrollos de modelos matemáticos que explican los fenómenos que se producen durante la propagación de las ondas.

La combinación de la técnica de GPR con la información proveniente de perforaciones geotécnicas, ha generado excelentes resultados en las interpretaciones de los estudios geotécnicos. Bajo esta misma óptica, PDVSA-Intevep ha incluido en su metodología para las caracterizaciones geotécnicas de suelos, el uso del radar de penetración de suelos, ya que es uno de los métodos de más fácil y rápida utilización en campo, y resulta una valiosa herramienta para la ubicación de objetos enterrados, fallas geológicas, así como para el descarte de presencia de agua en el subsuelo.

De lo antes expuesto, ha surgido la idea de desarrollar el presente trabajo de investigación, cuyo objetivo es evaluar la aplicabilidad de la técnica de GPR para la caracterización geotécnica de los suelos más comunes de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo (COLM), y para la posible identificación de estructuras presentes en el interior del subsuelo, como son tuberías, socavaciones, infiltraciones, etc.

Para cumplir con el tema propuesto, fue necesario canalizar el proyecto a través de los objetivos específicos que se exponen a continuación:

- Participar en la organización de la logística de adquisición de los datos de GPR, así como en el trabajo de campo propiamente dicho.
- Evaluar las dificultades de la instrumentación en sitio, así como cualquier perturbación o ruido que pueda complicar la interpretación de los resultados.
- Desarrollar una estrategia de procesamiento para relacionar datos geotécnicos y del GPR.
- Aplicar programas de inversión desarrollados para la interpretación de las pruebas de campo.

- Interpretar las secciones procesadas y correlacionarlas con los parámetros obtenidos de los ensayos de penetración estándar SPT [de las siglas en inglés *Standard Penetration Test*].

Este estudio se ha distribuido en ocho capítulos. En el primero se presentan las justificaciones, objetivos, ubicación y antecedentes del trabajo realizado. El segundo capítulo abarca los conceptos teóricos más importantes referidos a campos electromagnéticos. En el tercer capítulo, se describen las técnicas que se utilizan o involucran en el trabajo de investigación, representadas esencialmente por el radar de penetración de suelos y el ensayo SPT. El cuarto capítulo, se plantea una estrategia sistemática para la caracterización geotécnica de suelos.. En el quinto capítulo, puntualiza y describe los datos de partida necesarios para dicha estrategia de procesamiento. En el sexto capítulo, se realizan los análisis de los resultados obtenidos y las correlaciones entre los radargramas y los datos geotécnicos. El séptimo capítulo, presenta las conclusiones y las recomendaciones del trabajo. Por último, el octavo capítulo corresponde a los apéndices, los cuales contienen toda información complementaria al trabajo de investigación.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describen brevemente los conceptos teóricos más importantes referidos a campos electromagnéticos, los cuales constituyen la base del funcionamiento del radar de penetración de suelos. Es posible clasificar este capítulo en tres partes: la primera explica las propiedades electromagnéticas de los suelos. La segunda parte define las ondas electromagnéticas y los fundamentos teóricos del electromagnetismo. Por último, se describe la propagación de dichas ondas en medios heterogéneos.

2.1 Propiedades electromagnéticas de los suelos: características y relaciones empíricas.

2.1.1 Permeabilidad magnética (μ)

La permeabilidad magnética refleja la presencia del movimiento de las cargas, (Santamarina, 2001). Este parámetro relaciona la inducción magnética (B) y la intensidad del campo magnético (H), definiendo una de las ecuaciones constitutivas del electromagnetismo, la cuales son explicadas más adelante. A su vez, es el producto de la permeabilidad en el vacío ($\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ H/m) y la permeabilidad relativa (μ_r) del medio:

$$B = \mu_r \mu_0 H = \mu H \quad (2.1)$$

La permeabilidad del medio y la permeabilidad relativa son variables complejas, donde su parte real representa la energía magnética almacenada en el material, y su componente imaginaria determina la cantidad de pérdidas magnéticas.

El comportamiento magnético de suelos y rocas depende principalmente de la cantidad de magnetita que posean (o minerales similares como ilmenita). La mayoría

de los suelos y rocas que se encuentran en el subsuelo no poseen este tipo de minerales, por lo que esta característica posee poco interés en la prospección con el radar. Por lo tanto los suelos se encuentran constituidos principalmente por materiales paramagnéticos y diamagnéticos, los cuales se caracterizan porque su permeabilidad compleja esta alrededor de la unidad, y su componente imaginaria tiende a cero.

2.1.2 Conductividad (σ)

La conductividad es la medida de la movilidad de las cargas libres ante la respuesta de un campo eléctrico externo (Santamarina, 2001). La misma es proporcional a la cantidad y tamaño de las cargas en el material. La unidad de medida de la conductividad es S/m.

El movimiento de las cargas provoca colisiones con otras cargas que no se encuentran en el mismo movimiento y transfiere al medio su energía en forma de calor. Por consiguiente, la corriente eléctrica es un mecanismo de disipación de energía, donde la energía extraída se transfiere irreversiblemente al medio donde se propaga (Annan, 2002).

El paso de corriente eléctrica en un medio se debe al movimiento de cargas (electrones o iones). De esta forma, se pueden distinguir dos tipos de conductividad: electrónica e iónica. La conductividad electrónica se produce en las rocas por el contenido de materiales ferromagnéticos en sus redes cristalinas. Con respecto a la conductividad iónica, se produce en el subsuelo por las disoluciones que rellenan los poros siendo la conductividad más común en los suelos.

En los fluidos, la conductividad aumenta con la concentración iónica hasta llegar a cierto punto donde existe un exceso de concentración, lo cual produce un decrecimiento en la movilidad de los iones por la disminución de espacio, causando una caída en la conductividad. En el caso de la temperatura, ocurre algo similar. La conductividad se incrementa con la temperatura debido a que se genera una mayor

movilidad de los iones, pero si existen temperaturas muy altas, se crea una agitación termal que puede causar el decrecimiento de la conductividad (Santamarina, 2001).

Por otro lado, la conductividad también se encuentra influenciada por la *superficie específica* (definida como la proporción entre área y masa) de los granos que componen el suelo (Apéndice A), ya que esta determina el espacio de conducción que facilita la fluidez de la corriente.

Las arenas tienen una superficie específica muy baja ($1-40 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{g}$) (Mitchell, 1993), por lo que su superficie de conducción es casi despreciable. Por el contrario, las arcillas poseen una superficie específica mayor, entre un rango de $20-400 \text{ m}^2/\text{g}$, lo cual permite una conducción superficial de los iones más favorable.

La transformación de esta disimilitud se observan en el comportamiento de su conductividad en diferentes tipos de agua. La Figura 2.1, muestra que el valor de la conductividad en las arenas y arcillas converge a medida que aumenta el contenido iónico del agua presente en sus poros. De esta manera, se muestra que existe un límite en donde el factor predominante en la conductividad de los suelos es el agua presente en los poros y no la superficie de conducción. Estas observaciones causan tratamientos diferentes en el cálculo de la conductividad en suelos arenosos y arcillosos, regidos por las fórmulas descritas en la Tabla 2.1.

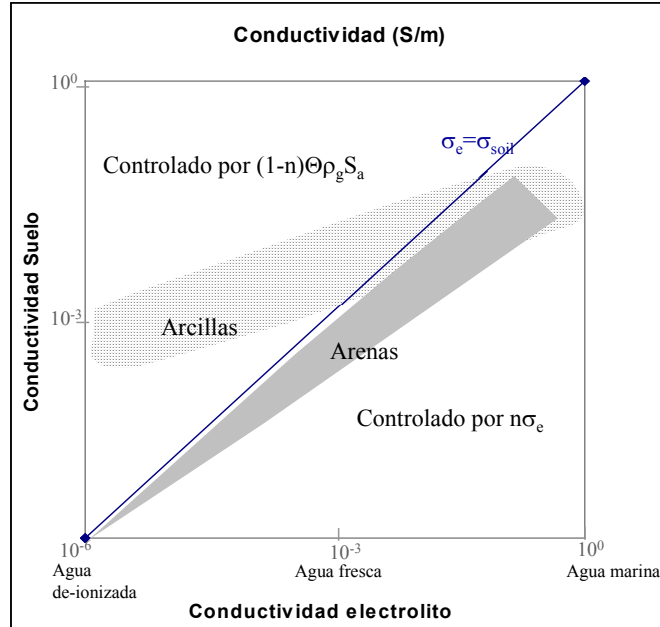


Figura 2.1. Comportamiento de la conductividad de las arenas y arcillas
Modificado de: Santamarina y Klein (2001)

Tabla 2.1. Fórmulas que definen la conductividad de los suelos.
Tomado de: Santamarina (2001).

Medio	Fórmulas	Comentarios
Agua + iones	$\sigma_e = 0,15 \text{ TDS} \quad (2.2)$	TDS: total de iones disueltos (mg/l), (Annan, 1992)
Suelos	$\sigma_{\text{suelo}} = n\sigma_e + (1-n)T \quad (2.3)$ $T = \rho_g S_a$	n: porosidad, T: Superf. Conducción, ρ_g : densidad carga, S_a : Superf. Específica; (O'Konski, 1960)
	$\sigma_{\text{suelo}} = a \sigma_e S_r^c n^m \quad (2.4)$	$a \approx 1$, $m \sim 1-2.4$, $c \sim 4-5$ (para arenas) (Archie, 1942)

2.1.3 Permitividad (ϵ^*)

La permitividad absoluta de un medio se define como un valor de proporcionalidad entre el desplazamiento eléctrico producido por un campo eléctrico inducido, (Santamarina, 2001).

Dicha permitividad absoluta (ϵ^*) es el producto de una constante adimensional del medio, llamada permitividad relativa (ϵ_r), por otra denominada permitividad en el vacío ($\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m) (ecuación 2.5).

$$\epsilon^* = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (2.5)$$

Tanto la permitividad absoluta como la relativa son valores complejos, donde su parte real (ϵ') determina la capacidad que tiene el material de polarizarse con la presencia de un campo eléctrico, y la parte imaginaria (ϵ'') indica el factor de pérdidas dieléctricas (ecuación 2.6).

$$\epsilon^* = \epsilon' + i\epsilon'' \quad (2.6)$$

Además de las pérdidas dieléctricas, también existen otras pérdidas de energía generadas por la conducción (Turner y Siggins, 1994). La sumatoria de ambas pérdidas se denominan permitividad efectiva (ϵ_{eff}) y se encuentra expresada mediante la siguiente relación:

$$\epsilon''_{eff} = \epsilon'' + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \quad (2.7)$$

Siendo ω la frecuencia angular.

Analizando la ecuación 2.7 se observa que a grandes valores de frecuencias, como son las utilizadas por el radar, la influencia de la conductividad en las respuestas de pérdida de energía se hace cada vez más pequeña, por lo tanto el factor de polarización domina en los factores de conductividad para altas frecuencias.

El cálculo de la permitividad real o polarización, en el orden de los megahertz, se puede obtener de una relación empírica propuesta por Topp et al (1980):

$$\epsilon' = 3,03 + 9,3\theta + 146\theta^2 - 76,7\theta^3 \quad (2.8)$$

Siendo humedad volumétrica del agua: $\theta = n.S$, donde n: porosidad y S: Saturación. Estas permitividades calculadas son relativas, por lo tanto son adimensionales.

En la variación de la permitividad con respecto a la frecuencia se pueden observar fenómenos de relajación o resonancia. Cuando existen fuerzas restitutivas en un sistema, el campo electromagnético lo polariza y luego el sistema tiende a regresar a su posición inicial. Esta tendencia genera fenómenos de resonancia, como es el caso de la molécula de hidrógeno. En cambio, los fenómenos de relajación se caracterizan por la inexistencia de fuerzas restitutivas que tiendan al sistema regresar a su posición inicial. Una muestra de esto es la polarización del agua.

La permitividad de los suelos depende, al igual que la conductividad, principalmente de la fracción de volumen de agua libre. La Figura 2.2 muestra el comportamiento de polarización del agua (permitividad real e imaginaria) en función de la frecuencia. En el caso de las frecuencias utilizadas por el radar (Mhz-Ghz) el comportamiento de la permitividad es un espectro cercano al fenómeno de relajación, determinado con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' + i\varepsilon'' = \varepsilon'_\infty + \frac{(\varepsilon'_0 - \varepsilon'_\infty)}{\left(1 + \frac{i\omega}{\omega_{rel}}\right)} - \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad (2.9)$$

Donde ω_{rel} es la frecuencia de relajación, ε'_0 y ε'_∞ son los valores de la permitividad real a frecuencias muy bajas y muy altas respectivamente.

Al aumentar la frecuencia en el sistema, la permitividad real comienza a decrecer debido a que las cargas no tienen suficiente tiempo de llegar a su máxima polarización. Por otro lado, las cargas a frecuencias específicas (ω_{rel}) tienen excitaciones mayores que comienzan a contribuir en la conductividad, aumentando el valor de la permitividad efectiva. Además crea pérdida de energía porque se disipa en

forma de calor, la cual recibe el nombre de dispersión temporal (Cabrera y López, 1993).

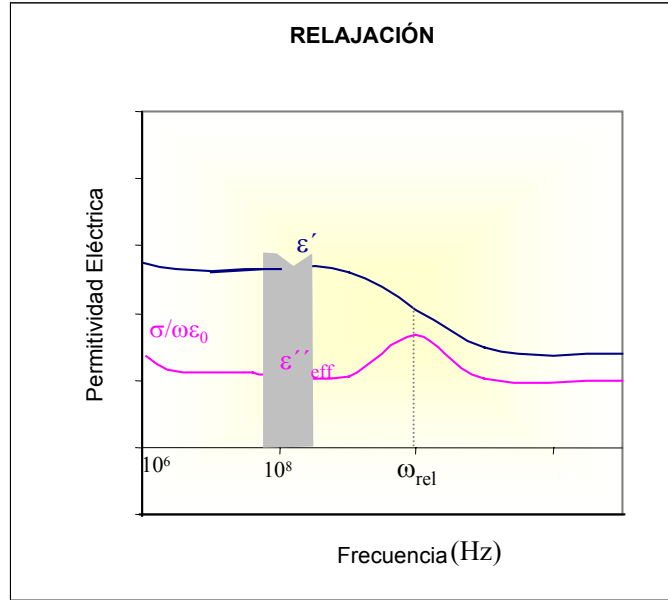


Figura 2.2. Comportamiento de la permitividad real e imaginaria en el proceso de relajación, y en función de la frecuencia.

La relación entre la permitividad efectiva y el componente real de la permitividad determina la cantidad de pérdida de energía de los materiales. Este parámetro se denomina tangente de pérdida ($\tan \delta$) y es expresado de la siguiente manera:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_{eff}}{\epsilon'} \quad (2.10)$$

Los materiales que tienen altas pérdidas de energía son aquellos donde la tangente de pérdida es mucho mayor que la unidad, mientras que los materiales de baja pérdida son aquellos que tienen valores menores que uno (Santamarina, 2001).

La Tabla 2.2 muestra el rango de valores que pueden tomar la conductividad y la permitividad en suelos saturados y secos.

Tabla 2.2. Parámetros electromagnéticos de las rocas y suelos.
Tomada de: http://ttt.topo.upv.es/~juagarcu/pdf/1-4_Generalidades%20G.P.R..pdf

Materia	ϵ	σ (S/m)
Agua dulce	81	10^{-3}
Agua salada	81	4
Aire	1	0
Arcillas saturadas	8-12	10^{-1} -1
Arenas saturadas	20-30	10^{-3} - 10^{-2}
Arenisca húmeda	8	10^{-2}
Arenisca seca	6	10^{-8} - 10^{-7}
Limos saturados	10	10^{-2} - 10^{-1}
Suelo arcilloso seco	2-3	10^{-4} - 10^{-3}
Suelo arenoso seco	2-3	10^{-4} - 10^{-3}
Suelo limoso seco	2-3	10^{-4} - 10^{-3}

2.2 Ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas están formadas por la asociación de dos tipos de ondas: unas de tipo eléctrico y otras de tipo magnético. Ambas provienen de los campos eléctrico y magnético dispuestos perpendicularmente entre sí y a la dirección de propagación.

Las ondas electromagnéticas por su propia naturaleza, se propagan a través del aire e incluso del vacío; ya que los propios impulsos de las ondas, "paquetes de ondas", se empujan unos a otros para recorrer los diferentes medios.

Lo que diferencia las ondas electromagnéticas de otros tipos de ondas es precisamente su frecuencia o su longitud, ya que la velocidad de propagación es la misma en el vacío: 300.000.000 m/s, correspondiéndose con la velocidad de la luz.

2.2.1 Producción de una onda electromagnética

Una carga, sea positiva o negativa, crea alrededor un campo eléctrico que se dirige hacia ella o sale de la misma según su signo. Esta carga tiene una zona de influencia que será tanto mayor cuanto más elevado sea su valor.

Supongamos que dicha carga se desplaza siguiendo una determinada dirección, su desplazamiento crea un campo magnético en sus proximidades. Este campo magnético es uniforme e igual en todos los puntos equidistantes cuando la corriente se mantiene constante; sin embargo, cuando el desplazamiento de la carga no es uniforme sino que varía con el tiempo, también varía el campo magnético.

La onda electromagnética representada en la Figura 2.3(a) se dice que es de polarización vertical, puesto que es la disposición adoptada por el campo eléctrico. En caso de estar invertidos los campos eléctrico y magnético, se dice que la polarización de la onda es horizontal [Figura 2.3 (b)]. El factor polarización puede mantenerse o variar de forma continua, lo que supone mantener siempre en el mismo plano o en planos cambiantes los campos eléctrico y magnético.

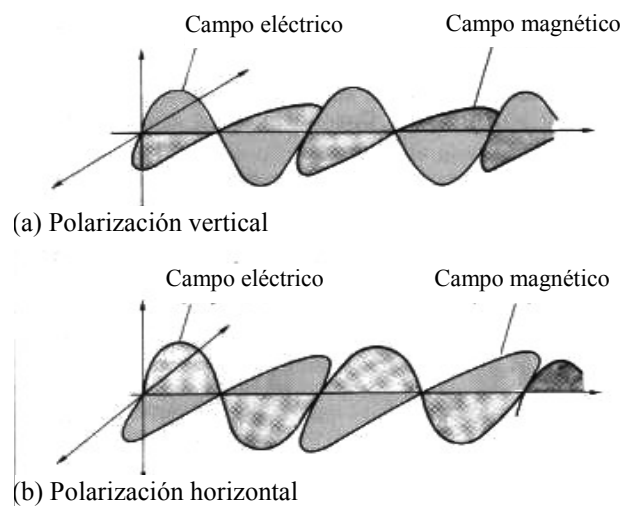


Figura 2.3. Situación de los campos eléctrico y magnético para la polarización (a) vertical y (b) horizontal. Figura tomada de:

<http://espanolgeocities.com/elradioaficionado/antenas/propagacion02.htm>.

2.2.2 Proceso de emisión de las ondas electromagnéticas

Una antena elemental para la propagación de las ondas electromagnéticas no es más que un conductor, con un extremo conectado a tierra, que permite liberar en forma de ondas electromagnéticas una oscilación eléctrica (Figura 2.4). Mediante un generador de corriente alterna (corriente variable con el tiempo) a una frecuencia mayor que 100.000 veces por segundo, la antena es recorrida durante un semiciclo por una corriente en sentido ascendente y en sentido descendente durante el otro semiciclo. Este movimiento que se repite a una frecuencia de varios cientos o miles de hercios hace vibrar la antena, dando lugar a la emisión de ondas.

El conjunto de dos cambios continuos de polaridad da lugar a una vibración completa, lo que se representa en la Figura 2.4(c). Esta longitud de onda depende, naturalmente, de la frecuencia de oscilación del generador, cuanto mayor sea la frecuencia, menor será la longitud de onda. Por el contrario, la longitud de onda aumenta cuando la frecuencia es menor.

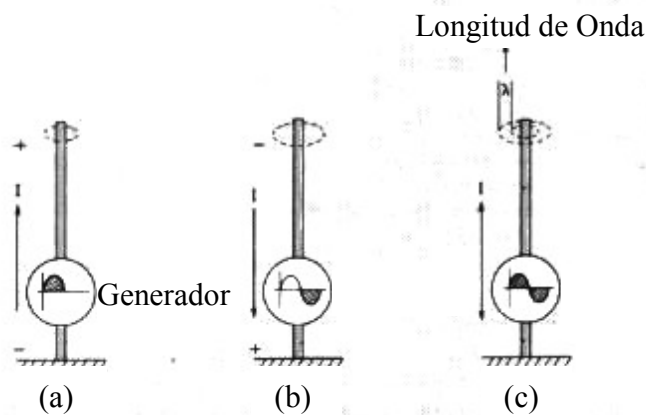


Figura 2.4. Proceso que sigue una antena en la emisión de ondas electromagnéticas. (a) primer ciclo de la onda emitida (b) segundo ciclo de la onda emitida y (c) ciclo completo de la onda emitida. Figura tomada de:

<http://espanolgeoties.com/elradioaficionado/antenas/propagacion02.htm>

2.3 Fundamentos teóricos del electromagnetismo

2.3.1 Leyes de Maxwell

En esta sección se presentan cuatro ecuaciones que pueden considerarse la base de la teoría electromagnética, las cuales, se conocen como ecuaciones de Maxwell. Estas relaciones fijan el origen para la explicación de los fenómenos electromagnéticos, relacionando el campo magnético y eléctrico con sus fuentes, numéricamente expresados de la siguiente forma (Carcione, 1996):

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{Ley de Faraday}) \quad (2.11)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{Ley de Ampere}) \quad (2.12)$$

$$\nabla \cdot D = q \quad (\text{Ley de Gauss}) \quad (2.13)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (\text{Ley de Gauss del magnetismo}) \quad (2.14)$$

Siendo, E = vector intensidad del campo eléctrico (V/m), D = vector densidad del flujo eléctrico (C/m²), J = vector densidad de corriente (A/m²), H = vector intensidad del campo magnético (A/m), B = vector densidad del flujo magnético (Wb/m²), q = densidad de carga eléctrica (C/m³).

Con estas ecuaciones, se relacionan las variaciones en el tiempo y magnitudes de los campos electromagnéticos en un punto cualquiera del espacio definiendo la ecuación de onda (Apéndice B).

Cuando se consideran distribuciones superficiales de carga, es decir, donde existen discontinuidades en el subsuelo, las relaciones descritas por Maxwell se complementan con otras denominadas ecuaciones constitutivas (Annan, 2002), las cuales incluyen los parámetros que caracterizan los medios:

$$J = \sigma.E \quad (2.15)$$

$$D = \varepsilon.E \quad (2.16)$$

$$B = \mu.H \quad (2.17)$$

2.3.2 Parámetros de propagación

Considerando las ondas electromagnéticas como ondas planas, tal como se describe en el Apéndice B, donde una variación sinusoidal es solución, en espacio y tiempo. Considerando una propagación en dirección x , y con el campo eléctrico polarizado en dirección y , la ecuación sinusoidal queda de la siguiente manera:

$$E_y = E_0 e^{j\omega t - \gamma^* x} \quad (2.18)$$

Esta ecuación define la propagación de la onda con el tiempo t y, por otro lado, define el decaimiento de la amplitud E_y con la distancia recorrida x controlado por la constante de propagación γ^* , siendo E_0 la amplitud inicial.

2.3.3 Constante de propagación (γ^*)

La constante de propagación se puede expresar en función de las propiedades electromagnéticas sustituyendo la variación sinusoidal en la ecuación de onda plana para ondas electromagnéticas (Apéndices B y C).

$$\gamma^* = \sqrt{j\mu\sigma\omega - \mu\varepsilon\omega^2} \quad (2.19)$$

Donde j es $\sqrt{-1}$.

Para materiales no ferromagnéticos, la constante de propagación queda de la siguiente manera:

$$\gamma^* = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{j \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} - \varepsilon'' \right) + \varepsilon'} = \frac{\omega \sqrt{\varepsilon'}}{c_0} \sqrt{j \tan(\delta) + 1} \quad (2.20)$$

Siendo c_0 la velocidad de la luz.

Claramente se observa que la constante de propagación es un número complejo, el cual se escribe como $\gamma^* = \alpha + j\beta$. La parte real α representa la atenuación del campo eléctrico y la parte imaginaria β puede considerarse como el número de onda λ como $\beta = 2\pi/\lambda$, y es un factor importante para el cálculo de la velocidad de fase.

2.3.4 Velocidad de fase (V_f)

La velocidad de fase es igual a la relación de la frecuencia angular y el número de onda o la parte imaginaria de la constante de propagación, quedando de la siguiente manera (Santamarina, 2001):

$$V_f = \frac{\omega}{\beta} = \frac{\omega}{\text{Im}(\gamma^*)} = \frac{c_0}{\sqrt{\frac{1}{2} \left(\epsilon' + \sqrt{\epsilon'^2 + \frac{\sigma^2}{\epsilon_0^2 \omega^2}} \right)}} \quad (2.21)$$

2.3.5 Atenuación y profundidad de piel

El coeficiente de atenuación α se expresa matemáticamente como la parte real de la constante de propagación, sus unidades son m^{-1} (Santamarina, 2001):

$$\alpha = \frac{\omega \sqrt{\epsilon'}}{c_0} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{1 + \tan^2(\delta)} - 1} \quad (2.22)$$

El coeficiente de atenuación caracteriza el grado de disminución de la amplitud de una onda electromagnética cuando pasa por un medio específico. Por lo tanto, define las relaciones entre amplitudes en dos puntos separados a una distancia z , quedando dicha relación de la siguiente manera:

$$\frac{E_0}{E(z)} = e^{\alpha z} \quad (2.23)$$

Por medio de esta relación, se puede obtener el grado de atenuación en decibeles tomando el logaritmo en base 10.

$$20\log\left(\frac{E_0}{E(z)}\right) = 20\log(e)\alpha z \quad (2.24)$$

Despejando α :

$$\alpha = \frac{\log\left(\frac{E_0}{E(z)}\right)}{z \log e} \quad (2.25)$$

La profundidad a la cual la fuerza del campo eléctrico de una onda plana decae 1/e, se llama profundidad de piel (d). Relacionando esta definición con las ecuaciones anteriores nos queda que la profundidad de piel es:

$$d = \frac{1}{\alpha} \quad (2.26)$$

Existen valores empíricos de la velocidad y atenuación de medios característicos para los estudios del subsuelo, los cuales se encuentran descritos en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Velocidades y Atenuación de las ondas electromagnéticas en medios característicos. Modificado de *Sensors & Software Inc*, (2001).

Material	Velocidad (m/ns)	Atenuación (dB/m)
Aire	0.3	0
Suelo seco	0.15	
Arena seca	0.15	0.01
Granito	0.13	0.01-1
Roca seca	0.12	
Caliza	0.12	0.4-1
Roca Saturada	0.1	
Concreto	0.08-0.12	
Lutita	0.09	1-100
Suelo saturado	0.06	
Arena Saturada	0.06	0.03-0.3
Arcillas	0.06	1-300
Agua Dulce	0.033	0.1
Agua de Mar	0.033	1000

2.4 Propagación de las ondas electromagnéticas en medios heterogéneos

Cuando la propagación de las ondas electromagnéticas alcanza una discontinuidad de dos medios que poseen propiedades electromagnéticas distintas, se produce el mismo fenómeno de las ondas elásticas: reflexión y transmisión. Basado en la Ley de Snell, la Figura 2.5 representa el proceso de reflexión y transmisión de una onda electromagnética plana incidente en una interfaz también plana.

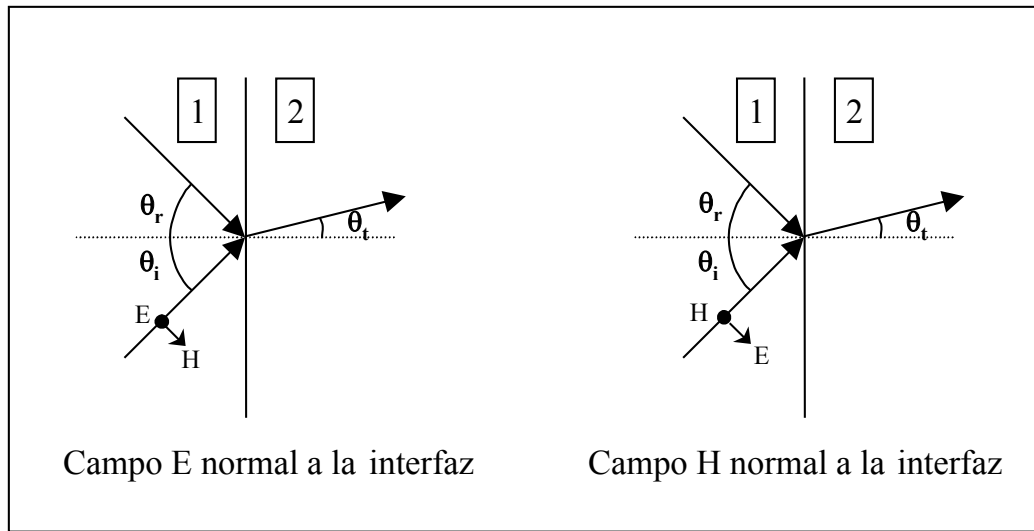


Figura 2.5. Proceso de reflexión y transmisión de una onda electromagnética plana incidente en una interfaz plana.

2.4.1 Impedancia electromagnética (z^*)

La impedancia z^* es una relación de causa y efecto, en este caso, entre la variación en el tiempo del campo eléctrico y el campo magnético, determinada por la Ley de Faraday. Por esto, dicho factor controla la amplitud de la onda reflejada y transmitida.

$$z^* = \frac{E_y}{H_z} = j \left(\frac{\omega}{\gamma^*} \right) \mu^* \quad (2.27)$$

Definiendo las impedancias para medios no ferromagnéticos, donde $\mu^* = \mu_0$, como: (Santamarina, 2001).

$$z^* = \frac{c_0}{\sqrt{j \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} - \epsilon'' + \epsilon'}} \mu_0 \quad (2.28)$$

2.4.2 Coeficientes de reflexión y transmisión

A partir de las relaciones de las impedancias de los medios y las condiciones de bordes determinadas por las ecuaciones de Maxwell (Apéndice D), se pueden calcular los coeficientes de reflexión (R) y transmisión (T) de las ondas electromagnéticas.

Tomando en cuenta que las adquisiciones del radar tienen la particularidad que las distancias entre antenas son pequeñas, por lo que se puede considerar que la onda incide con un ángulo normal a la interfaz, las ecuaciones de los coeficientes quedan simplificadas de la siguiente manera:

$$R_{12}^* = \frac{1 - \frac{z_1^*}{z_2^*}}{1 + \frac{z_1^*}{z_2^*}} \quad (\text{Coeficiente de Reflexión}) \quad (2.29)$$

$$T_{12}^* = \frac{2}{1 + \frac{z_1^*}{z_2^*}} \quad (\text{Coeficiente de Transmisión}). \quad (2.30)$$

Correspondiendo los números 1 y 2 a los medios que conforman la interfaz. Observando las ecuaciones 2.30 y 2.31, se puede deducir que: $T^* = 1 + R^*$. Además, mientras mayor sea el contraste entre los dos medios, mayor será el coeficiente de reflexión y menor será la de energía transmitida.

CAPITULO III

TÉCNICAS APLICADAS

El presente capítulo describe las técnicas que se utilizan en este trabajo de investigación, representadas esencialmente por el radar de penetración de suelos y el ensayo geotécnico SPT. Asimismo, en el método del georadar se explican las estrategias de procesamiento que se aplican a las imágenes resultantes de la adquisición (radargramas). Además, se define el parámetro geotécnico conocido como peso unitario, el cual es relevante dentro de la metodología del estudio realizado.

3.1 Técnica Geofísica: Radar de Penetración de Suelos (GPR)

Es un método similar a la sísmica de reflexión a *offset* constante y análisis de CMP en lo que respecta a la adquisición. Sin embargo, el método sísmico utiliza ondas mecánicas mientras el radar utiliza ondas electromagnéticas de altas frecuencias. Un breve pulso de energía electromagnética es irradiado por un transmisor, con una frecuencia característica única que puede estar entre 16 y 2.000 Mhz. Cuando este pulso alcanza interfaces donde existen diferencias entre sus parámetros electromagnéticos (Davis y Annan, 1989), ocurren fenómenos análogos a los que se dan en sísmica cuando cambia la impedancia acústica (Figura 3.1). Este aspecto se trató en el capítulo anterior en el punto 2.4 relacionado con la propagación de las ondas electromagnéticas en medios heterogéneos.

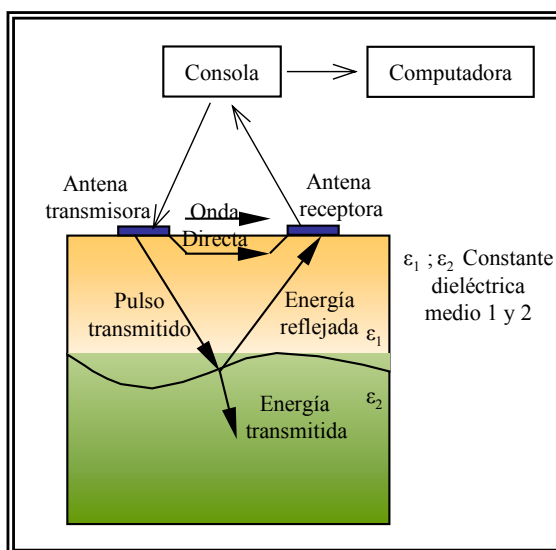


Figura 3.1. Esquema de funcionamiento del GPR

3.1.1 Profundidad de investigación

Existen dos tipos de factores que influyen la profundidad de investigación de un sistema de GPR. Uno está determinado por los parámetros electromagnéticos del medio, ya explicados, y el otro está determinado por la instrumentación.

En relación con la instrumentación, y los parámetros de adquisición usados por el usuario, la profundidad de investigación crece si la frecuencia de la antena decrece, a una potencia transmitida fija. Al aumentar la frecuencia, el ancho del pulso se reduce y aumenta la resolución, pero disminuye el envío de energía al subsuelo, trayendo como consecuencia el incremento en la atenuación geométrica.

3.1.2 Distancia entre medidas

La distancia entre las mediciones es de suma importancia ya que ella controla la resolución lateral del estudio. Como se muestra en la Figura 3.2, cuando la distancia entre las medidas es menor, la posibilidad de detectar un objeto es mayor. Idealmente, se desearía poder tomar medidas lo más próximas posibles pero esto no es viable en muchos casos, ya que tomaría demasiado tiempo realizar un sólo perfil.

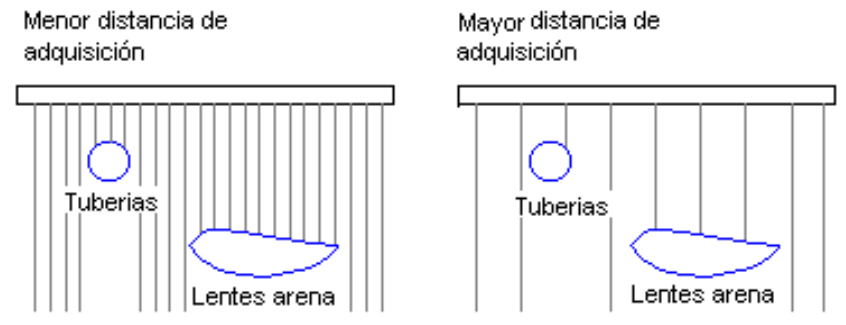


Figura 3.2. Percepción del subsuelo en diferentes distancias de mediciones.
Figura modificada de www.trxconsulting.com/m_gpr_carpeta.htm.

3.1.3 Direccionalidad de las antenas

Cuando el dipolo de la antena se encuentra en un medio uniforme, el campo eléctrico se despliega con la misma energía en todas las direcciones en el plano perpendicular de las abscisas donde se encuentra el dipolo, formando una especie de *toro* (Figura 3.3).

En el caso de las adquisiciones que se realizan sobre el subsuelo, el patrón de irradiación se transforma, asociado al cambio de impedancia entre la interfaz aire-suelo. En la Figura 3.3 se muestra la distribución de la energía de las antenas entre ambos medios, donde se observa que mientras mayor sea la relación de impedancias mayor energía se dirigirá al subsuelo.

Otra consideración importante es el efecto que puede causar la elevación de las antenas con respecto a la superficie de adquisición, ya que existen situaciones en las que no es posible mantener un contacto directo de la antena con la superficie. Dicha elevación afecta la direccionalidad de las antenas, mientras mayor sea la relación de distancia entre la antena y la superficie, mayor será la energía que se disipe en el aire y no en el subsuelo.

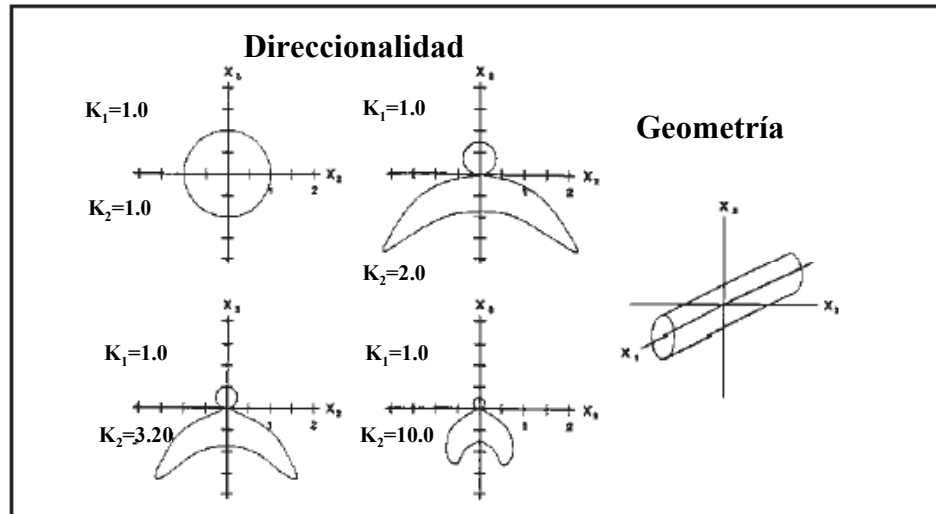


Figura 3.3. Distribución de la energía emitida por las antenas y su dependencia con la permitividad del subsuelo. Figura tomada de *Sensors & Software* (2001)

3.1.4 Procesamiento en Radargramas

Muchos factores limitan el desempeño del GPR, como por ejemplo, la atenuación de las ondas irradiadas, ruidos externos e instrumentales, etc. Por esto, antes de interpretar cualquier tipo de datos de GPR es necesario realizar un procesamiento básico de los datos, con el objeto de mejorar la imagen, aumentar la resolución y la relación señal-ruido.

Los ruidos y las interferencias encontradas en los perfiles de GPR se deben a una variedad de fuentes en las que se incluyen, objetos en la superficie del terreno, sobre los cuales la antena tiene que pasar, cables aéreos de alta tensión, postes de luz, etc. Es por ello que se definen las herramientas de procesamiento básicas utilizadas, con el fin de examinar sus efectos en las trazas que puedan ayudar a establecer adecuados criterios en la interpretación.

Dado que los datos obtenidos con el GPR son similares a los obtenidos con la sismica de reflexión, muchas de las técnicas usadas en el procesamiento de datos sísmicos

pueden usarse para procesar datos de GPR. Los radargramas obtenidos en el presente trabajo, se procesaron mediante las siguientes técnicas de procesamiento:

3.1.4.1 Control de Ganancia Automática

Este método de procesamiento también se denomina AGC (de las siglas en inglés, Automatic Gain Control). Las señales de las ondas electromagnéticas se hacen débiles con el incremento de la profundidad debido al factor de atenuación. Para solventar esto, normalmente se aplican algunas funciones llamadas ganancias. Los únicos radargramas que no necesitan ganancia son en áreas donde la atenuación es poca o el objetivo se encuentra superficialmente.

El control de ganancia automática intenta igualar toda la señal, aplicando un factor multiplicador inversamente proporcional a las señales fuertes (Figura 3.4). Este tipo de ganancia es la más usada para definir continuidad en los reflectores. Se debe destacar que el AGC no conserva información relativa de las amplitudes.

Esta ganancia es la más recomendada por los fabricantes del radar “*Pulse Ekko 100*” de “*Sensors and Software*”, tanto en los programas de adquisición como en los de procesamiento. Los parámetros que se deben introducir en el programa son la sección del radargrama donde se desea aplicar la herramienta y el máximo valor de ganancia.

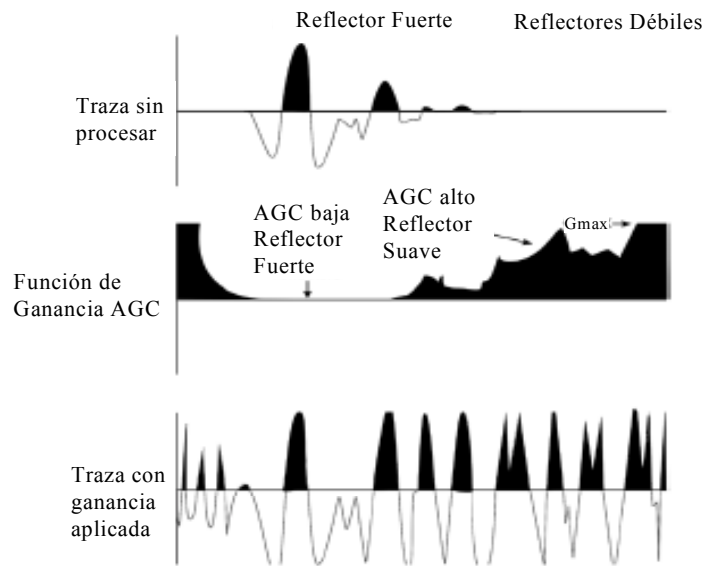


Figura 3.4. Aplicación de control de ganancia automática AGC. La función ganancia es inversamente proporcional a la traza sin procesamiento. Figura tomada de *Sensors & Software* (2001)

3.1.4.2 Filtro Temporal “Dewow”

Los filtros temporales actúan sobre los radargramas en la dirección del tiempo. Estos alteran la forma de las trazas a través de artificios matemáticos diseñados para destacar o eliminar ciertos comportamientos. Dependiendo de la proximidad del transmisor - receptor y las propiedades eléctricas del suelo, la señal transmitida puede inducir lentos decaimientos de las bajas frecuencias “wow”, las cuales se superponen en las reflexiones de altas frecuencias. El filtro temporal “Dewow” remueve estas señales no deseadas y preserva las señales de altas frecuencias, corrigiendo de esta manera las señales saturadas.

El filtro temporal “Dewow” debe aplicarse antes de cualquier herramienta de procesamiento. El fabricante del radar “Pulse Ekko 100” recomienda emplearlo *siempre*, antes de cualquier rutina de procesamiento (*Sensors & Software*, 2001). Las bajas frecuencia “wow” se remueven aplicando un filtro promedio en cada traza. Este valor promedio se toma de los datos adquiridos con el intervalo de muestreo temporal.

3.1.4.3 Análisis del CMP

El mismo principio aplicado en el análisis de CMP (de las siglas en inglés, Common Mid Point) para estudios de sísmica de reflexión, también se aplica en el radar de subsuelo. Este método se usa para calcular las velocidades de objetivos específicos.

La Figura 3.5 muestra la dependencia de la separación entre antenas y el tiempo de llegada de la señal. Con esta relación, es posible calcular el valor de la velocidad del medio.

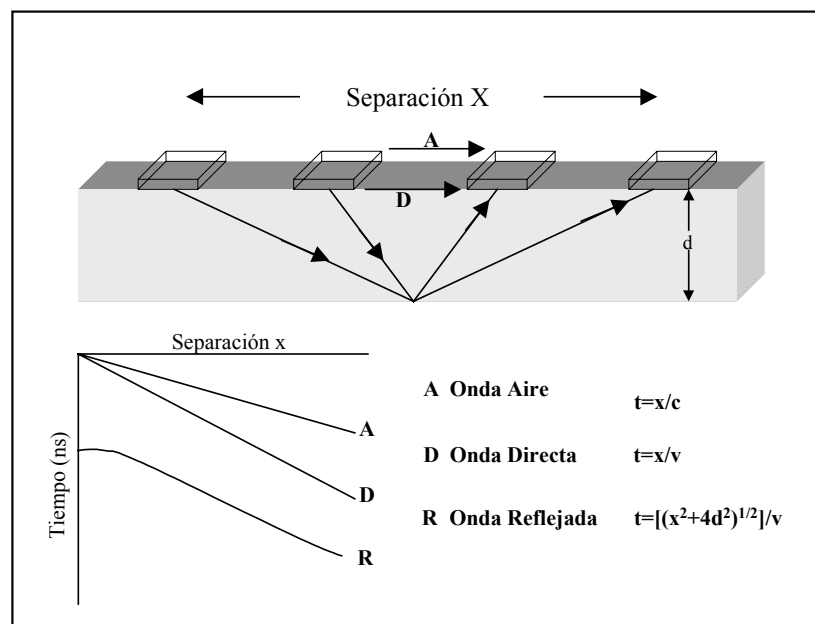


Figura 3.5. Análisis de CMP, forma de su adquisición y cálculo de sus tiempos de llegadas, según la velocidad del medio de propagación.

3.2 Técnica Geotécnica: Ensayo de Penetración Estándar (SPT)

Básicamente, el SPT es un ensayo geotécnico el cual determina la resistencia que ofrece el suelo a la penetración de un muestreador de acero. A través de este ensayo es posible recuperar muestras alteradas, las cuales nos ayudan a determinar las características del terreno, especificando si son suelos granulares o cohesivos y el porcentaje de humedad.

El ensayo de SPT consiste en dejar caer por gravedad un martillo de cierto peso (63,5 Kg), sobre una cabeza de hincia ubicada en el terreno. La distancia de descenso del

martillo hasta sitio de impacto debe ser constante (76 cm) (De Marco, 2002). El número de golpes que se registran para penetrar 45 cm de profundidad es lo que se denomina N_{spt} (Figura 3.6). Este valor es indicativo de la resistencia del suelo, a mayor valor de N_{spt} , mayor es la resistencia del suelo.

El sacamuestras, denominado “cuchara partida”, posee una cantidad de agujeros que expulsan agua y aire que puedan penetrar en el sistema de recuperación de muestras. Además, tiene una válvula que funciona como sello para obtener una muestra.

En los laboratorios se realizan una serie de ensayos geotécnicos a las muestras extraídas para el cálculo de porcentaje de humedad, índices de plasticidad, granulometría, etc.

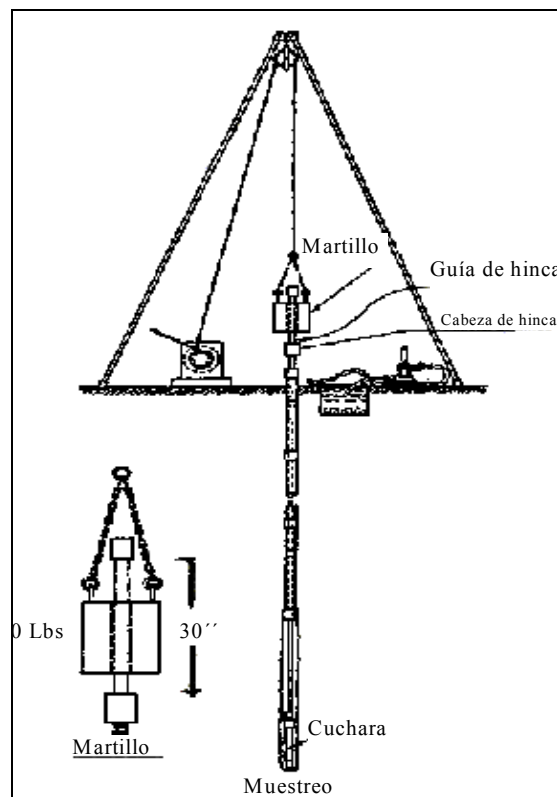


Figura 3.6. Equipo utilizado para el ensayo de penetración estándar (SPT). (Apuntes de clase de Mecánica de Rocas 2004)

3.3 Relaciones volumétricas y gravimétrica de los suelos

El suelo se puede definir como una mezcla de tres fases, sólido, agua y aire. En mecánica de suelos, se relacionan el peso de las distintas fases con sus volúmenes correspondientes, por medio del concepto de peso unitario, es decir entre la relación del peso de la sustancia (W) y su volumen (V) (Badilio y Rico, 1972).

Se distinguen tres pesos unitarios del modelo trifásico descrito, los cuales son: γ_w , peso unitario del agua, γ_m , peso unitario de la muestra completa de suelo y γ_s peso unitario de la fase sólida del suelo. Entonces, por definición se tiene que:

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad (3.1)$$

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} = \frac{W_s + W_w}{V_m} \quad (3.2)$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (3.3)$$

Donde, W_m y V_m son el peso y el volumen de la muestra completa respectivamente, W_s y V_s son el peso y el volumen de la fase sólida y W_w y V_w son el peso y el volumen del agua.

La gravedad específica (Gs) es el cociente entre el peso específico de la fase sólida y el peso específico del agua.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \quad (3.4)$$

Es conveniente distinguir que la gravedad específica es un parámetro adimensional.

CAPITULO IV

METODOLOGÍA

La propuesta metodológica planteada pretende proyectar una nueva estrategia sistemática para la caracterización geotécnica de suelos. Esta estrategia se asocia en tres fases (Figura 4.1):

La primera, es la determinación matemática de los parámetros electromagnéticos del subsuelo, utilizando información geotécnica convencional. Estos parámetros esclarecen la factibilidad de éxito del estudio del radar, y en conjunto con los perfiles propuestos, permiten la construcción de trazas sintéticas, las cuales ayudan a las interpretaciones de los radargramas.

La segunda fase implica el procesamiento aplicado a los radargramas, con el objeto de mejorar las imágenes y por otro lado, el análisis de las imágenes de CMP, de manera de determinar las velocidades representativas del medio, y correlacionarlas a su vez, con las velocidades calculadas en la primera fase de esta estrategia.

Por ultimo, la tercera fase corresponde a la visualización de las imágenes resultantes, con la cual se busca optimizar la correlación entre radargramas, y entre las trazas sintéticas con sus radargramas correspondientes.

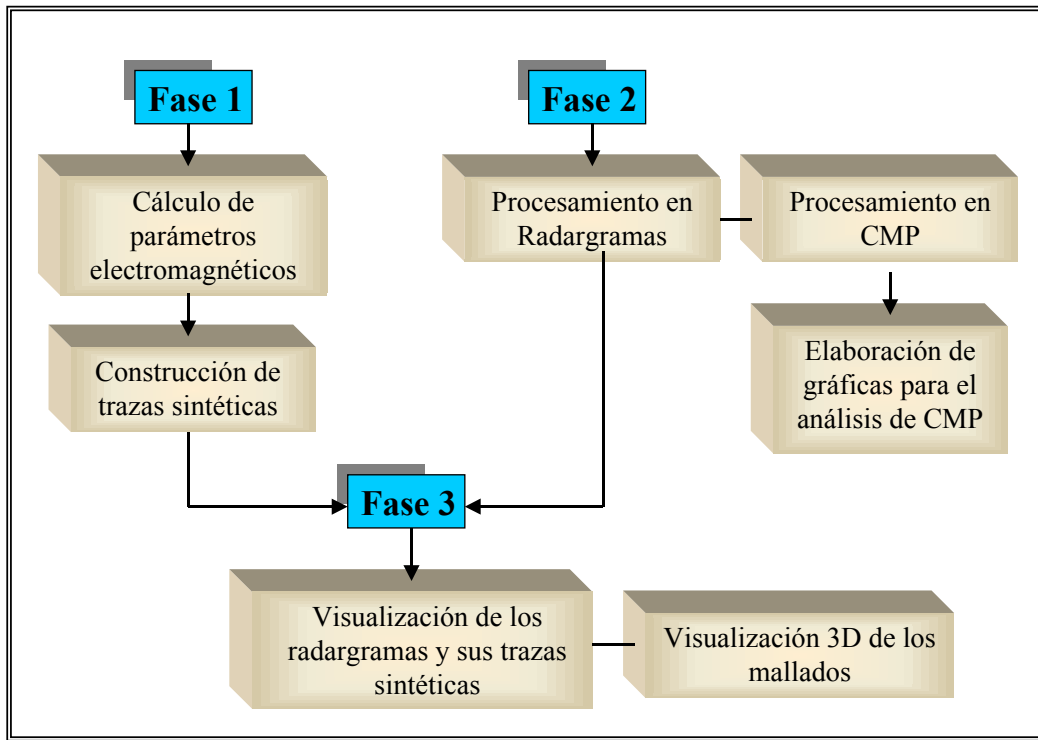


Figura 4.1. Flujograma de la secuencia del manejo de datos

4.1 Fase 1

4.1.1 Cálculo de los parámetros electromagnéticos mediante datos geotécnicos

Con datos de saturación, porosidad y conductividad del agua de los suelos, se calcularon los valores de conductividad y permitividad eléctrica real mediante las ecuaciones 2.3, 2.4 y 2.8.

En el caso de la permitividad imaginaria efectiva, se calculó simplemente con el factor de pérdida causado por la conductividad en el rango de frecuencia de las antenas, debido a que la permitividad imaginaria en los suelos es casi cero, quedando la ecuación 2.7 en:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \quad (4.1)$$

El aporte de la superficie específica para el cálculo de la conductividad de las arcillas se tomó de un promedio medido la cual es de $4,8 \times 10^{-4}$ S/m (Santamarina, 2001. Ya que no se disponen de aparatos donde se puedan medir directamente las propiedades como la superficie de conducción.

Una vez calculados los parámetros electromagnéticos de cada uno de los estratos, se determinaron los valores característicos que definen el comportamiento de la onda electromagnética en el paso de cada uno de los medios: velocidad de fase, atenuación, profundidad de piel y longitud de onda mediante las ecuaciones: 2.21, 2.22 y 2.26. Además, se calcularon los valores de la impedancia electromagnética y los coeficientes de reflexión y transmisión para incidencia normal (ecuaciones: 2.28 a 2.30).

El cálculo de los valores de impedancia y los coeficientes de reflexión y transmisión se calcularon por un programa realizado en *Matlab*, ya que de esta manera se pueden realizar cálculos y análisis gráficos en los datos con mayor facilidad.

Sólo se consideró el valor absoluto de los coeficientes de reflexión y transmisión, ya que es el valor relevante para el cálculo del comportamiento de las amplitudes de la onda en el paso de una interfaz, dicha deducción se encuentra en el Apéndice G, y los valores de los coeficientes e impedancia respectivos se encuentra en el Apéndice J.

4.1.2 Construcción de trazas sintéticas

Una vez calculados los datos de impedancia y velocidades electromagnéticas para cada perfil litológico propuesto con sus respectivas frecuencias, fue posible construir las trazas sintéticas correspondientes, de manera de compararlas con los radargramas adquiridos.

Específicamente, las construcciones de las trazas sintéticas se basaron en 4 zonas de los modelos propuestos: una en el dique, la Sección B en general, y tres en la Sección A distribuyéndose estos en el tope (SPT 3), en la berma 1 (SPT4) y en el terreno natural (SPT5) (Figuras 6.2 a 6.4). En cada perfil, se generaron 2 trazas sintéticas correspondientes a las dos frecuencias utilizadas, 50 y 100 Mhz, alcanzando en total 8 trazas sintéticas.

El proceso se realizó en una estación de trabajo, mediante el programa comercial “*geoview*” de la compañía “*Hampson and Russell*”. El paquete computacional crea sismogramas sintéticos basándose en modelos que poseen espesores estratigráficos definidos, con sus respectivos valores de impedancia y velocidad acústica.

El uso del programa fue un aspecto que se estudió con mucha atención, ya que si bien las ondas electromagnéticas y acústicas poseen un comportamiento similar en su propagación, también existen diversas diferencias en su naturaleza y en las magnitudes de sus componentes.

El método utilizado para ajustar las diferencias escalares que puedan existir entre los estudios acústicos y electromagnéticos en el programa “*Hampson and Russell*” fue aparentando valores de frecuencias de 50 y 100 Hz. Esto creó un déficit de 10^6 unidades, ya que las ondas electromagnéticas se propagan con frecuencias en el orden de Mhz. Este déficit se compensó con el producto de las velocidades electromagnéticas por un factor de 10^{-6} .

El producto en las velocidades electromagnéticas, además de compensar a nivel escalar, también originó valores de velocidad aceptables cuando se trata de ondas acústicas, cumpliendo de esta manera con su naturaleza.

4.2 Fase 2

4.2.1 Procesamiento en radargramas

Los tendidos de tipo reflexión y los de tipo CMP se les aplicó un control de ganancia automática AGC con el mismo principio que se aplica en los sismogramas. Adicionalmente se les aplicó un filtro temporal denominado “*Dewow*” el cual corrige las señales saturadas causadas por el decaimiento lento de las señales de bajas frecuencias “*wow*”.

4.2.2 Elaboración de gráficas para el análisis de CMP

Las gráficas de análisis de CMP se obtienen directamente del programa “*Win Ekko_Pro*”, mediante a la instrucción denominada “*CMP Analysis*”, en la cual sólo se indica el rango de velocidades. El programa consiste en la sumatoria de las trazas para diferentes valores de velocidades. Cuando las trazas se suman con una velocidad incorrecta, las amplitudes tienden a destruirse y producir baja amplitudes. Todo lo contrario ocurre cuando se evalúan con velocidades que puedan caracterizar al medio.

Los resultados finales obtenidos en el “*Win Ekko Pro*” son gráficas de velocidades vs. tiempo, presentando las velocidades que más se aproximan a la velocidad del medio de propagación, mediante la concentración de altas amplitudes. Para este trabajo, se utilizó el rango de velocidades comprendido entre 0 y 0,2 m/ns. También se realizaron acercamientos donde existían mayores valores de amplitud en las imágenes de Análisis de CMP que pudieran ayudar a la interpretación.

4.3 Fase 3

4.3.1 Visualización de los radargramas y sus trazas sintéticas

Se realizó un programa en *Matlab*, el cual lee y grafica: primero los archivos de los radargramas adquiridos en formato ASCII, luego los datos de las trazas sintéticas y por último la posición en el tiempo donde se deberían encontrar las reflexiones de

cada estrato. Los archivos que contenían los datos de las trazas sintéticas se ordenaron en dos columnas, la primera posee los valores de tiempo y la segunda los valores de amplitud correspondiente. Los archivos de las reflexiones sólo necesitan una columna con los valores en tiempo de cada reflexión.

Con respecto a los archivos de los radargramas sintéticos, estos poseen la siguiente estructura: la primera fila se compone de tres columnas, la primera posee la información del número de trazas, la segunda el número de muestras por trazas y la tercera la frecuencia utilizada en la adquisición. A partir de la segunda fila existe una sola columna con la información de las amplitudes (Figura 4.2).

# traza	# muestras	frecuencia
Amplitudes		

Figura 4.2 Disposición de los datos de entrada de la traza sintética para su visualización, realizada por el programa realizado en Matlab.

Los datos que se adquieren con el programa “*Sensors & Software*”, se almacenan en dos archivos: uno que contiene el encabezado con extensión “.HD” en formato ASCII y otro que posee la información de cada traza con extensión “.DT1” en código binario. Es necesario que este último archivo se encuentre en formato ASCII para poder ser leído por el programa *Matlab*. Esto se llevó a cabo mediante el programa “*Win Ekko pro*”, en el cual existe la opción de crear los archivos adquiridos con formato ASCII.

4.3.1.1 Criterios generales para el análisis de perfiles y trazas sintéticas

Todos los perfiles relacionados con trazas sintéticas se programaron de manera de visualizarlos también en forma de trazas, ya que al tener una misma representación, permite una mejor correspondencia.

Adicionalmente, es importante destacar que los perfiles que corresponden a la frecuencia de 100 Mhz, al ser representados en forma discreta, sólo se muestran una parte del perfil, debido a que tienen muchas trazas que impiden la apreciación clara entre amplitudes.

Las trazas sintéticas tienen una profundidad en el dominio del tiempo entre 300 a 350 ns, y como los radargramas sólo se grabaron con un tiempo máximo de 300 ns, los sintéticos son interrumpidos.

Otro factor tomado en cuenta al relacionar las imágenes de los radargramas continuos y los discretizados en trazas, es el hecho que la profundidad en tiempo se encuentra desfasada en el orden de los 40 ns. Además, las trazas sintéticas al no tomar en cuenta las ondas directas, son desplazadas al tiempo cero del radargrama en el que se encuentra acoplada.

No obstante, las correlaciones que se puedan realizar entre las trazas sintéticas y los perfiles deben encontrarse dentro de un rango amplio en el eje del tiempo. Clasificando al sintético como datos flexibles o blandos en sus velocidades y profundidades, ya que los perfiles no se realizaron sobre la ubicación *exacta* de los ensayos geotécnicos, y podrían existir por lo tanto, problemas de variabilidad espacial.

También es importante resaltar que pueden existir factores que no se tomen en cuenta al momento de calcular los fenómenos de atenuación mediante datos geotécnicos, y que son esenciales en el análisis de los radargramas procesados. Uno de ellos es la

posibilidad de una mayor conductividad en los primeros estratos por la acumulaciones de sales causada de la evaporación de la llovizna o rocío del agua del lago que llega a dicha área.

Todos estos criterios generales descritos se consideraron para el análisis de cada uno de los perfiles especificados en el análisis de resultados, con sus respectivas trazas sintéticas.

4.3.2 Visualización 3D de los mallados

La visualización 3D de los radargramas dispuestos en forma de mallado es una herramienta de gran utilidad para el análisis de la continuidad de reflectores observados.

Esta visualización se realizó mediante la utilización del programa “Ekko_3D”. En el se ingresaron los tendidos longitudinales y transversales de las zonas donde se realizaron mallados: el terreno natural de la Sección B y la zona de inyección. Dicho programa aceptaba únicamente perfiles paralelos. En consecuencia, se tienen pares de imágenes para cada zona en que se realizaron los mallados; una imagen que involucra los perfiles longitudinales y otra los transversales (Figura 4.3).

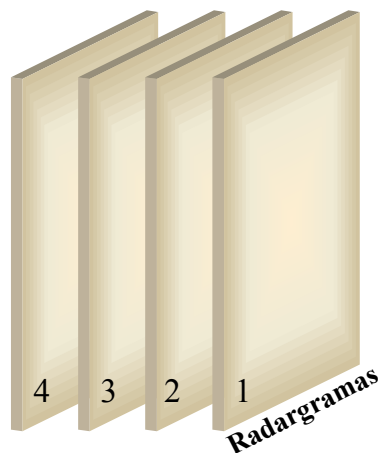


Figura 4.3 Disposición de los radargramas en la visualización.

En el programa se debe ingresar primero el número de puntos de muestreos en el tiempo, el cual depende de la frecuencia utilizada, segundo la cantidad de trazas por perfil, tercero el número de perfiles y cuarto el nombre de cada uno de los perfiles a ingresar, los cuales deben incluirse en un orden determinado. Los tres primeros parámetros son los factores que determinan las dimensiones de la imagen 3D, y el último corresponde a la definición de cada uno de los reflectores en su respectiva posición.

Una vez ingresados los datos, se utilizó el programa “T3D” para la visualización de los cubos formados. A cada uno de ellos se le realizó una serie de rotaciones y secciones transversales para poseer representaciones diferentes que pudiesen ayudar en la interpretación.

CAPITULO V

ADQUISICIÓN DE DATOS

Los datos de partida necesarios en la estrategia de procesamiento del presente trabajo son los siguientes:

- a) Perfiles litológicos representativos del área de estudio, mediante los cuales se determinaron los espesores de capas que permitieron la creación de las trazas sintéticas,
- (b) Porosidad y saturación de agua de cada uno de los estratos modelados previamente, ya que según las ecuaciones 2.3, 2.4, 2.7 y 2.8, estos factores son los elementos geotécnicos necesarios para el cálculo matemático de los parámetros electromagnéticos de los suelos,
- (c) La conductividad del agua de las zonas a estudiar, al igual que los dos últimos datos, constituye un factor determinante en el cálculo de la conductividad de los suelos (ecuaciones 2.3 y 2.4), y por último,
- (d) Los radargramas, los cuales son los datos principales en este proyecto de investigación.

Una vez nombrados los datos de inicio, se describe la ubicación, la estrategia de recolección y la instrumentación necesaria para la obtención de los mismos.

5.1 Ubicación

Debido al crecimiento de la producción petrolera, se han originado tres depresiones en distintos sectores de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo (Leal, 1989). Este efecto, pronostica el avance del lago hacia el continente, por lo que se construyó un sistema de diques para proteger dichas áreas.

Esta estructura ha sido detalladamente estudiada por métodos geofísicos y geotécnicos. Según Sully (1992), el dique se conforma de tres estratos principales: definidos por arenas limosas, suelos arcillo-limosos y un estrato de arcilla con interestratificaciones de lentes granulares.

Basado en el amplio conocimiento litológico del área, se seleccionaron dos zonas (A y B) del dique en el área de Lagunillas para los estudios a realizar (Figura 5.1). La adquisición de los radargramas se distribuyeron en las diferentes partes que conforman el dique: tope, bermas, enrocado y talud aguas arriba (Figura 5.2).

Por último, también se evaluó una zona cercana al dique donde se realizó una inyección de un material con densidad conocida y distinta al medio receptor. La mezcla inyectada es posible compararla con una arcilla de muy baja permeabilidad, y el suelo donde fue inyectada constaba de estratos arcillosos. El diseño del material inyectado permitió el desplazamiento del suelo y originó una estructura en forma de bulbo. La forma y esparcimiento del mencionado bulbo se verificó mediante una imagen tomográfica del subsuelo, generada a partir de la técnica “*cross hole*” de velocidades de ondas mecánicas. Este estudio previo fue la motivación para evaluar con el GPR esta última zona, mediante la comparación entre radargramas e imagen de tomografía sísmica.

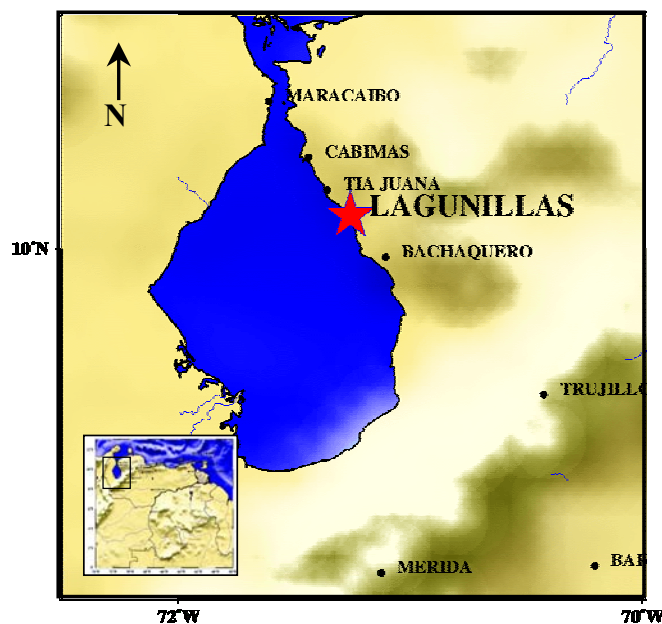


Figura 5.1. Ubicación geográfica de la zona de estudio. (Fuente: PDVSA- Intevep)

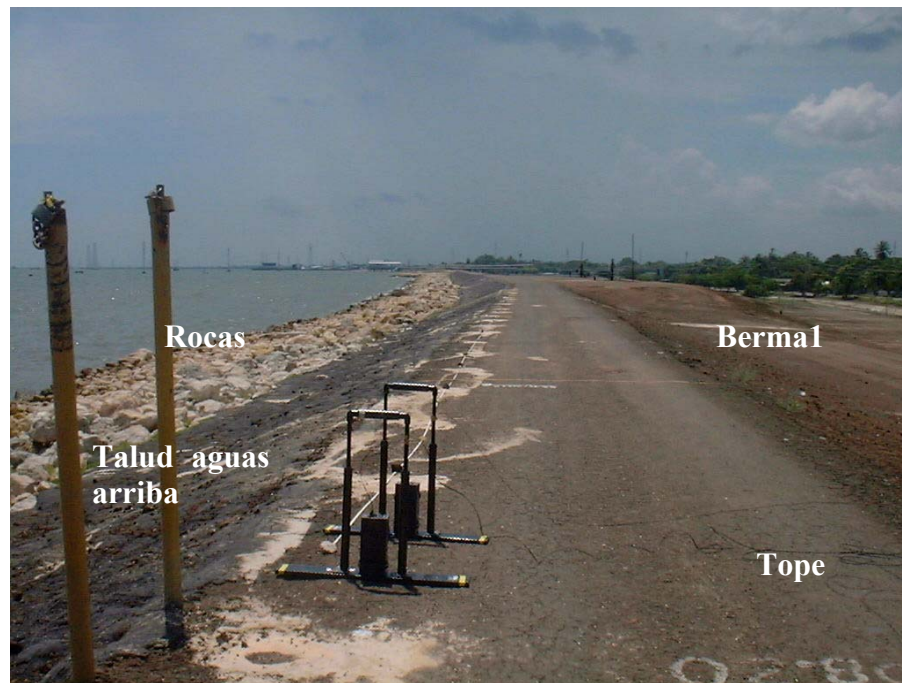


Figura 5.2. Partes del Dique donde se realizaron los tendidos adquiridos con el GPR.

5.2 Estudio de datos geotécnicos

Para las zonas de estudio se contó con sondeos geotécnicos adquiridos por PDVSA, así como por empresas contratistas. Del análisis de los datos, se construyeron perfiles litológicos (Figuras 5.3-5.6) y se calculó la porosidad y saturación de agua del subsuelo.

Los datos geotécnicos se obtuvieron de ensayos de penetración estándar SPT y de análisis de muestras extraídas en el ensayo, estableciendo la información del número de golpes, porcentaje de humedad y litología del subsuelo.

Para la Sección A, se tomaron los datos de las perforaciones geotécnicas nombradas como SPT 3 y 4. Para la Sección B, los datos de las perforaciones geotécnicas nombradas como SPT 1, 2 y 5, y para la zona de inyección, la perforación geotécnica nombrada como SPT 6 (Figuras 5.3-5.6).

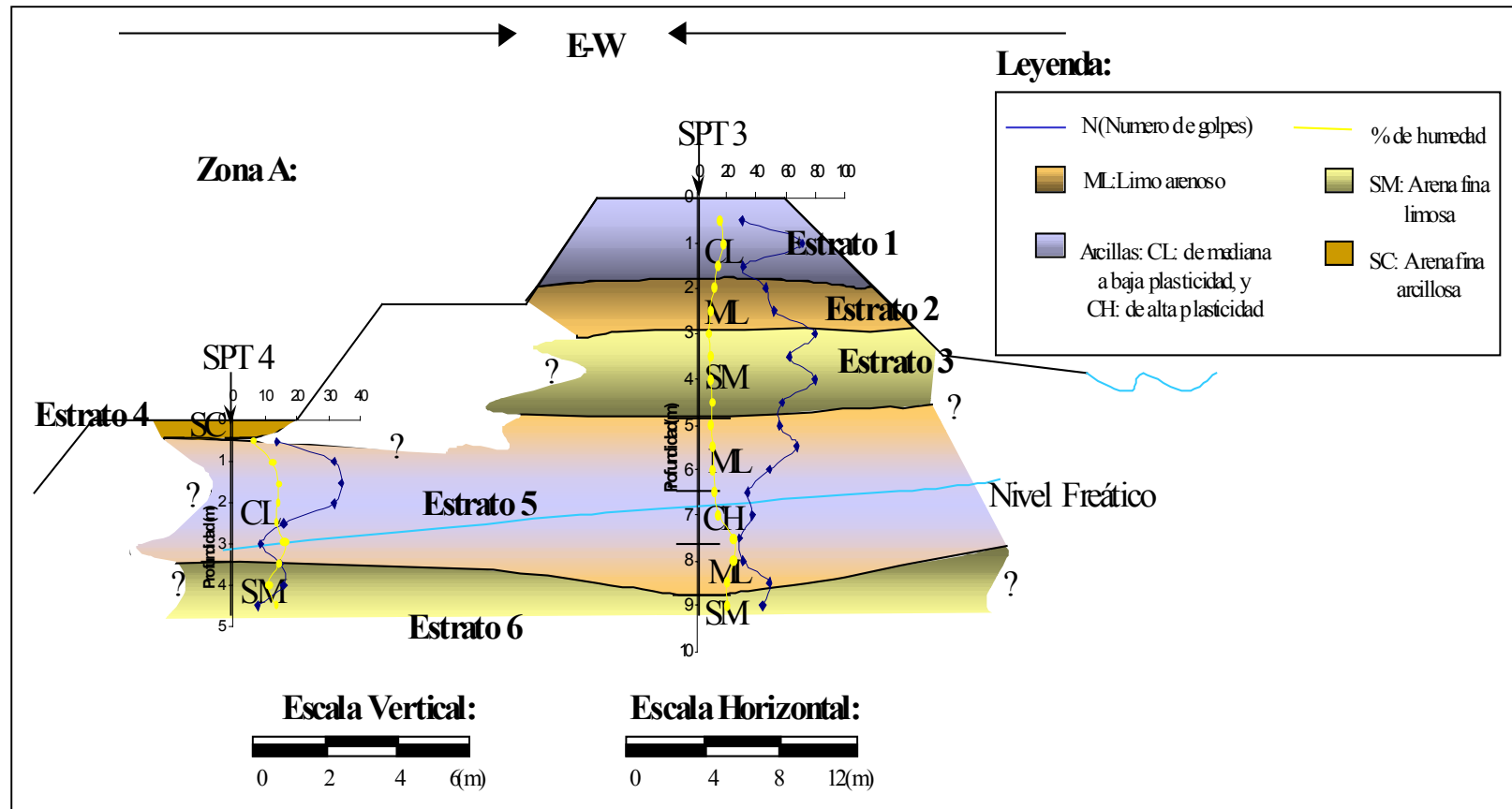


Figura 5.3. Perfil litológico de la sección A, definido principalmente por intercalaciones de estratos de arcillas y limos. Mediante los SPT 3 y 4, los cuales muestran en línea azul el número de golpes y en amarillo el porcentaje de humedad, a la misma escala.

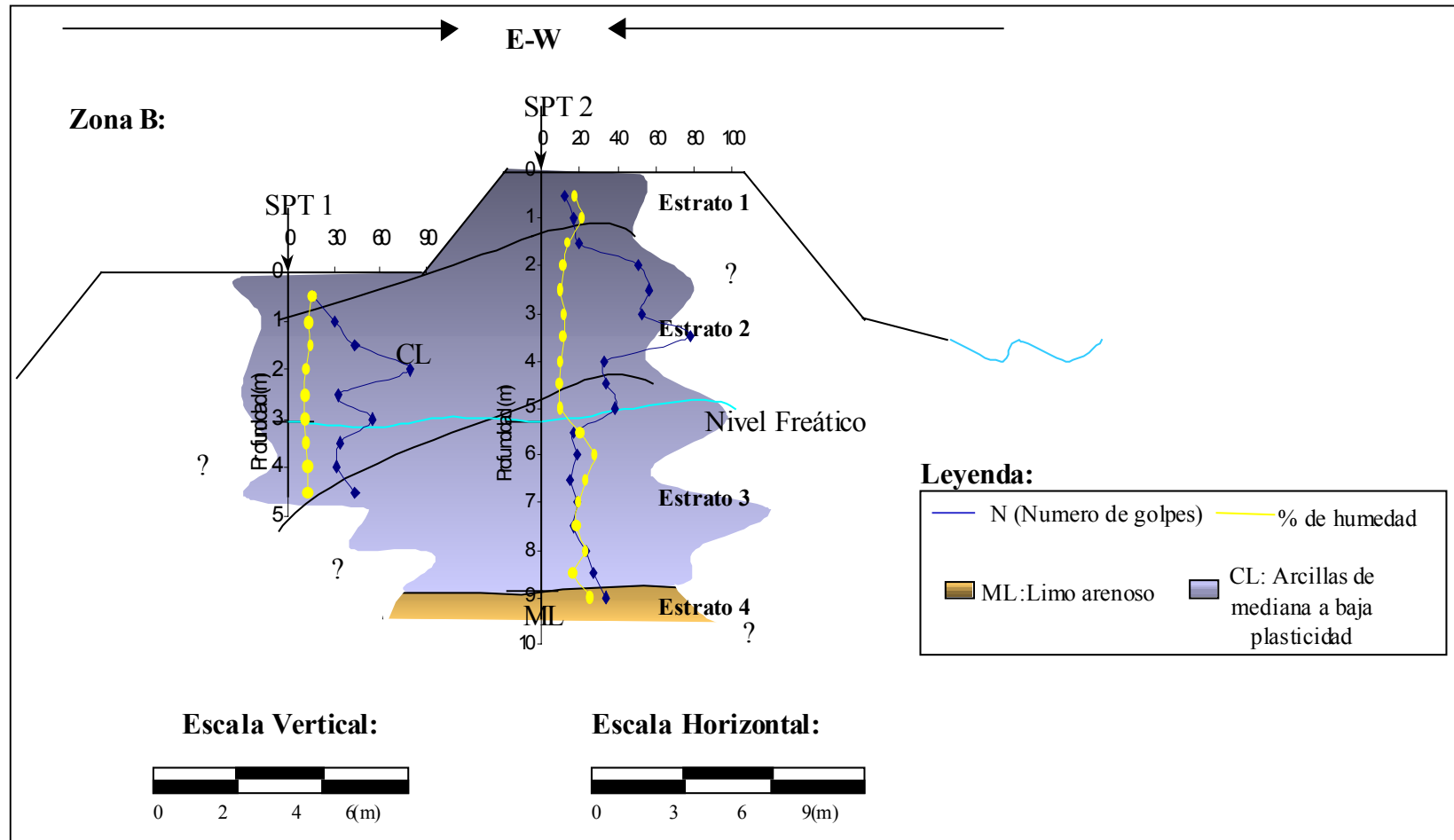


Figura 5.4. Perfil litológico de la sección B, definido principalmente de arcillas. Mediante los SPT 1 y 2, los cuales muestran en línea azul el número de golpes y en amarillo el porcentaje de humedad, a la misma escala.

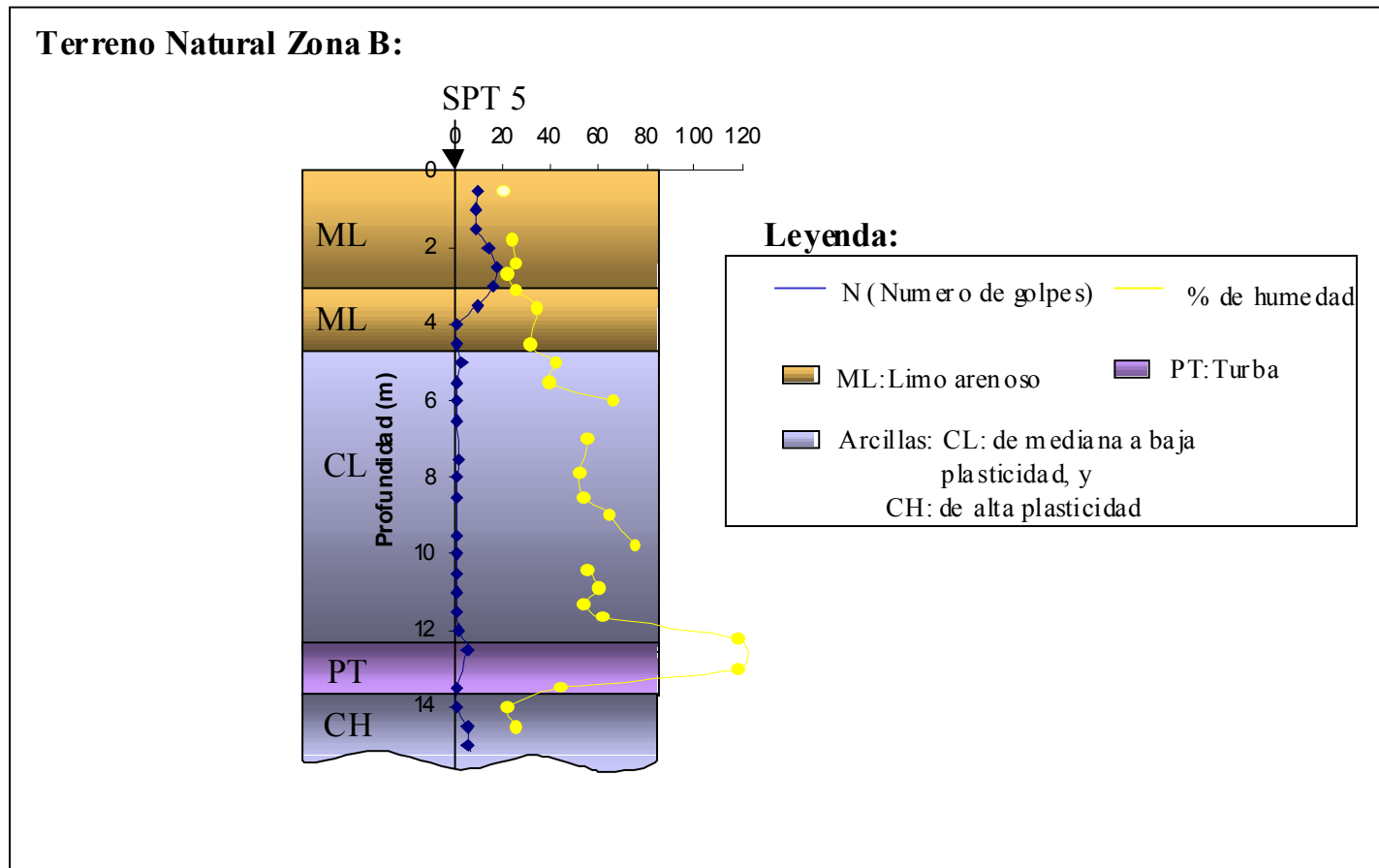


Figura 5.5. Diseño litológico del terreno natural de la sección B, definido principalmente de limos y arcillas. Mediante el SPT 5, el cual muestra en línea azul el número de golpes y en amarillo el porcentaje de humedad, a la misma escala.

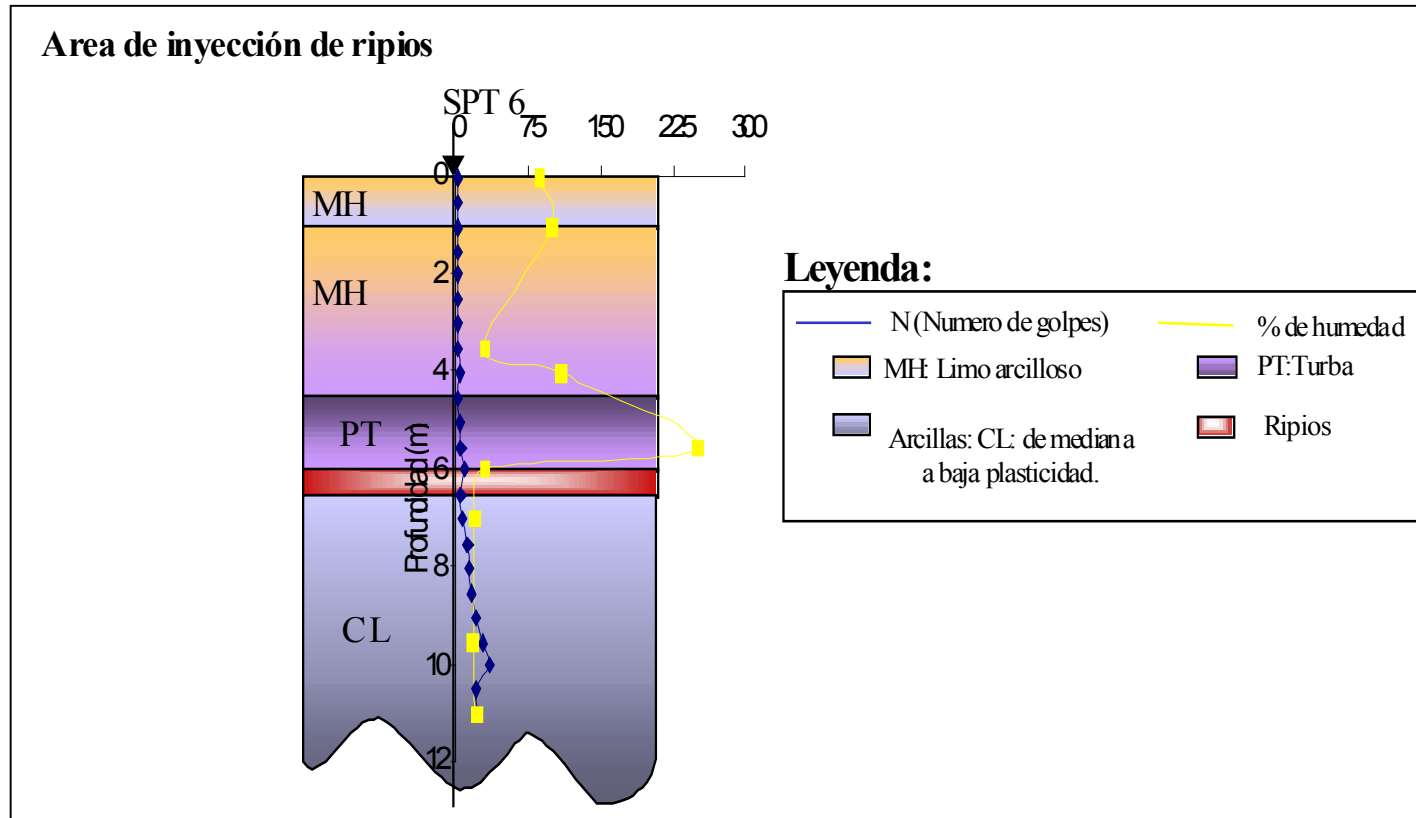


Figura 5.6. Diseño litológico del área de inyección, definido principalmente de limos y arcillas. Mediante el SPT 6, el cual muestra en línea azul el número de golpes y en amarillo el porcentaje de humedad, a la misma escala.

Los perfiles litológicos se obtuvieron mediante la correlación entre las perforaciones geotécnicas, correspondiente a cada zona, mediante la litología y las características particulares geotécnicas descritas.

Por otro lado, de ensayos previos a este proyecto de investigación, se derivaron los valores de gravedad específica característicos de los suelos que conforman y subyacen en el dique. Dichos ensayos se realizaron en trabajos anteriores en el Laboratorio de Geotecnia de INTEVEP, (González *et al*, 1994), obteniéndose valores promedio para arcillas de 2,65, y para arenas y limos de 2,7.

Con el número de golpes y tablas de valores experimentales para suelos granulares y cohesivos realizada por Bowles (1982), fue posible estimar el peso unitario del suelo (Apéndice E).

Reuniendo los resultados de peso unitario, porcentaje de humedad (hum) y gravedad específica de los estratos, se calculó la porosidad (ϕ) y el grado saturación de agua (Sat) mediante las fórmulas 5.1 y 5.2. Las deducciones de las mismas se encuentra en el Apéndice F.

$$\phi = 1 - \frac{\gamma_m}{G_s \cdot (1 + hum)} \quad (5.1)$$

$$sat = \frac{G_s \cdot hum \cdot \gamma_m}{G_s \cdot (1 - hum) - \gamma_m} \quad (5.2)$$

Los rangos normales de la porosidad en arenas y en arcillas se encuentran entre 0,2-0,5 y 0,3-0,7 respectivamente. Dicha condición se encuentra determinada por la fábrica de los granos que conforman el suelo (Santamarina, 2001).

En las Tablas 5.1 a la 5.4 se muestran los valores de porosidad y saturación de las zonas de adquisición. Las porosidades calculadas para las arenas en el área de adquisición tienen un valor promedio de 0,35, y las arcillas de 0,40 en el Dique, 0,5 en el terreno natural y 0,6 en la zona de inyección (Tablas 5.1-5.4). Aunque estos valores se encuentran dentro del rango, se podrían catalogar como altos.

Con respecto a la saturación, es de esperar que los estratos ubicados debajo del nivel freático en los perfiles realizados en el dique (Tablas 5.1 y 5.2), hayan reportado valores de saturación cercanos a 100%. Dicha acotación no puede hacerse en el terreno natural ni en la zona de inyección, debido a que no existen en los sondeos geotécnicos la ubicación del nivel freático.

En el terreno natural y en la zona de inyección, existe una capa fina de turbas, en las cuales, por su alto contenido de materia orgánica poseen una alta porosidad, siendo su saturación de agua igual a 1. Asimismo, cabe destacar que en ambas zonas la saturación se mantiene alta a medida que aumenta la profundidad.

Tabla 5.1 Resultados de datos geotécnicos sobre el dique de la sección A

Arcillas Arenas y Limos
Gravedad Específica: 2,65 2,7

Estrato	Peso unitario (gr/cc)	Humedad %	Relación de vacío	Porosidad	Grado de saturación	Descripción
1	2	14,27	0,51	0,34	0,74	Arcilla inorgánica, con micas
2	2	7,7	0,45	0,31	0,46	Limo arenoso, sin plasticidad con
3	2	9,00	0,47	0,32	0,52	Arena fina limosa, con micas
4	1,7	6,2	0,69	0,41	0,24	Arena fina arcillosa
5	2,1	12,61	0,45	0,31	0,76	ML: Limo arenoso inorgánico, CH, CL: Arcilla arenosa
5 (NF)	2	22,7	0,66	0,38	0,93	
6	2,1	20	0,54	0,35	0,99	Arena fina limosa, con micas

NF: Nivel Freático

Tabla 5.2. Resultados de datos geotécnicos sobre el dique de la sección B

Arcillas Arenas y Limos
Gravedad Específica: 2,65 2,7

Estrato	Peso unitario (gr/cc)	Humedad %	Relación de vacío	Porosidad	Grado de saturación	Descripción
1	1,95	15,68	0,57	0,36	0,72	Arcilla arenosa inorgánica (CL)
2	2	11	0,47	0,32	0,62	Arcilla muy arenosa inorgánica (CL), de compacta a dura ,
2(NF)	2,27	11,18	0,30	0,23	0,99	
3	2	21,14	0,61	0,38	0,93	Arcilla (CL) muy compacta
4	2	25,8	0,70	0,41	1,00	Limo (ML), denso,

NF: Nivel freático

Tabla 5.3 Resultados de datos geotécnicos realizado en el terreno natural de la sección B

Gravedad Específica: Arcillas Arenas y Limos
 2,65 2,7

Estrato	Peso unitario (gr/cc)	Humedad %	Relación de vacío	Porosidad	Grado de saturación	Descripción
1	2	23,6	0,67	0,40	0,95	Limo arenoso, no plástico
2	1,7	33	1,11	0,53	0,80	Limo arenoso, algo plástico
3	1,6	53,43	1,54	0,61	0,92	Arcilla limosa
4	1,4	118	3,13	0,76	1,00	Turba
5	1,8	30,66	0,92	0,48	0,88	Arcilla de alta plasticidad

Tabla 5.4. Resultados de datos geotécnicos sobre la zona de inyección

Gravedad Específica: Arcillas Arenas y Limos
 2,65 2,7

Estrato	Peso unitario (gr/cc)	Humedad %	Relación de vacío	Porosidad	Grado de saturación	Descripción
1	1,5	75	2,15	0,68	0,94	Arcilla limosa, marron
2	1,4	70,3	2,22	0,69	0,84	Limo arcilloso, color gris
3	1,32	155	4,12	0,80	1,00	Turba
4	1,8	30,03	0,95	0,49	0,85	Ripios
5	2	18,96	0,58	0,37	0,87	Arcilla limosa color gris

5.3 Determinación de la conductividad del agua

La conductividad del agua de la zona del dique, se determinó en el Laboratorio de Oceanografía y Derrames de PDVSA-INTEVEP. Donde se midieron los valores de conductividad y contenido de sales disueltas (TDS), mediante el equipo de sondas multiparamétricas marca “Hydrolab”, modelo “surveyor 4”. El ensayo se realizó con 2 envases de 300 cm³ cada uno con muestras de agua recogidas previamente en el dique del Lago de Maracaibo (muestra 1) y del propio Lago (muestra 2).

El ensayo se realizó vertiendo la muestra de agua en un envase que se enrosca al medidor de sonda multiparamétrica y, después de unos segundos, la pantalla digital del equipo proyectaba los valores de interés. Los resultados obtenidos en el ensayo acerca de la conductividad y sales disueltas en el agua definido como TDS se muestran en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Conductividad y Sales disueltas (TDS) de las muestras 1 y 2 tomadas en el dique del Lago de Maracaibo

Muestra	Conductividad (mS/cm)	TDS (gr/l)
1	8,27	5,29
2	8,36	5,34

En el caso de la zona de inyección, se tomaron valores representativos de la conductividad entre el agua de lluvia, 0,05 S/m y el agua de la mezcla inyectada, 0,7 S/m, dependiendo del estrato. Para las primeras capas se tomaron valores más cercanos al agua de lluvia y para el resto el agua de la mezcla. El valor de conductividad de agua de la mezcla se obtuvo de informes no publicados de inspecciones continuas realizados por PDVSA (Tabla 5.6).

Tabla 5.6. Relación de pozos de monitoreos encontrados en la zona de inyección.
(Fuente: PDVSA- Intevep).

Pozos	pH	Conductividad (mS/cm)	Cloruros (ppm)
1	8,19	7,47	1760
3	5,12	6,73	1517
4	8,33	7,30	1726

5.4 Adquisición de radargramas

Una vez realizado la primera parte que implica cálculos de parámetros y ensayo de laboratorios, se procedió a realizar el trabajo de campo, descrito a continuación:

5.4.1 Distribución de los perfiles de campo

Se realizaron 64 perfiles de GPR, 19 de tipo CMP y 45 de tipo reflexión (Figura 5.7). Las adquisiciones de los tendidos se distribuyeron en tres zonas, repartiéndose 11 en la Sección A, 43 perfiles en la Sección B y 10 perfiles en una zona donde se inyectaron materiales con densidad diferente al suelo receptor.

La disposición y ubicación de cada uno de ellos se muestran en las Figuras 5.8, 5.9 y 5.11. Se contó con dos tipos de antenas, 100 y 50 Mhz. Con la antena de 100 Mhz se adquirieron 37 perfiles y los restantes con la antena de 50 Mhz.

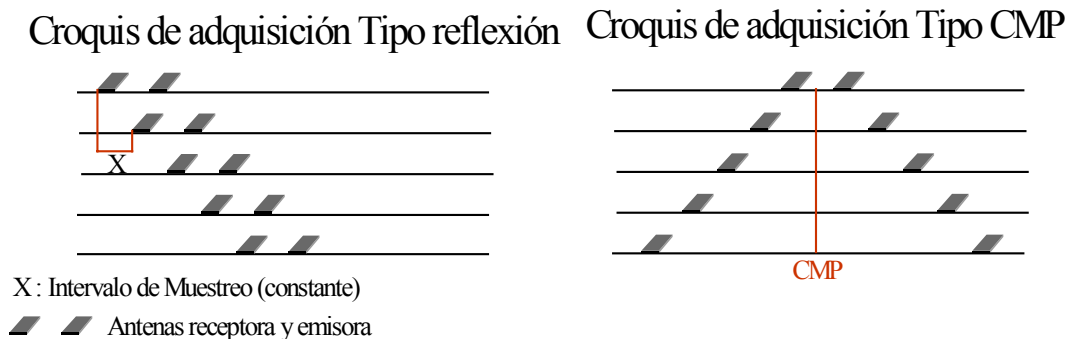


Figura 5.7. Croquis de la adquisiciones de tipo reflexión y tipo CMP, ejecutadas con el radar de penetración de suelos.

En algunos de los tendidos se realizaron distintos perfiles con las antenas de 100 y 50 Mhz, de manera de observar el contraste del comportamiento de las ondas electromagnéticas a distintas frecuencias y en un mismo medio de propagación. Según Annan (2002) estas antenas se complementan, ya que la de 100 Mhz proporciona mayor resolución, pero con menos profundidad, a diferencia de la antena de 50 Mhz, la cual otorga una mayor profundidad de prospección y menos resolución en los radargramas.

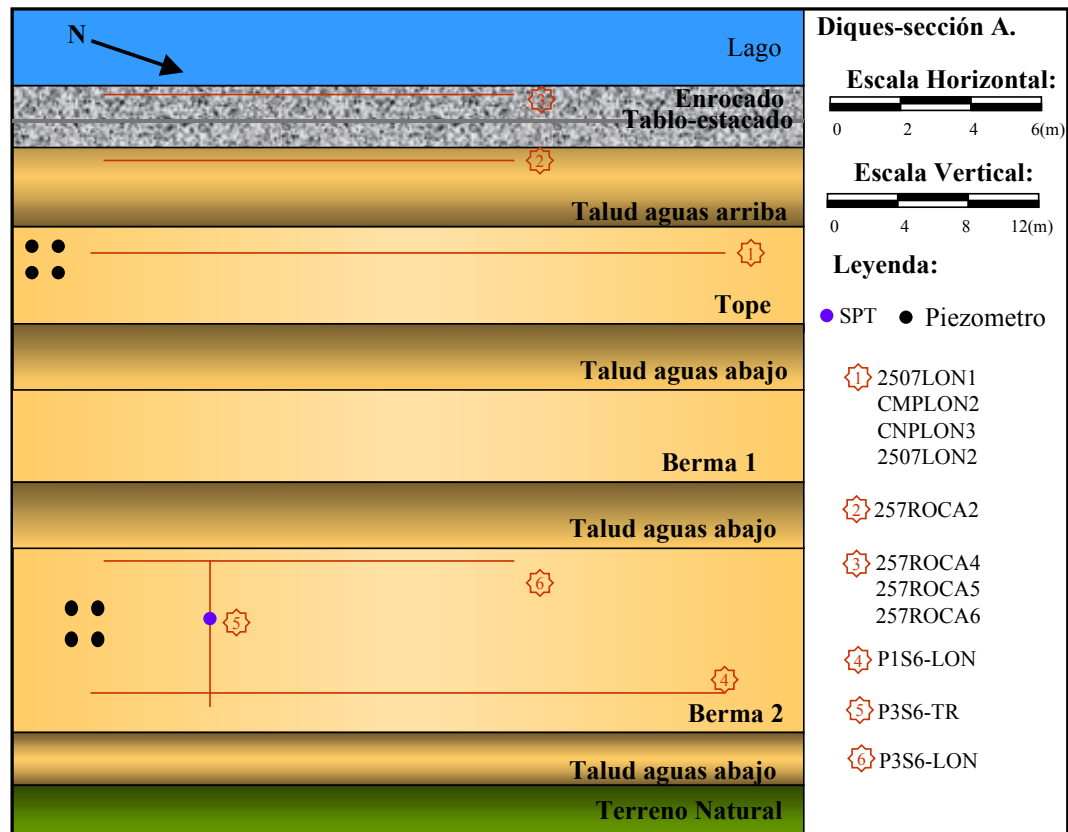
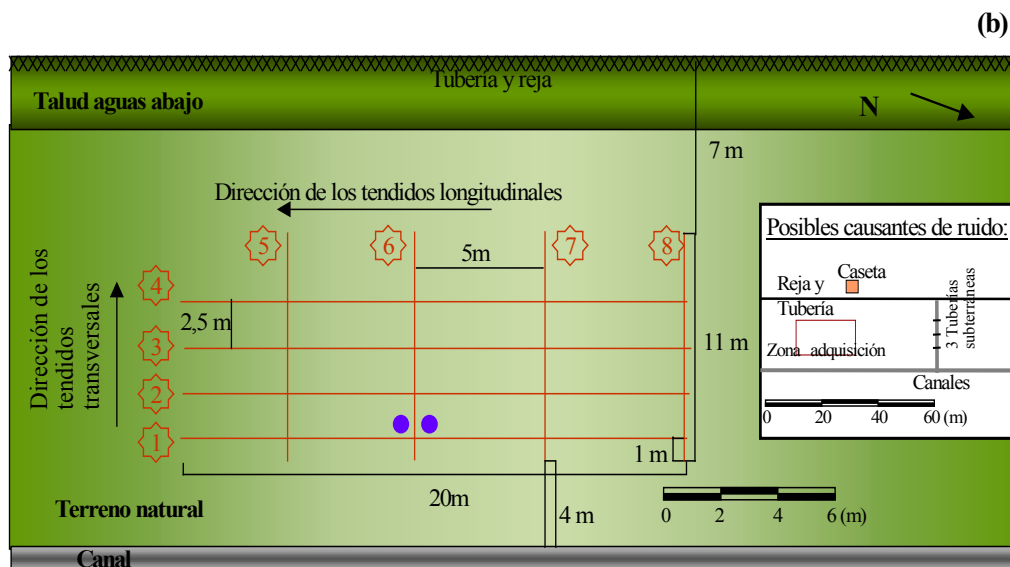
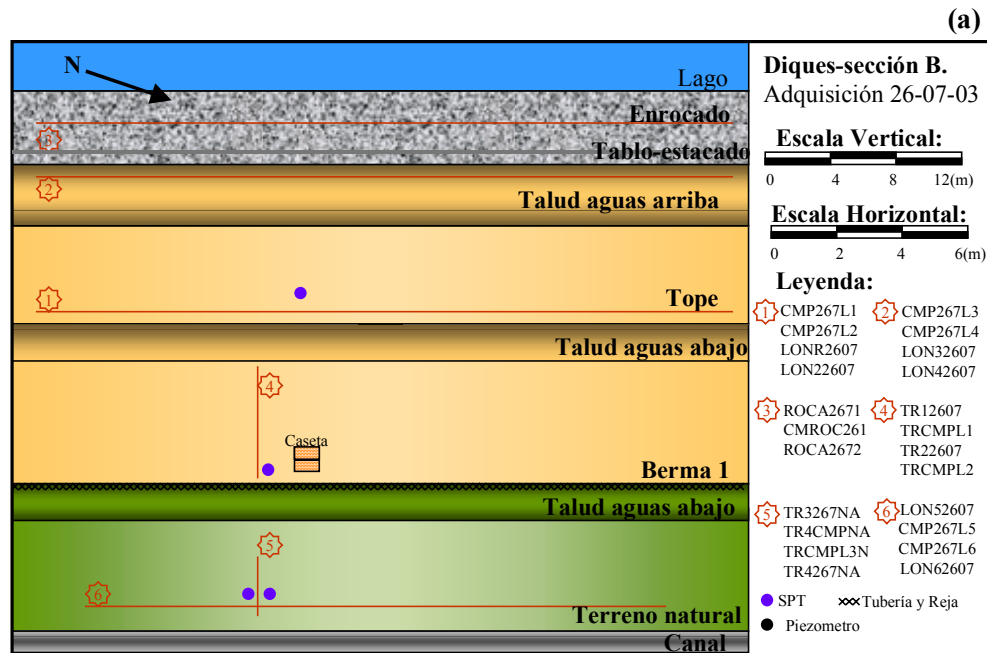


Figura 5.8. Disposición de los tendidos obtenidos en la etapa de adquisición para la Sección A de dique. Figura vista en planta.

En el terreno natural de la Sección B, se realizaron nuevamente los tendidos 5 y 6 de la Figura 5.9 (a) en una nueva fase de adquisición, completando en el mismo período un mallado de cuatro perfiles transversales y cuatro longitudinales al dique, [Figura 5.9 (b)]. Esta operación se debió a que se necesitaba discernir la causa de la continuidad observada en ciertos reflectores de los radargramas, los cuales podrían ser ocasionados por una reja y un canal [Figura 5.10 (a)].

Por otro lado se adquirieron perfiles sobre las rocas y el talud aguas arriba (Figura 5.10 (b) y (c)], de manera de comparar datos electromagnéticos de la estructura del dique propiamente dicho y sus proximidades con el lago.



PERFILES:

- | | | | |
|----------------------|--|----------------------|----------------------------------|
| 1 LON1NA5
LON2NA5 | 2 CMPL1NA5
LON3NA5
LON4NA5 | 3 LON5NA5
LON6NA5 | 4 CMPL2NA5
LON7NA5
LON8NA5 |
| 5 TR1NA5
TR2NA5 | 6 CMPT1NA5
CMPT2NA5
TR3NA5
TR4NA5 | 7 TR5NA5
TR6NA5 | 8 TR7NA5
TR8NA5 |
- Pozo de Tomografía

Figura 5.9. Disposición de los tendidos obtenidos en la etapa de adquisición, para la Sección B. (a) realizado sobre el dique. (b) mallado realizado sobre terreno natural.

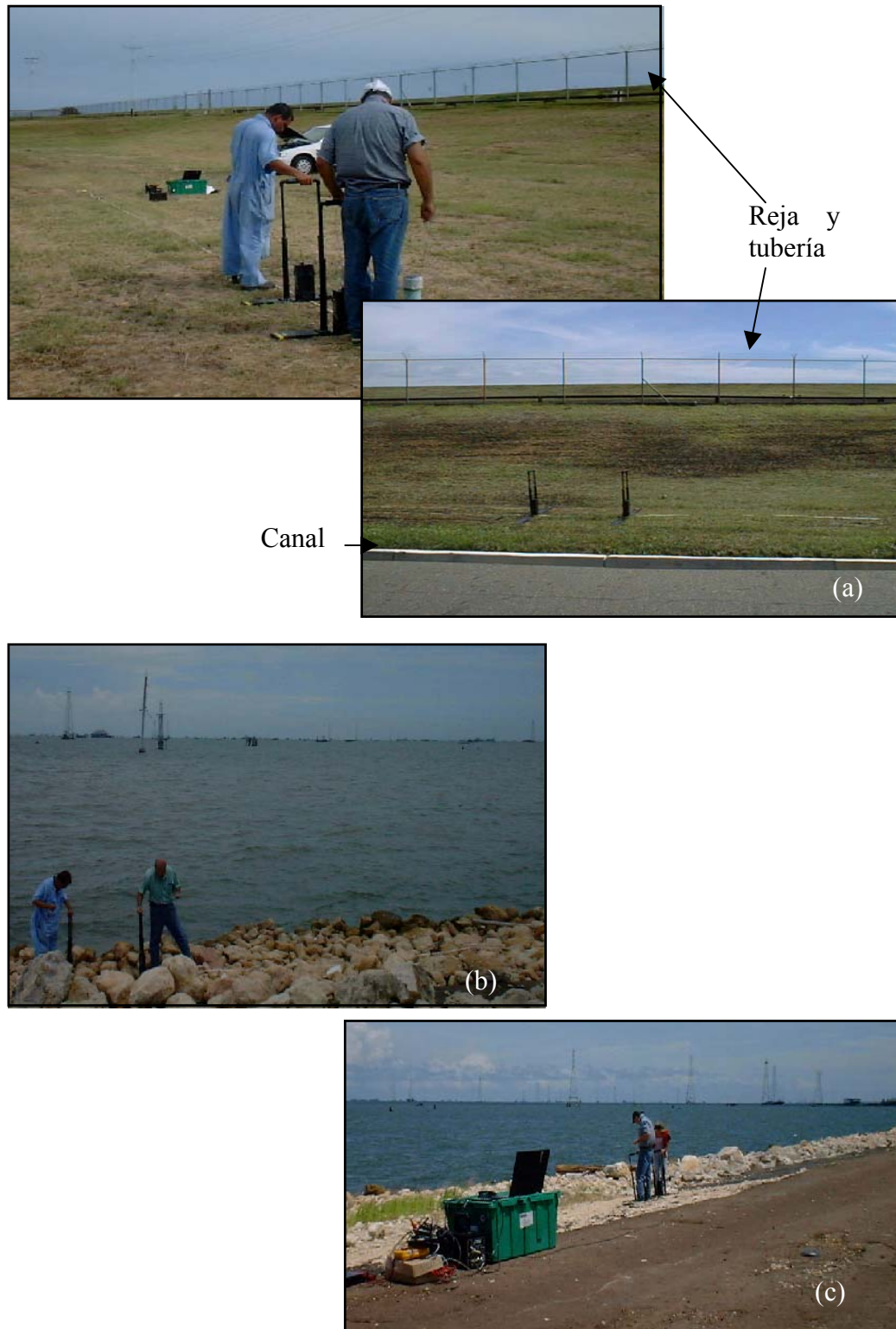
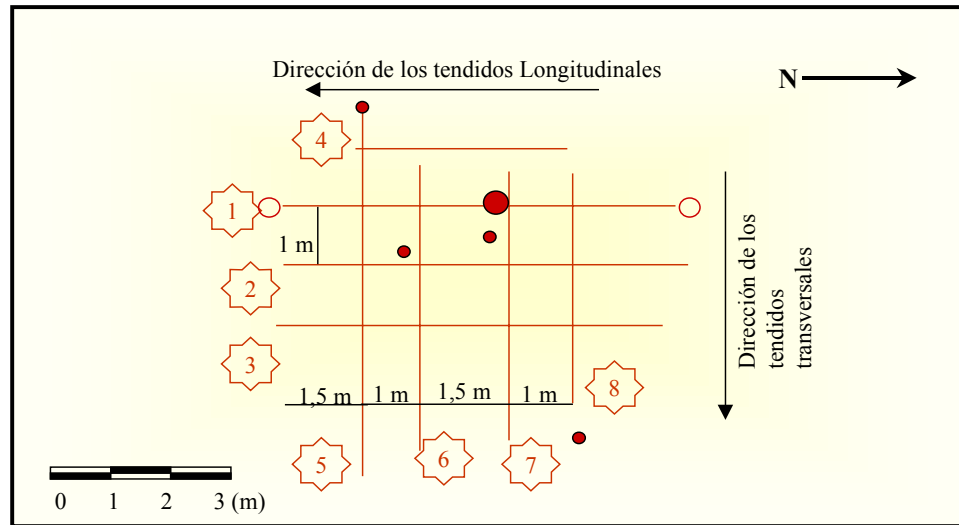


Figura 5.10. Imágenes de campo, de la sección B (a) sobre el terreno natural. (b) sobre las rocas (c) sobre talud aguas arriba.

Los tendidos adquiridos en la zona de inyección se realizaron por el interés de comparar las respuestas de la emisión de ondas electromagnéticas en zonas donde existen estudios sísmicos previos, “*cross hole*”. La disposición de los mismos se encuentra en la Figura 5.11, los cuales también se distribuyeron en un mallado.



PERFILES:

- | | | | |
|-----------|----------------------|---------------------|-----------|
| 1 LON2ILA | 2 LON4ILA | 3 LON5ILA
CMPILA | 4 LON3ILA |
| 5 TR4ILA | 6 TR3ILA
CMPT1ILA | 7 TR1ILA | 8 TR2ILA |

- Pozo inyección ● Pozo control de presión
- Pozo de Tomografía

Figura 5.11. Disposición de los tendidos obtenidos en la etapa de adquisición, para la zona de inyección.

5.4.2 Procedimiento de adquisición

La logística de adquisición de los tendidos es simple. Primero, se realizaron las conexiones de la consola marca “*Sensors & Software*”, modelo “*Pulse Ekko 100*”, y las antenas receptora y transmisora de la misma marca, con la batería y la computadora (Figura 5.12). Una vez conectados los equipos, se procedieron a realizar todas las calibraciones de las primeras llegadas y cambios requeridos. Los parámetros

de adquisición como tipo de tendido, frecuencia de la antena, tiempo de muestreo, separación de antenas, etc. Todos estos parámetros se introdujeron en el programa de adquisición del GPR, llamado “*Ekko 42*” (Figura 5.13).

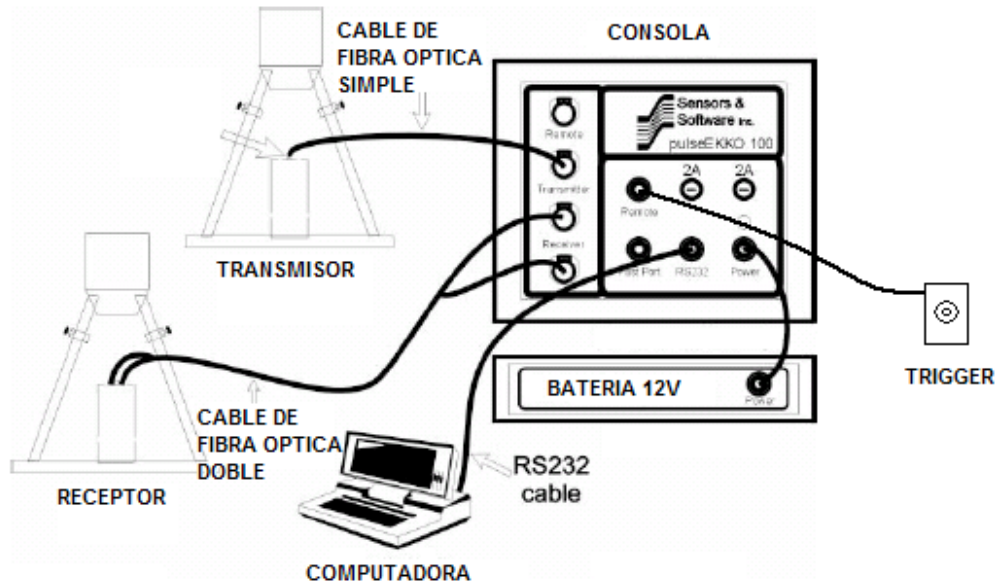


Figura 5.12. Conexión de los equipos que conforman el Radar de Penetración de Suelos. Figura tomada: *Sensors & Software* (1999).

Field Line	Start Position : 0.00000 m. Operating Mode : CONTINUOUS Survey Type : Reflection Starting Delay : 0.000 sec Title1: Title2:	Step Size : 1.000 m. Antenna Sep: 1.000 m. Pause Trace: 0 Move Delay : 0.000 sec
Gains	AGC Gain Max: 500 Window: 1.000	← Tipo de ganancia
Job	Auto Name: \EKK042\LINE Pulser Voltage: 400 V	
Layout	Baud : 19200 Serial : COMM1 Screen: Color Graph: 50 Filtro de tiempo Trace : Wiggle Shade: RIGHT	
Options	Correction: DEWOW DownTrc Filt (pts): 1 Bkgrnd Filt: 0.00 Depth Axis: ON Plot Opt: OFF Velocity : 0.100 m/ns	
System	Time Window: 512 ns Sampling Int: 800 ps Points: 640 Frequency : 100 MHz No. Stacks : 4	
Defaults Layout Basic	Exit Options Field Line Run	Gains System Job Velocity
Sensors & Software pulseEKKO 100 RUN U 4.2		

Figura 5.13. Despliegue en pantalla del programa *Ekko 42*, en ambiente DOS, mostrando todos los parámetros necesarios en las adquisiciones del radar.

5.4.3 Parámetros de adquisición

En general, los tendidos realizados con la antena de 50 Mhz se llevaron a cabo con un intervalo de muestreo en superficie de 0,5 m, y con una separación entre antenas de 2 m con “offset” constante. Las adquisiciones con la antena de 100 Mhz se realizaron con un intervalo de muestreo en superficie de 0,1 m y con “offset” constante de 1 m.

El intervalo de muestreo se determinó por el manual de adquisición del equipo “*Sensors and Software*” (1999), el cual recomienda que el intervalo de muestreo máximo en superficie sea un cuarto de longitud de onda. Esto quiere decir: 0,5 y 0,25 m para las antenas de 50 y 100 Mhz, respectivamente, debido a que valores mayores en el intervalo podrían crear un déficit de información para la definición de los objetivos.

Con respecto al intervalo de muestreo en tiempo para la recolección de las trazas, se encuentra controlado por la frecuencia de las antenas: mientras mayor sea la frecuencia de las antenas menor será el intervalo de muestreo, ya que podría ocurrir un efecto de superposición “*aliasing*” (Apéndice H). Según el manual de adquisición de “*Sensors and Software*” (1999), el intervalo de muestreo no debe ser menor que 1,6 ns para las antenas de 50 Mhz y 0,8 ns para las de 100 Mhz.

Además, se les aplicó un número de apilamiento de 64, siendo éste un número adecuado que permite aumentar la relación señal/ruido. Los detalles de las características de cada tendido se encuentran en el Apéndice I.

CAPITULO VI

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo se evalúan y relacionan los resultados obtenidos. Además se examinan los posibles factores causantes de dichas respuestas. Primeramente se analiza la conductividad del agua del lago, luego se estudian los diversos parámetros electromagnéticos obtenidos de conversiones de los datos geotécnicos y, finalmente, se relacionan los radargramas con los sismogramas sintéticos (en la zona del dique) y con la tomografía sísmica (en la zona de inyección).

6.1 Conductividad del agua del Lago de Maracaibo

El agua intersticial de los suelos de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo (COLM) tiene un valor de conductividad aproximado comprendido entre 10^{-1} y $0,1$ S/m (Tabla 5.1). En la Figura 6.1 se observa que para el valor de conductividad del agua encontrada en el lago, las arcillas y las arenas poseen los mismos rangos de valores de conductividad. Esto indica que el efecto que puede causar la superficie de conducción de las arcillas es despreciable con respecto a la conductividad del agua. Este comportamiento también se ve reflejado en el cálculo de la conductividad mediante las ecuaciones 2.3 y 2.4 (Tablas 6.1, 6.2 y 6.3).

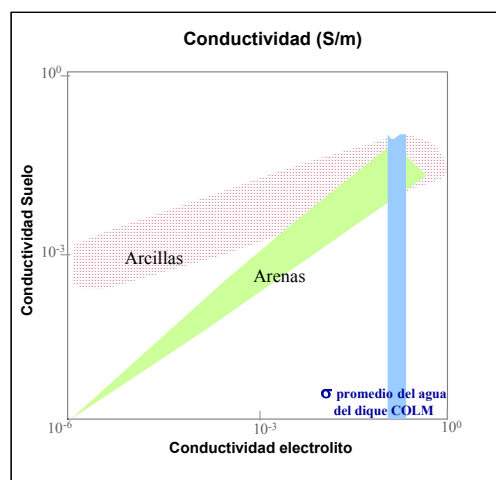


Figura 6.1. Comportamiento de la conductividad de las arenas y arcillas saturadas. La franja azul representa el intervalo de la conductividad correspondiente al agua del lago de Maracaibo.

6.2 Parámetros electromagnéticos obtenidos mediante datos geotécnicos

En los análisis iniciales, se determinó que la concentración iónica del agua del Lago de Maracaibo genera un valor promedio de conductividad de 0,83 S/m, y, por ende, las arcillas y las arenas tienen el mismo rango de valores de conductividad. Este análisis previo también se ve reflejado en las Tablas 6.1, 6.2 y 6.3, ya que el aporte que puede producir la superficie de conducción ($4,8 \times 10^{-4}$ S/m) en el cálculo de la conductividad del suelo, es muy inferior al que genera el agua hallada en el dique. Asimismo, las conductividades resultantes de los suelos se encuentran en un rango amplio desde 10^{-1} hasta 10^{-3} S/m, ya que este resultado depende del volumen de agua contenido en el estrato.

En el caso de la zona de inyección (Tabla 6.4), se tomaron valores promedio entre la conductividad correspondiente al agua de lluvia (0,05 S/m) y la del agua de la mezcla 0,7 S/m. Los estratos de esta zona poseen valores constantes de conductividad en el orden de 10^{-1} S/m, ya que, al igual que en las capas del terreno natural, el grado de saturación es muy alto, lo que hace que el volumen de agua juegue un papel importante.

Por otro lado, se sabe del Capítulo II, que la permitividad real depende del volumen de agua, ya que la capacidad de polarización es controlada fundamentalmente por la condición dipolar de la molécula de agua. Una manera de evidenciar esta dependencia es relacionar los valores medidos de permitividad para suelos secos (2-3) y para suelos saturados (10-40) (Tabla 2.2).

Según los modelos presentados, la permitividad real relativa se encuentra entre 20 y 35 para las arcillas, y 10-15 para las arenas. Esta diferencia de valores en los dos tipos de suelo es firmemente sustentada con el conocimiento que las arcillas pueden contener mayor volumen de agua que los suelos arenosos y por consiguiente pueden alcanzar una mayor capacidad de polarización (Santamarina, 2001). Igualmente,

debajo del nivel freático, en las capas de turbas y en la zona de inyección, es lógico que los valores de permitividad real se incrementen a 30, 40 y 59 respectivamente, ya que la saturación de agua debe ser de 100% y además la porosidad de las turbas es considerablemente alta (80%).

La permitividad efectiva depende matemáticamente de la conductividad del material y la frecuencia, donde se excluye la permitividad imaginaria debido a que este valor tiende a cero, en los suelos saturados y secos. Debido a que la permitividad efectiva es inversamente proporcional a la frecuencia, puede notarse en las Tablas 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4 que a una frecuencia de 100 Mhz los valores de la misma son la mitad de los obtenidos a una frecuencia de 50 Mhz en un mismo estrato, para un cierto valor de conductividad. Esta observación demuestra que los factores de pérdida de energía son mayores cuando la frecuencia disminuye en el rango del radar. La observación del rango de frecuencias del radar se debe a que este comportamiento no se cumple cuando se alcanzan frecuencias puntuales que provocan fenómenos de relajación o resonancia.

En general, las zonas de estudio muestran que en sus estratos existe un alto factor de pérdida de energía, ya que los valores de este factor son mayores que la unidad, a excepción de las capas 2, 3 y 4 de la Sección A del dique, posiblemente por constituirse de suelos arenosos.

Es importante señalar, que el fenómeno de la disminución del factor de pérdida con la frecuencia, puede generar confusiones en cuanto al comportamiento de la atenuación de las ondas. Dicho comportamiento es precisamente contrario, al analizar la ecuación de la atenuación (ecuación 2.22) y, tal como se demuestra en la Figura 6.2, se puede observar que, además del factor de pérdida, existen otros factores que influyen directamente en el cálculo de la atenuación, tales como la permitividad real y nuevamente, la frecuencia. Además, estas aseveraciones se reflejan en las Tablas 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4. Con esto se considera que la ecuación de atenuación, no sólo toma en

cuenta las pérdidas de energía ocasionadas por el medio (tangente de pérdida), sino también la energía emitida por el equipo de adquisición.

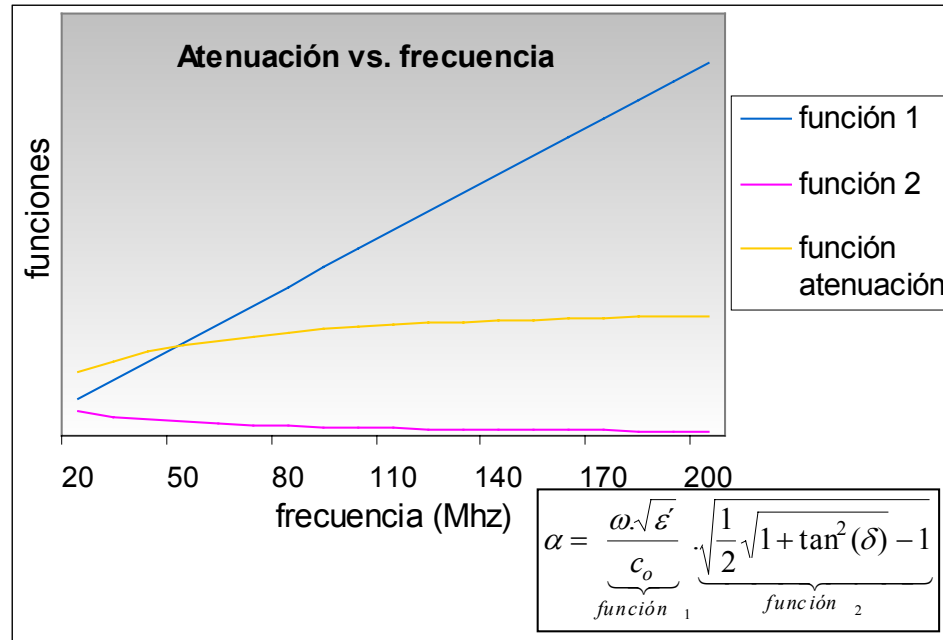


Figura 6.2. Comportamiento de la atenuación y las funciones que rigen su valor con respecto a la frecuencia. En línea azul se muestra la función 1, en fucsia la función 2 y en amarillo la atenuación.

Según los resultados obtenidos, la penetración de las ondas o la profundidad de piel en el subsuelo es muy baja. Para la Sección B y el tope de la Sección A es de 30 cm aproximadamente, para la berma 1 de la Sección A un poco más de 1 m y para el terreno natural y la zona de inyección, 10 cm.

Con respecto a la velocidad de fase, ésta aumenta de manera leve cuando aumenta la frecuencia. Por el contrario, al aumentar el volumen de agua, la velocidad de fase disminuye, ya que la velocidad del agua en ondas electromagnéticas es de 0,033 m/ns, la de los suelos es de: 0,15 m/ns para secos y 0,06 m/ns para húmedos (Tabla 2.3). Debido a esto, los estratos debajo del nivel freático, los del terreno natural y los de la zona de inyección, tienen velocidades menores que el resto de los estratos del dique, entre 0,03 y 0,04 m/ns.

Tabla 6.1. Parámetros electromagnéticos, calculados por parámetros geotécnicos, sobre el dique de la sección A

Conductividad del agua del dique: (S/m) 0,83

Estrato	Saturación	Porosidad	Humedad volumétrica	CONDUCTIVIDAD (S/m)		PERMITIVIDAD REAL	PERMITIVIDAD efectiva		PERMITIVIDAD: Efectiva/Real	
				Arcilla	Arenas		50 Mhz	100 Mhz	50 Mhz.	100 Mhz.
1	0,74	0,34	0,25	8,49E-02	8,46E-02	22,26	30,54	15,21	1,37	0,68
2	0,46	0,31	0,14	1,19E-02	1,15E-02	13,51	4,26	2,07	0,32	0,15
3	0,52	0,32	0,17	1,97E-02	1,94E-02	15,46	7,10	3,49	0,46	0,23
4	0,24	0,41	0,10	1,41E-03	1,13E-03	9,84	0,51	0,20	0,05	0,02
5	0,76	0,31	0,24	8,62E-02	8,58E-02	21,00	30,98	15,43	1,48	0,73
5(NF)	0,93	0,40	0,37	2,46E-01	2,46E-01	31,15	88,56	44,23	2,84	1,42
6	0,99	0,35	0,35	2,81E-01	2,81E-01	29,65	100,96	50,43	3,41	1,70

Continuación de la Tabla 6.1

Estrato	VELOCIDAD FASE (m/s)		ATENUACIÓN (1/m)		PROFUNDIDAD DE PIEL (m)		LONGITUD DE ONDA (m)	
	50 Mhz	100 Mhz	50 Mhz	100 Mhz	50 Mhz	100 Mhz	50 Mhz	100 Mhz
1	5,48E+07	6,04E+07	2,91	3,21	3,43E-01	3,11E-01	1,10E+00	6,04E-01
2	8,06E+07	8,13E+07	0,58	0,59	1,71E+00	1,70E+00	1,61E+00	8,13E-01
3	7,45E+07	7,58E+07	0,91	0,92	1,10E+00	1,08E+00	1,49E+00	7,58E-01
4	9,56E+07	9,56E+07	0,07	0,07	1,47E+01	1,47E+01	1,91E+00	9,56E-01
5	5,55E+07	6,18E+07	2,99	3,33	3,34E-01	3,00E-01	1,11E+00	6,18E-01
5(NF)	3,79E+07	4,59E+07	5,86	7,10	1,71E-01	1,41E-01	7,59E-01	4,59E-01
6	3,65E+07	4,52E+07	6,44	7,96	1,55E-01	1,26E-01	7,30E-01	4,52E-01

Tabla 6.2. Parámetros electromagnéticos, calculados por parámetros geotécnicos, sobre el dique de la sección B

Conductividad del agua del dique: (S/m) 0,83

Estrato	Saturación	Porosidad	Humedad volumétrica	CONDUCTIVIDAD (S/m)		PERMITIVIDAD REAL	PERMITIVIDAD efectiva		PERMITIVIDAD: Efectiva/Real	
				Arcilla	Arenas		50 Mhz	100 Mhz	50 Mhz.	100 Mhz.
1	0,72	0,36	0,26	8,26E-02	8,26E-02	23,14	29,70	14,85	1,28	0,64
2	0,62	0,32	0,2	3,91E-02	3,91E-02	18,03	14,04	7,02	0,78	0,39
2 (NF)	0,99	0,23	0,23	1,86E-01	1,86E-01	20,42	66,99	33,49	3,28	1,64
3	0,99	0,36	0,36	2,88E-01	2,88E-01	30,35	103,53	51,76	3,41	1,71
4	1	0,41	0,41	3,38E-01	3,38E-01	34,19	121,50	60,75	3,55	1,78

Continuación de la Tabla 6.2

Estrato	VELOCIDAD FASE (m/s)		ATENUACIÓN (1/m)		PROFUNDIDAD DE PIEL (m)		LONGITUD DE ONDA (m)	
	50 Mhz	100 Mhz	50 Mhz	100 Mhz	50 Mhz	100 Mhz	50 Mhz	100 Mhz
1	5,44E+07	5,96E+07	2,82	3,09	3,54E-01	3,23E-01	1,09E+00	5,96E-01
2	6,63E+07	6,94E+07	1,63	1,70	6,14E-01	5,88E-01	1,33E+00	6,94E-01
2 (NF)	4,46E+07	5,49E+07	5,22	6,43	1,92E-01	1,56E-01	8,92E-01	5,49E-01
3	3,61E+07	4,46E+07	6,52	8,07	1,53E-01	1,24E-01	7,21E-01	4,46E-01
4	3,35E+07	4,16E+07	7,11	8,83	1,41E-01	1,13E-01	6,70E-01	4,16E-01

Tabla 6.3. Parámetros electromagnéticos, calculados por parámetros geotécnicos, sobre el terreno natural de la sección B

Conductividad del agua del dique: (S/m) 0,83

Estrato	Saturación	Porosidad	Humedad volumétrica	CONDUCTIVIDAD (S/m)		PERMITIVIDAD REAL	PERMITIVIDAD efectiva		PERMITIVIDAD: Efectiva/Real	
				Arcilla	Arenas		50 Mhz	100 Mhz	50 Mhz.	100 Mhz.
1	0,95	0,40	0,38	2,32E-01	2,31E-01	32,13	83,29	41,59	2,59	1,29
2	0,80	0,53	0,42	1,52E-01	1,52E-01	35,02	54,64	27,28	1,56	0,78
3	0,92	0,61	0,56	3,59E-01	3,59E-01	44,40	128,98	64,46	2,90	1,45
4	1,00	0,76	0,76	6,31E-01	6,31E-01	57,17	226,82	113,39	3,97	1,98
5	0,88	0,48	0,42	2,39E-01	2,39E-01	35,06	85,89	42,90	2,45	1,22

Continuación de la Tabla 6.3

Estrato	VELOCIDAD FASE (m/s)		ATENUACIÓN (1/m)		PROFUNDIDAD DE PIEL (m)		LONGITUD DE ONDA (m)	
	50 Mhz	100 Mhz	50 Mhz	100 Mhz	50 Mhz	100 Mhz	50 Mhz	100 Mhz
1	3,64E+07	4,44E+07	6,27	7,66	1,59E-01	1,31E-01	7,27E-01	4,44E-01
2	4,07E+07	4,66E+07	4,60	5,27	2,17E-01	1,90E-01	8,14E-01	4,66E-01
3	3,15E+07	3,83E+07	7,10	8,62	1,41E-01	1,16E-01	6,31E-01	3,83E-01
4	2,49E+07	3,12E+07	9,85	12,38	1,02E-01	8,08E-02	4,97E-01	3,12E-01
5	3,75E+07	4,46E+07	5,62	6,68	1,78E-01	1,50E-01	7,50E-01	4,46E-01

Tabla 6.4. Parámetros electromagnéticos, calculados por parámetros geotécnicos, sobre la zona de inyección

Conductividad de agua fresca:(S/m) 0,05

Conductividad agua de rípos: (S/m) 0,7

Estrato	Saturación	Porosidad	Humedad volumétrica	CONDUCTIVIDAD (S/m)	PERMITIVIDAD REAL	PERMITIVIDAD efectiva	PERMITIVIDAD: Imaginaria/Real
						100 Mhz	100 Mhz.
1	0,98	0,70	0,69	2,65E-01	52,89	47,61	0,90
2	0,97	0,66	0,64	2,98E-01	49,79	53,53	1,07
3	1,00	0,80	0,80	5,66E-01	59,65	101,78	1,71
4	0,76	0,52	0,39	3,54E-01	32,91	63,57	1,93
5	0,76	0,40	0,30	1,09E-01	26,21	19,66	0,75

Continuación de la Tabla 6,4

Estrato	VELOCIDAD FASE (m/s)	ATENUACIÓN (1/m)	PROFUNDIDAD DE PIEL (m)	LONGITUD DE ONDA (m)
	100 Mhz	100 Mhz	100 Mhz.	100 Mhz
1	4,03E+07	3,37	2,97E-01	4,03E-01
2	3,82E+07	7,16	1,40E-01	3,82E-01
3	3,18E+07	11,32	8,84E-02	3,18E-01
4	4,90E+07	4,45	2,25E-01	4,90E-01
5	5,52E+07	3,79	2,64E-01	5,52E-01

6.3 Procesamiento de los radargramas

Los radargramas adquiridos, tanto los de reflexión como los de CMP, se les aplicó un filtro temporal *Dewow* y una ganancia AGC. La Figura 6.3 muestra un prototipo de las imágenes que se obtuvieron de los perfiles antes y después de la aplicación de estas técnicas de procesamiento.

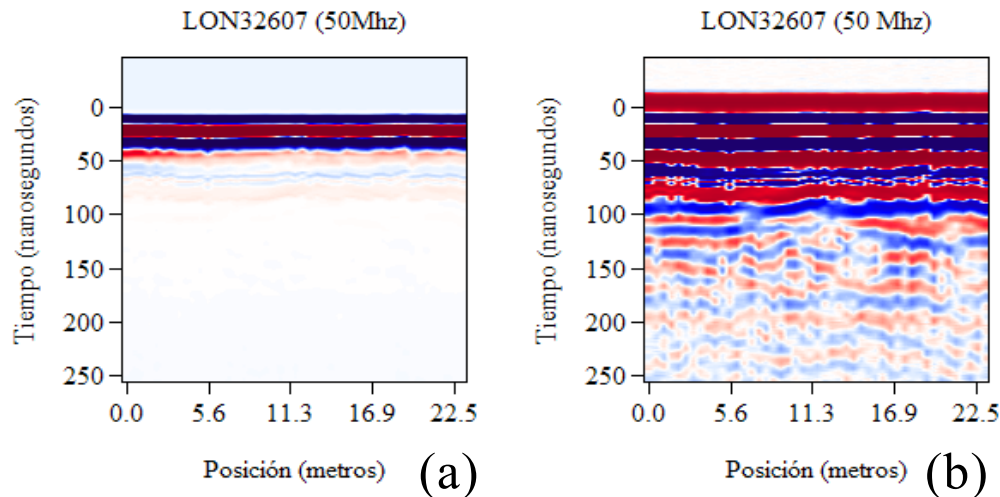


Figura 6.3. Perfiles de Radargramas. (a) sin ningún tipo de procesamiento (b) con filtro “*Dewow*” y Ganancia AGC

La Figura 6.3(a) corresponde a los datos originales de campo, los cuales se ajustan a los resultados obtenidos en las Tablas 6.1-6.4, relativos al factor de pérdida, atenuación y profundidad de piel. La relación entre las Figuras 6.3(a) y 6.3(b) establece la necesidad de aplicar estas herramientas de procesamiento a los radargramas que se adquieren en suelos de alta atenuación, con el objetivo de apreciar reflexiones a mayores profundidades.

De lo antes expuesto, a cada perfil analizado, tanto de tipo CMP o de tipo reflexión, se le aplicó la ganancia AGC y filtro temporal “*Dewow*”, a fin de favorecer las interpretaciones concernientes a los mismos. Si bien es claro que tanto la ganancia AGC como el filtro “*Dewow*” pueden recuperar las señales más profundas, se hace necesario, a la vez, especificar que dicho efecto depende del grado de atenuación y de los coeficientes de reflexión y transmisión del medio de propagación.

En el caso de la Sección B y el tope del dique de la Sección A, las atenuaciones son mayores y los coeficientes de reflexión son menores a los registrados en la berma 1 de la Sección A (Tablas 6.1 y 6.2). Por lo tanto, el efecto que puede causar el AGC en esta última zona es mayor que en el resto del dique (Figuras 6.15-6.18).

6.4 Perfiles de tipo CMP

Los 19 perfiles de tipo CMP realizados mediante el programa “*Win Ekko Pro*”, muestran que las velocidades que más favorecen a la suma de amplitudes en el análisis de CMP son las superiores a 0,2 m/ns. Estas velocidades se concentran en los primeros 100 ns en los perfiles donde no existen ruidos ambientales presentes durante toda la adquisición (Figuras 6.4 y 6.5).

Es importante destacar que si el ruido es circunstancial, como el paso de un carro o llamadas de celulares, etc., se observan respuestas como la Figura 6.5 (a). Este ruido no afecta a la interpretación de los análisis de CMP, debido a que son eliminados en el instante de ser sumadas.

La velocidad de las ondas electromagnéticas en el aire es de 0,3 m/ns, y la velocidad máxima medida que puede poseer un suelo es de 1,5 m/ns, correspondiente a suelos secos (Tabla 2.3). Comparando estas velocidades con las obtenidas en el análisis de CMP, se podría confirmar la influencia de la capa de aire en los radargramas adquiridos.

Comparando la frecuencia de las antenas utilizadas en la adquisición y los análisis de CMP respectivos, se aprecia una diferencia entre ambas. Las antenas de 100 Mhz ofrecen mayor precisión en la ubicación en tiempo de la velocidad de los reflectores, mientras que las antenas de 50 Mhz presentan velocidades en un rango de tiempo más amplio. Esta diferencia puede ser poco trascendental cuando el objetivo buscado son velocidades representativas y no la precisión de la ubicación en tiempo de reflectores de interés.

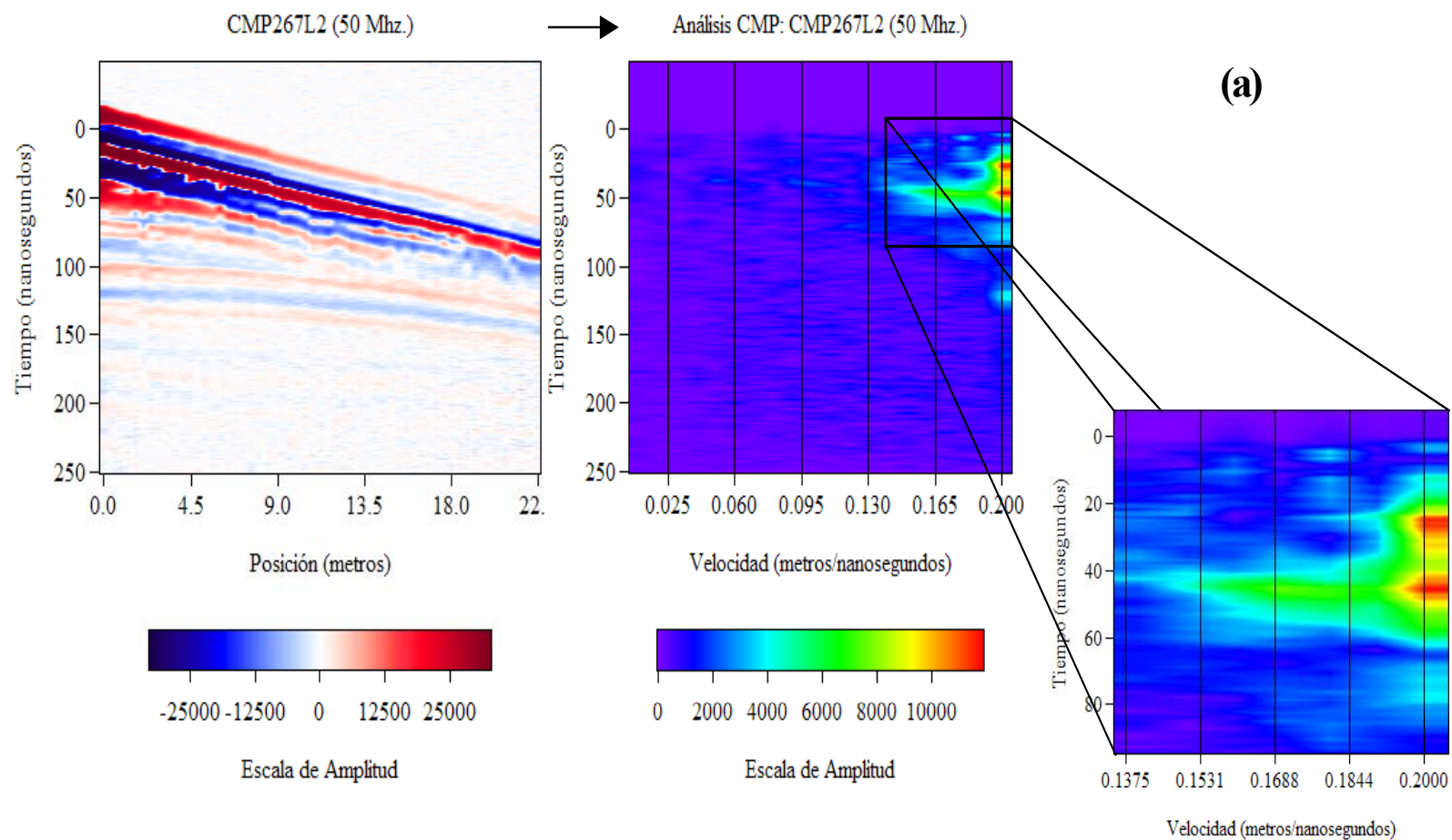


Figura 6.4. (a). Análisis de CMP de perfiles adquiridos sobre el tope de la Sección B, utilizando la antena de 50 Mhz.

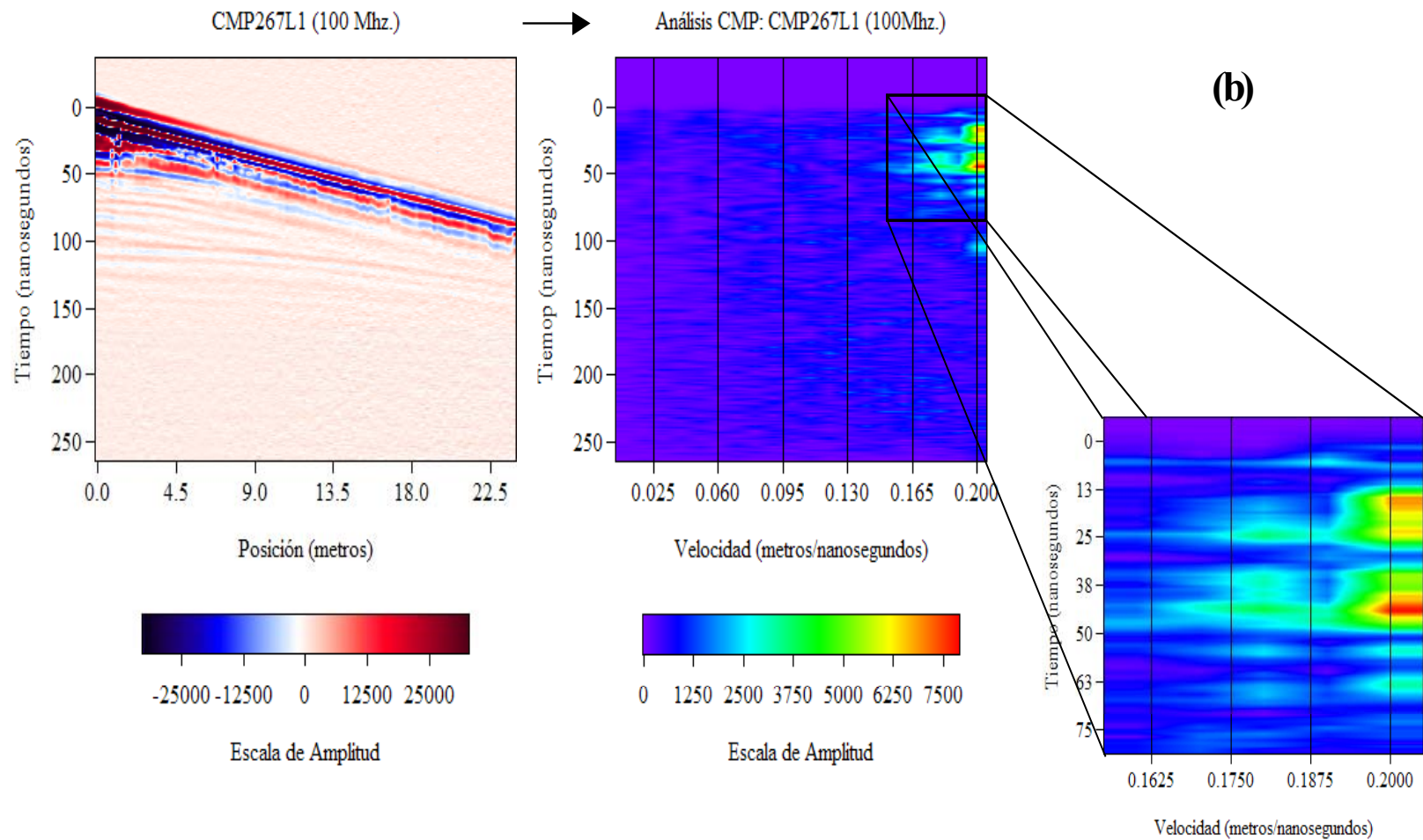


Figura 6.4. (b). Análisis de CMP de perfiles adquiridos sobre el tope de la Sección B, utilizando la antena de 100 Mhz.

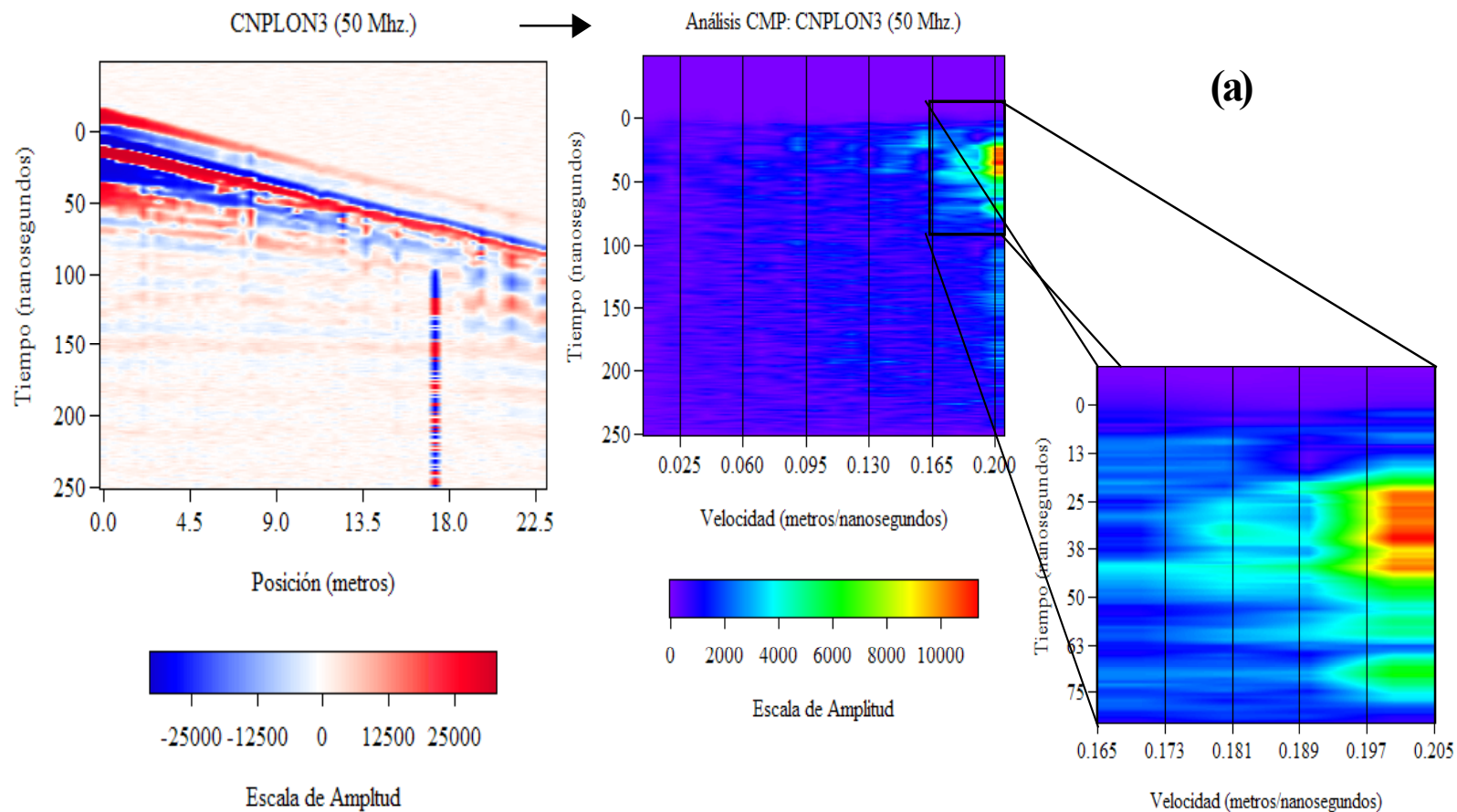


Figura 6.5.(a). Análisis de CMP de perfiles adquiridos sobre el tope de la Sección A, utilizando la antena de 50 Mhz.

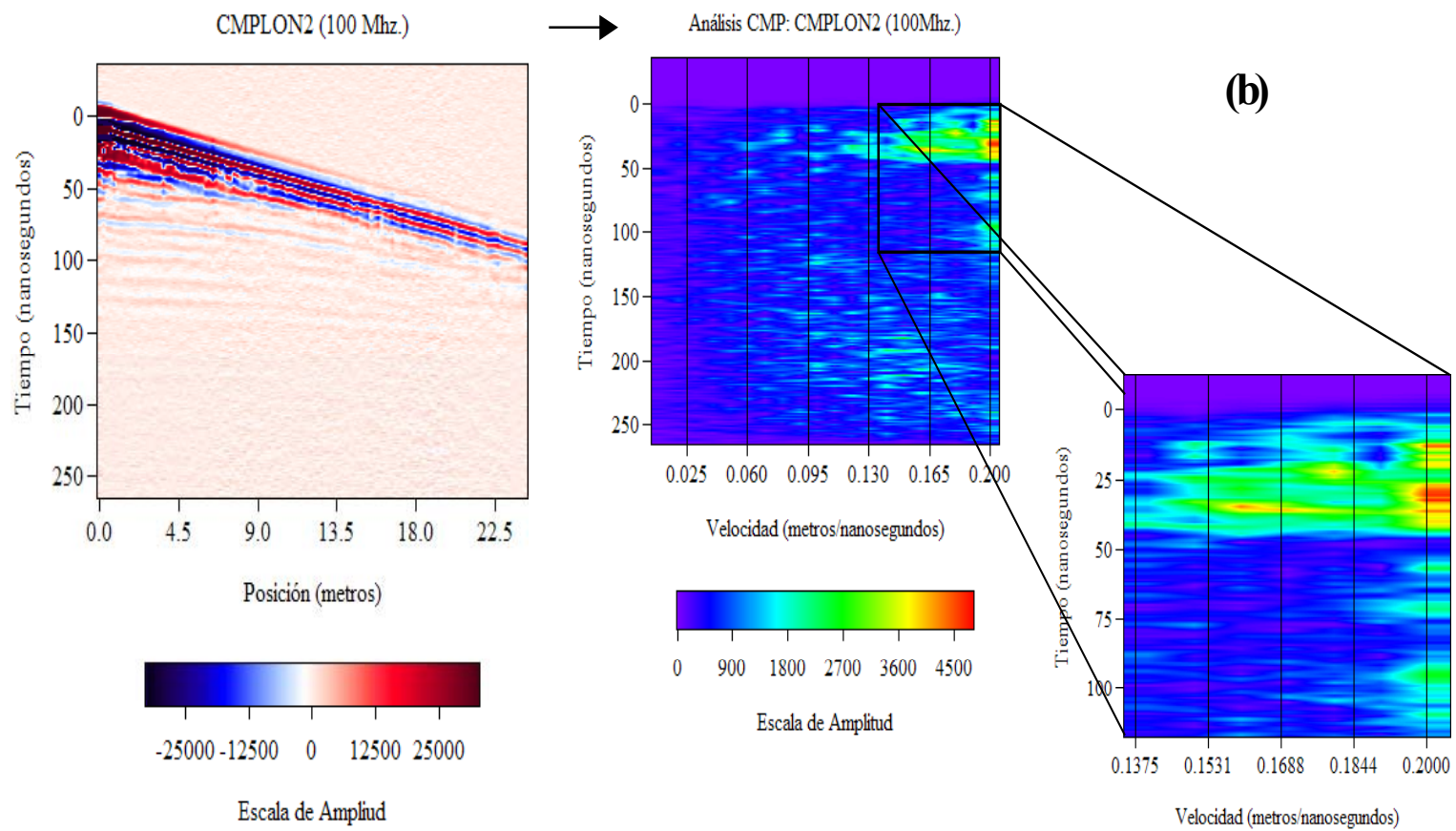


Figura 6.5.(b). Análisis de CMP de perfiles adquiridos sobre el tope de la Sección A, utilizando la antena de 100 Mhz.

Los perfiles de CMP ubicados en la berma 1 y el terreno natural de la Sección B, identificados como: TRCMPL1, TRCMPL2, CMP267L5, CMP267L6, CMPT1NA5 y CMPT2NA5, muestran una respuesta continua a 150 ns (Figuras 6.6-6.8). Esta indica que la medida en el tiempo es la misma, independientemente de la separación de las antenas. Dicho fenómeno podría atribuirse al ruido causado por la presencia de una reja de seguridad ubicada en la zona de adquisición (Figura 5.9).

Con respecto al perfil de CMP realizado sobre el enrocado (Figura 6.9), se observa claramente la onda directa del aire, y luego reflectores discontinuos generados por las irregularidades de la superficie hasta unos 120 ns aproximadamente. Luego se observa un reflector, a 125 ns, el cual se encuentra dentro del rango de velocidades superiores a 0,2 m/ns según el análisis de CMP.

Las irregularidades del enrocado descritas anteriormente, se ven reflejadas en el análisis de CMP mediante diferentes valores de amplitud para un mismo tiempo. Por otro lado, el reflector observado a 125 ns puede ser causado por posibles reflexiones del agua del lago o el tablestacado que aísla al dique.

Los perfiles de CMP en la zona de inyección (Figura 6.10), al poseer también las mismas analogías de los perfiles anteriores, tienen velocidades que corresponden a valores superiores a 0,2 m/ns y que se concentran en los primeros 100 ns. Del mismo modo, se puede aplicar el mismo criterio de análisis.

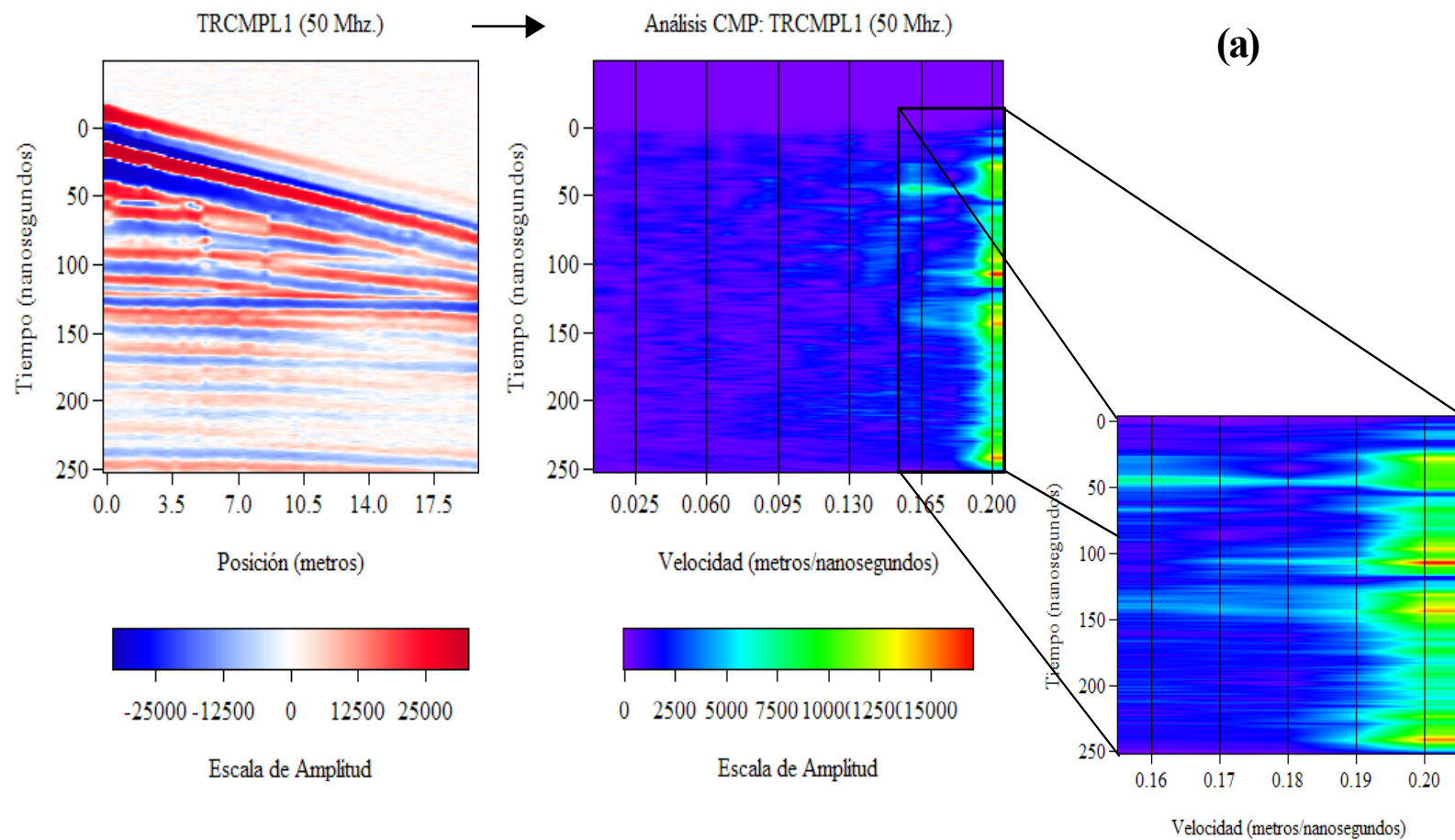


Figura 6.6.(a). Análisis de CMP de perfiles adquiridos sobre la berma 1 de la Sección B, utilizando la antena de 50 Mhz.

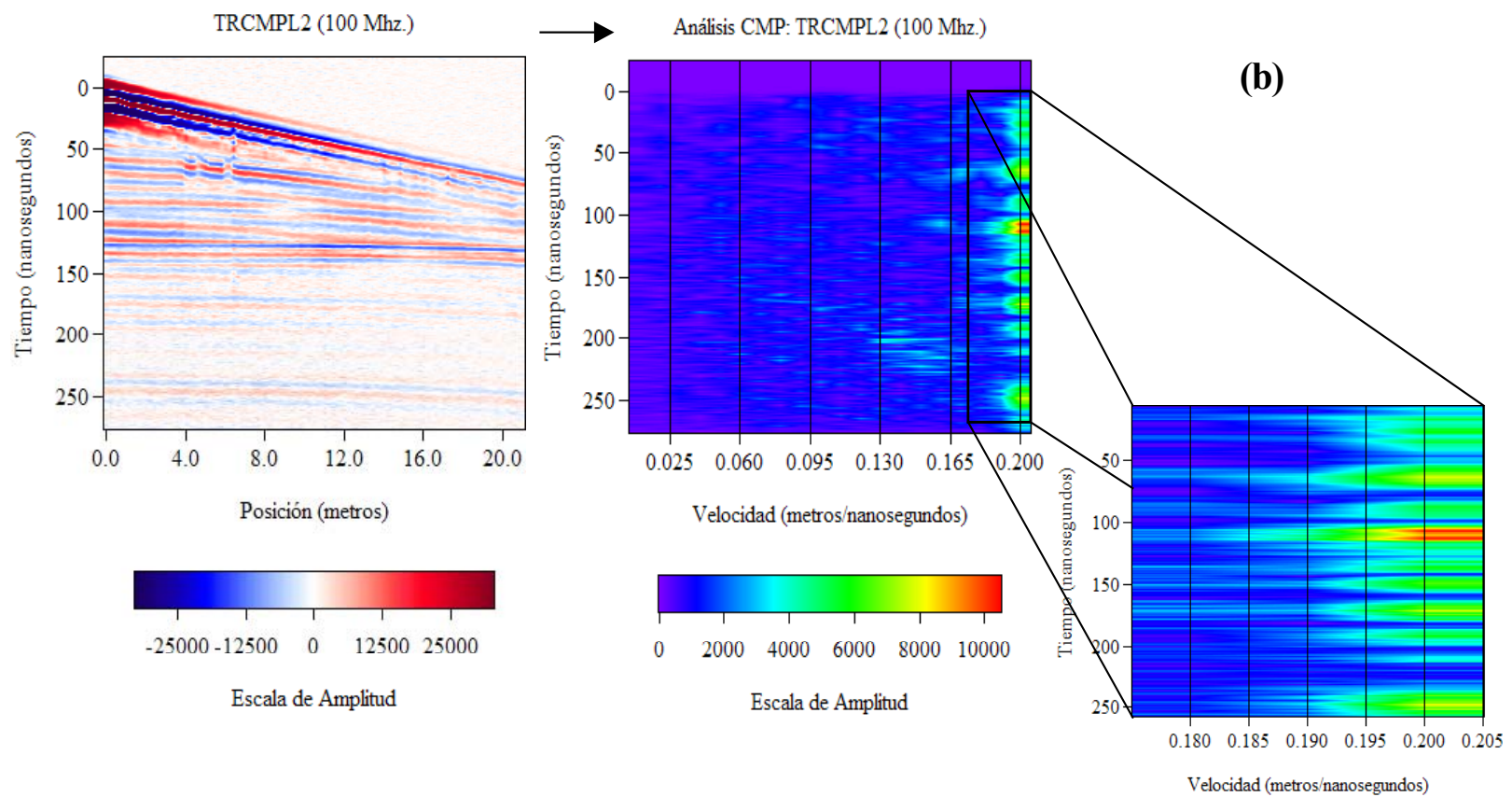


Figura 6.6.(b). Análisis de CMP de perfiles adquiridos sobre la berma 1 de la Sección B, utilizando la antena de 100 Mhz.

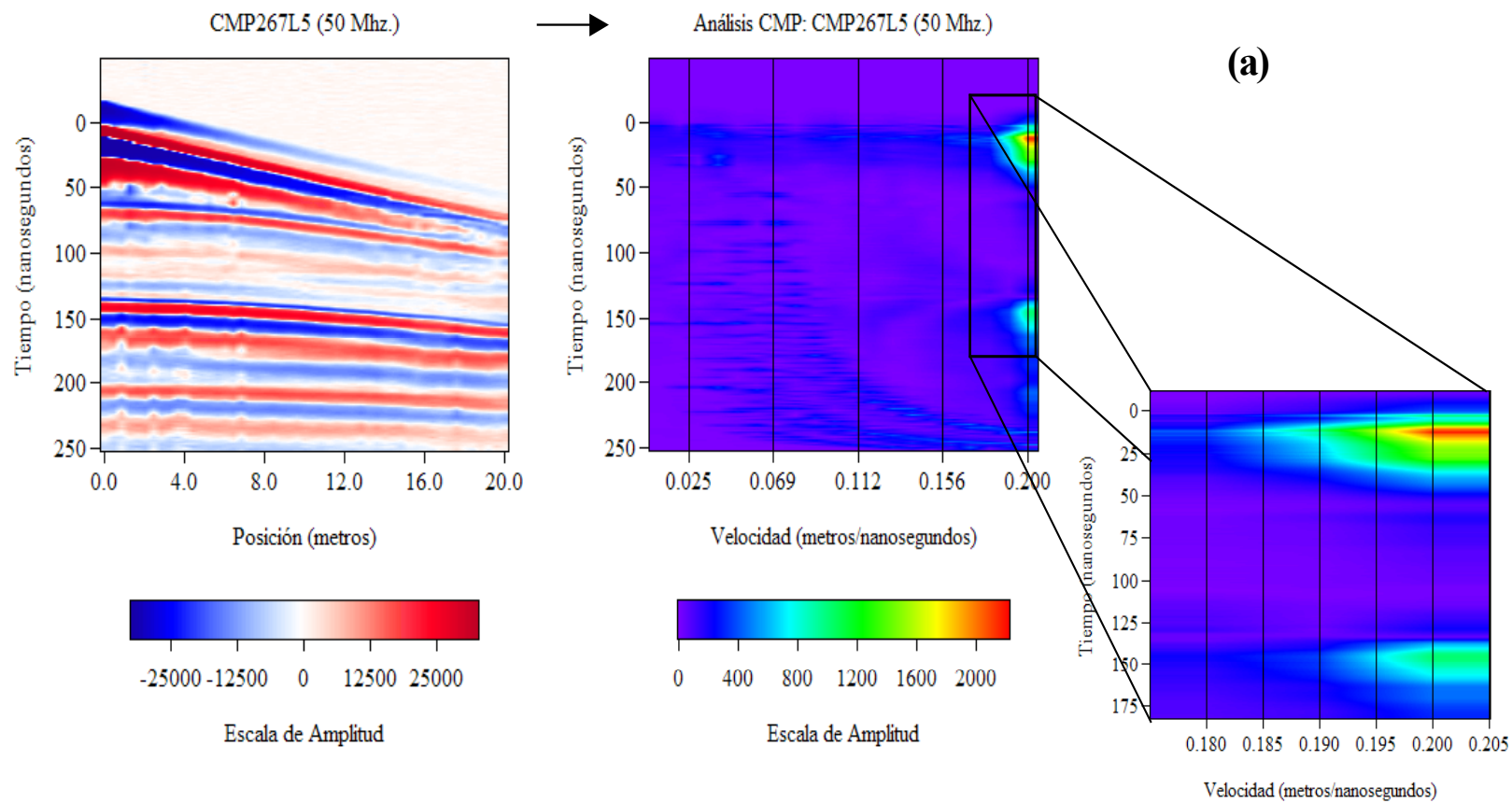


Figura 6.7.(a). Análisis de CMP de perfiles longitudinales, adquiridos sobre el terreno natural de la Sección B, utilizando la antena de 50 Mhz.

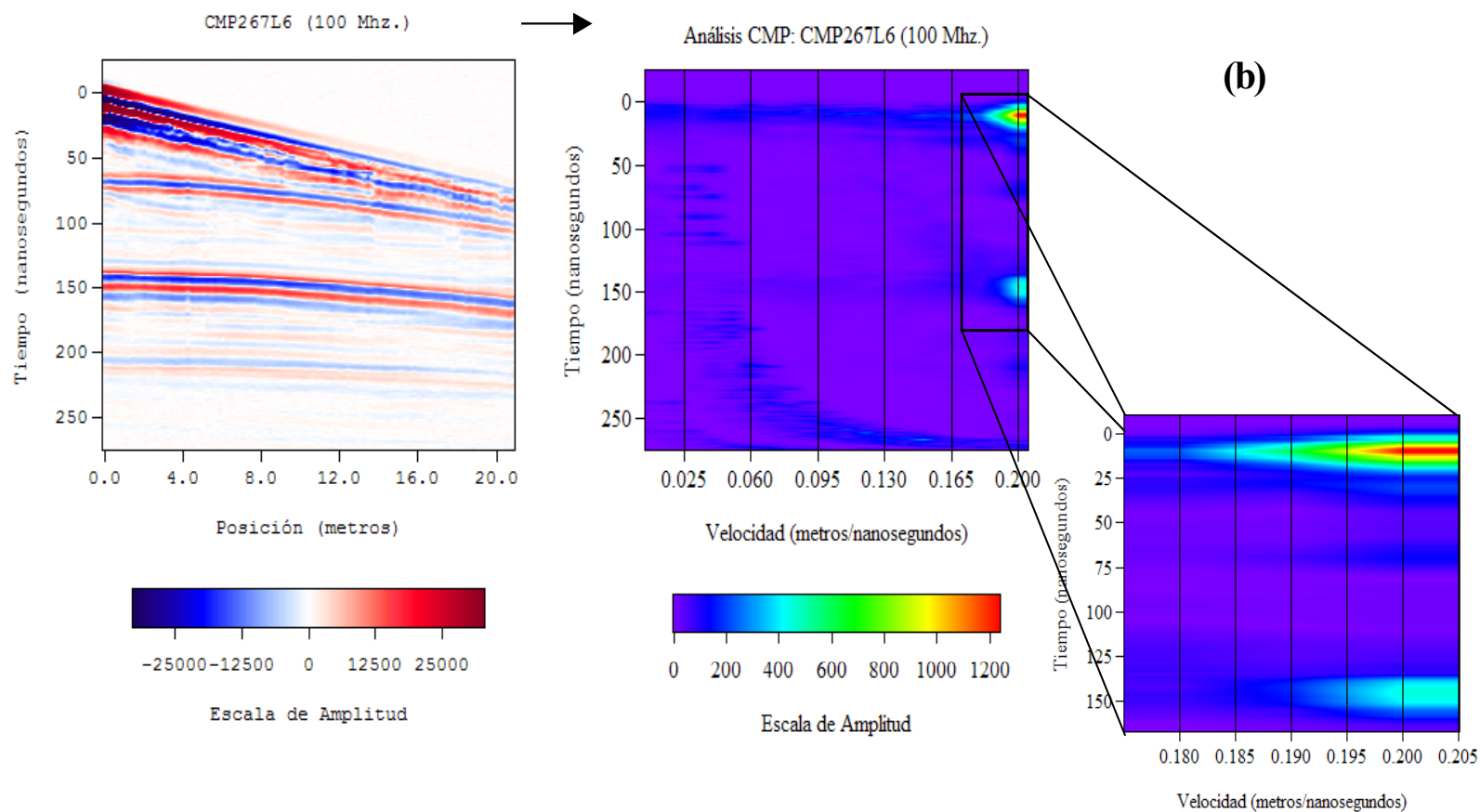


Figura 6.7.(b). Análisis de CMP de perfiles longitudinales, adquiridos sobre el terreno natural de la Sección B, utilizando la antena de 100 Mhz.

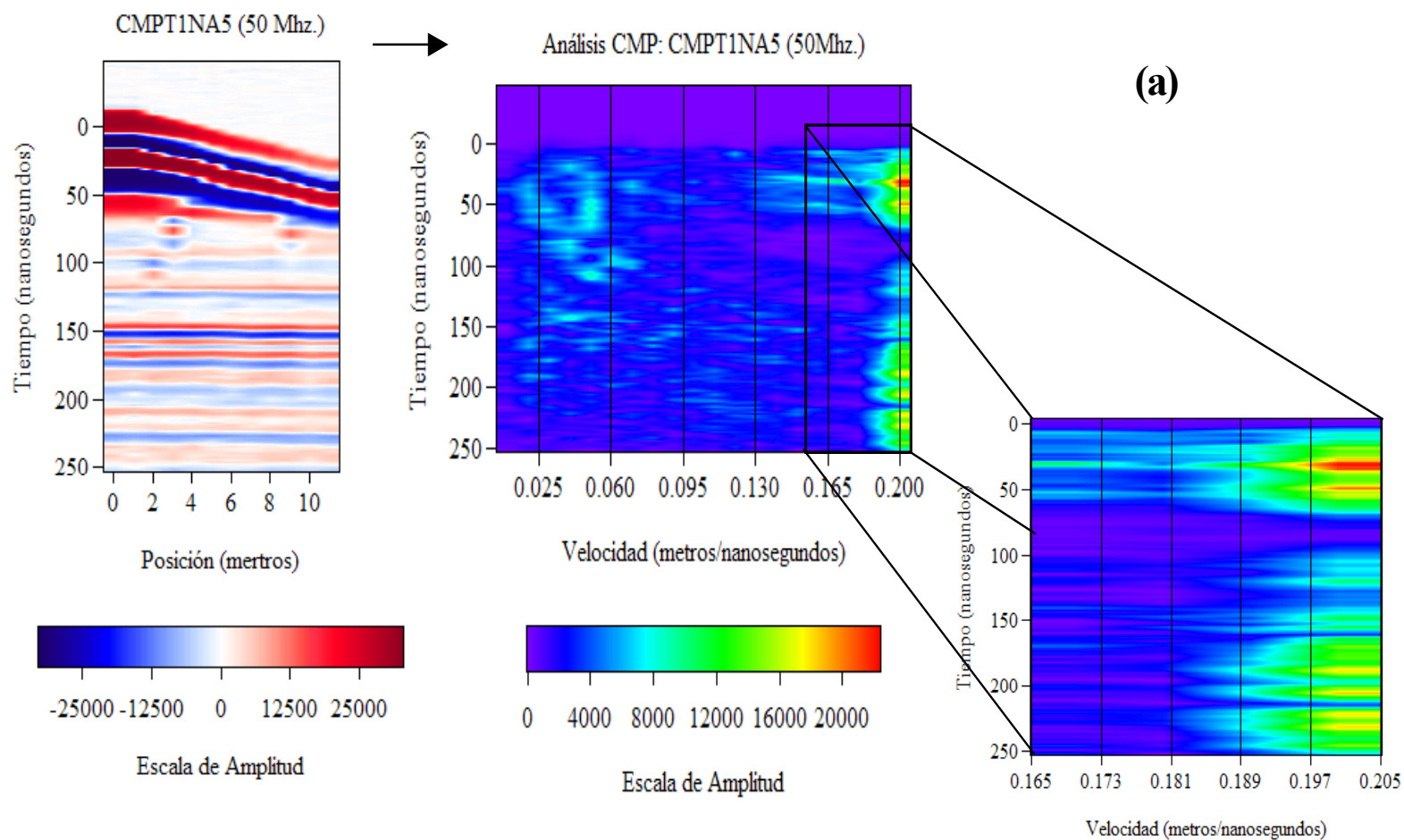


Figura 6.8. (a). Análisis de CMP de perfiles transversales, adquiridos sobre el terreno natural de la Sección B, utilizando la antena de 50 Mhz

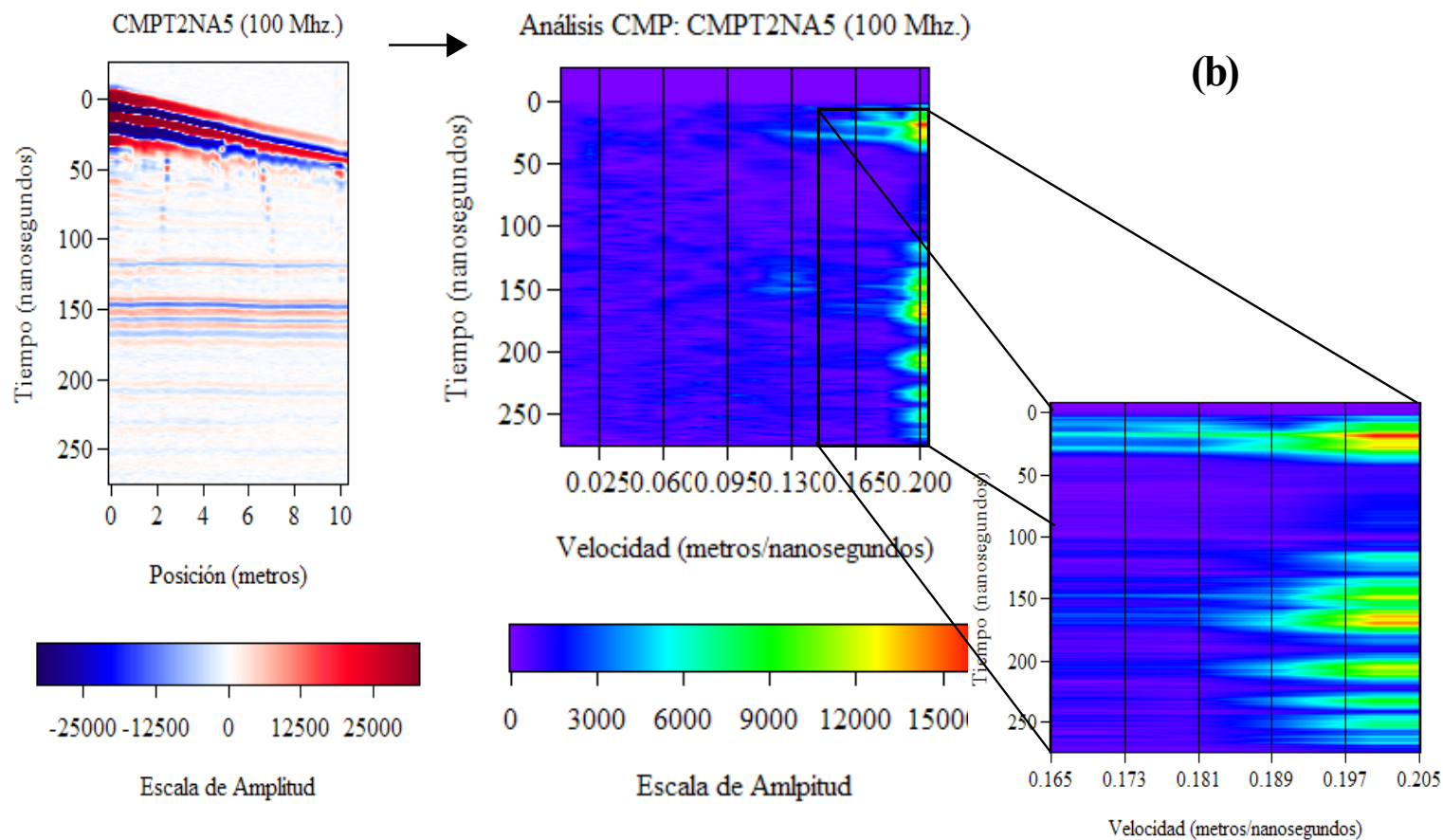


Figura 6.8. (b). Análisis de CMP de perfiles transversales, adquiridos sobre el terreno natural de la Sección B, utilizando la antena de 100 Mhz.

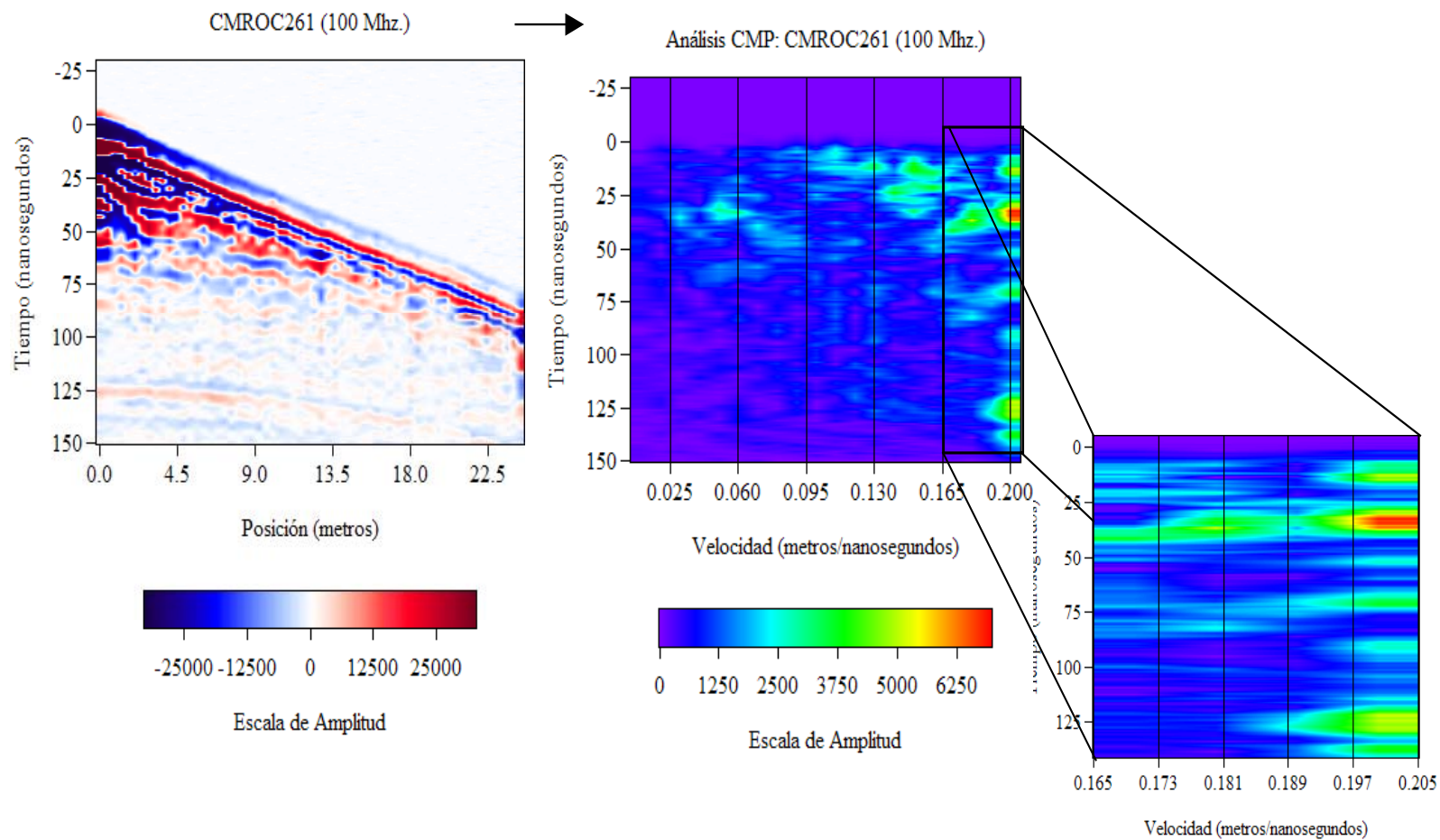


Figura 6.9. Análisis de CMP de perfil adquirido sobre las rocas.

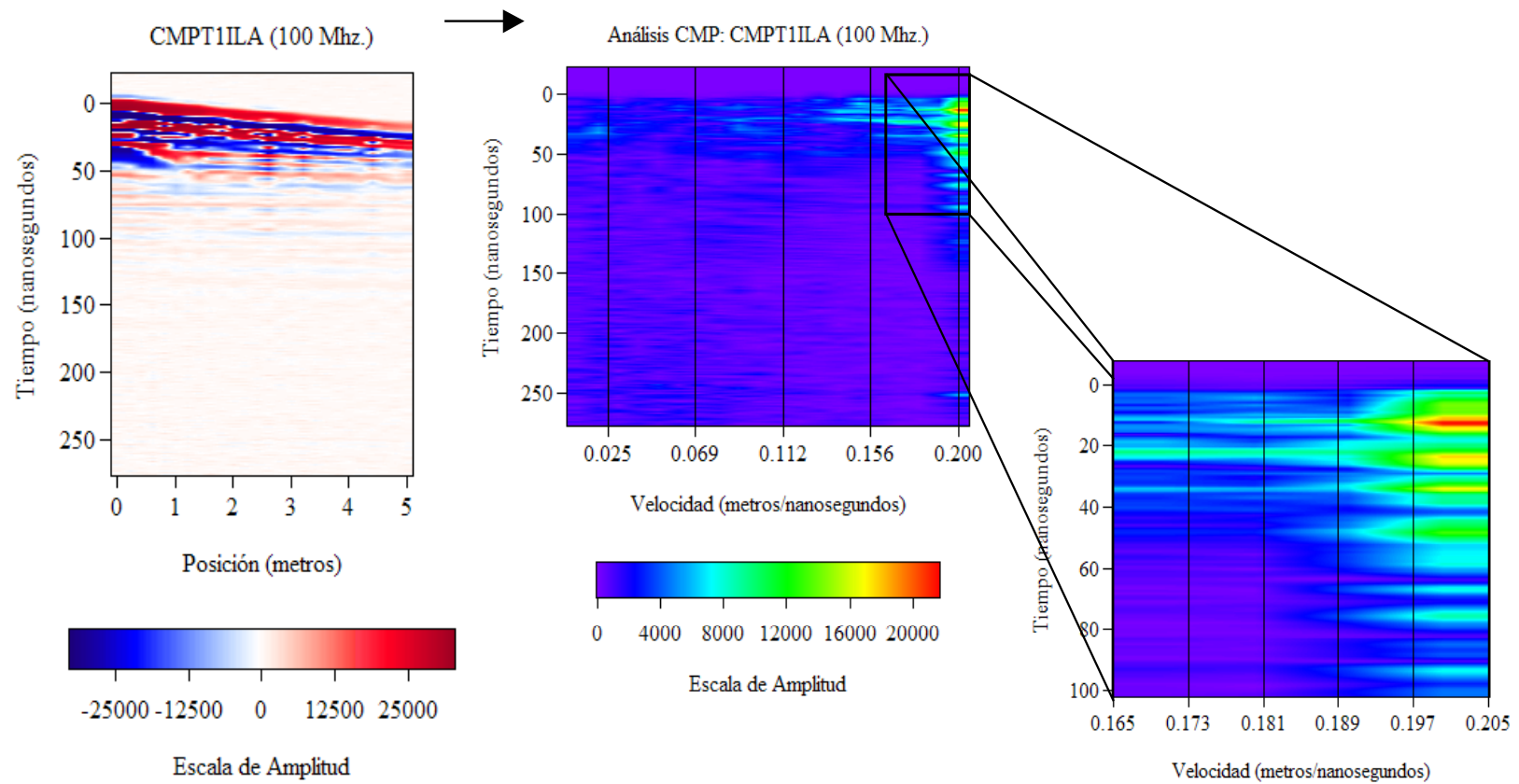


Figura 6.10. Análisis de CMP de perfil adquirido en la zona de inyección.

Se mencionó que “todos” los perfiles de CMP tienen tales valores de velocidad, ya que se encontraban influenciados por la capa de aire. Por lo tanto, se puede explicar que la baja penetración, es decir, que la concentración de la energía en los primeros 100 ns es debida a que los estratos poseen un factor de pérdida de energía alto, lo cual es coherente con las Tablas 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4

6.5 Perfiles adquiridos sobre rocas

Los análisis de los perfiles realizados sobre las rocas se integraron con los perfiles adquiridos sobre el talud aguas arriba, por la cercanía entre ellos y para estudiar sobre cambios entre el contraste de materiales del dique con la zona del enrocado (Figura 5.10).

Los perfiles que se encuentran sobre el enrocado (Figuras 6.12 y 6.13), poseen una condición particular: existen considerables irregularidades en su superficie que impiden el contacto directo entre las antenas del GPR y el suelo. Este hecho afecta considerablemente la direccionalidad de las antenas del radar, causando una desviación de gran parte de la energía hacia el aire.

Con esta afirmación y la cercanía del lago, la cual causa una gran atenuación de la energía, se puede inferir que las penetraciones encontradas en los perfiles sobre el enrocado sean sólo debidas a múltiples reflexiones o rebotes sobre las piedras y no realmente a una penetración hacia el subsuelo.

Con respecto a las profundidades de penetración de los perfiles adquiridos sobre el talud aguas arriba, 150 ns aproximadamente (Figuras 6.11 y 6.14), éstas no están tan afectadas por irregularidades superficiales como el enrocado, ya que si bien existen fragmentos de rocas, estos sólo miden centímetros de espesor.

El segundo factor es el comportamiento en la continuidad de los reflectores, el cual depende notablemente de la frecuencia de las antenas, ya que las reflexiones que

puedan ser causadas por rocas o espacios menores que la longitud de onda se ignoran. Se sabe que a menores frecuencias la longitud de la onda aumenta y, por lo tanto, disminuye la posibilidad de ver detalles de pequeños espacios.

Las Figuras 6.12 y 6.13 son un claro ejemplo de lo antes explicado, ya que los perfiles con las antenas de 50 Mhz presentan una continuidad en los reflectores, que muestran la exclusión del enrocado presente. Con la antena de 100 Mhz, se observan discontinuidades substanciales, debido a las reflexiones causadas por el enrocado.

El tercer factor es la existencia de un tablestacado en las secciones estudiadas, cuya función es, en este caso en particular, minimizar la saturación del cuerpo del dique y alargar el recorrido del flujo de agua bajo el mismo. Esta función lo convierte en un factor determinante en la profundidad de los reflectores de los perfiles ubicados sobre el talud aguas arriba.

Los reflectores continuos sobre el talud aguas arriba llegan a una profundidad aproximada de 50 ns para la Sección A y 100 ns para la Sección B. A partir de esta profundidad, se observan considerables irregularidades que podrían atribuirse al contenido de agua en el subsuelo.

Por último, en la Figura 6.13 se observa un reflector a 150 ns, el cual puede ser atribuirse a la reflexión del tablestacado o al nivel de agua en el Lago de Maracaibo. La última opción es menos probable debido a que el nivel de agua se encontraba a una profundidad menor que a un metro, y su valor correspondiente en tiempo (su máximo valor es 10 ns) no se corresponde con la llegada del reflector mencionado.

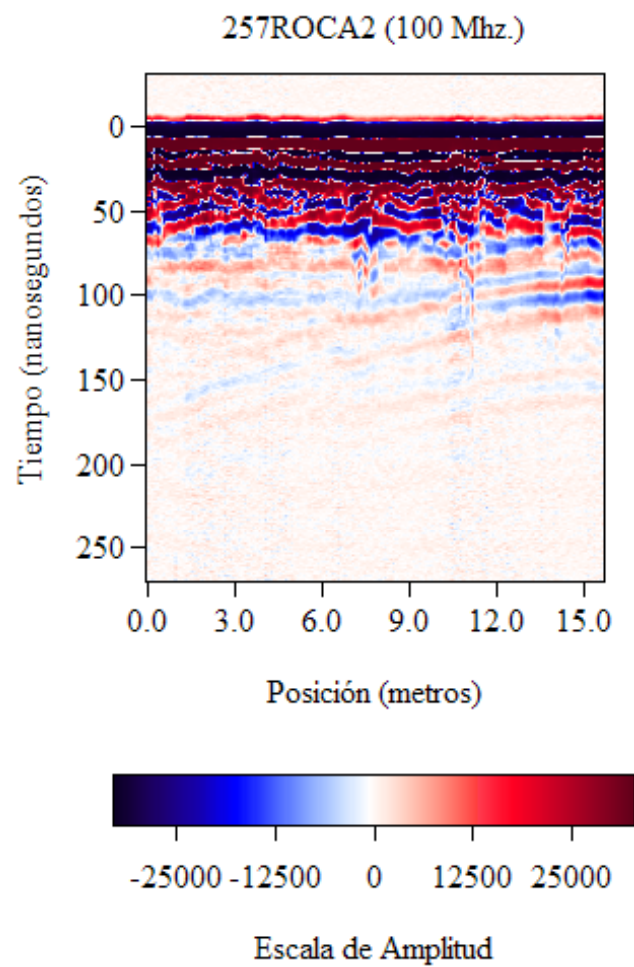


Figura 6.11. Perfil de tipo reflexión adquirido sobre el talud aguas arriba de la Sección A, utilizando antena de 100 Mhz.

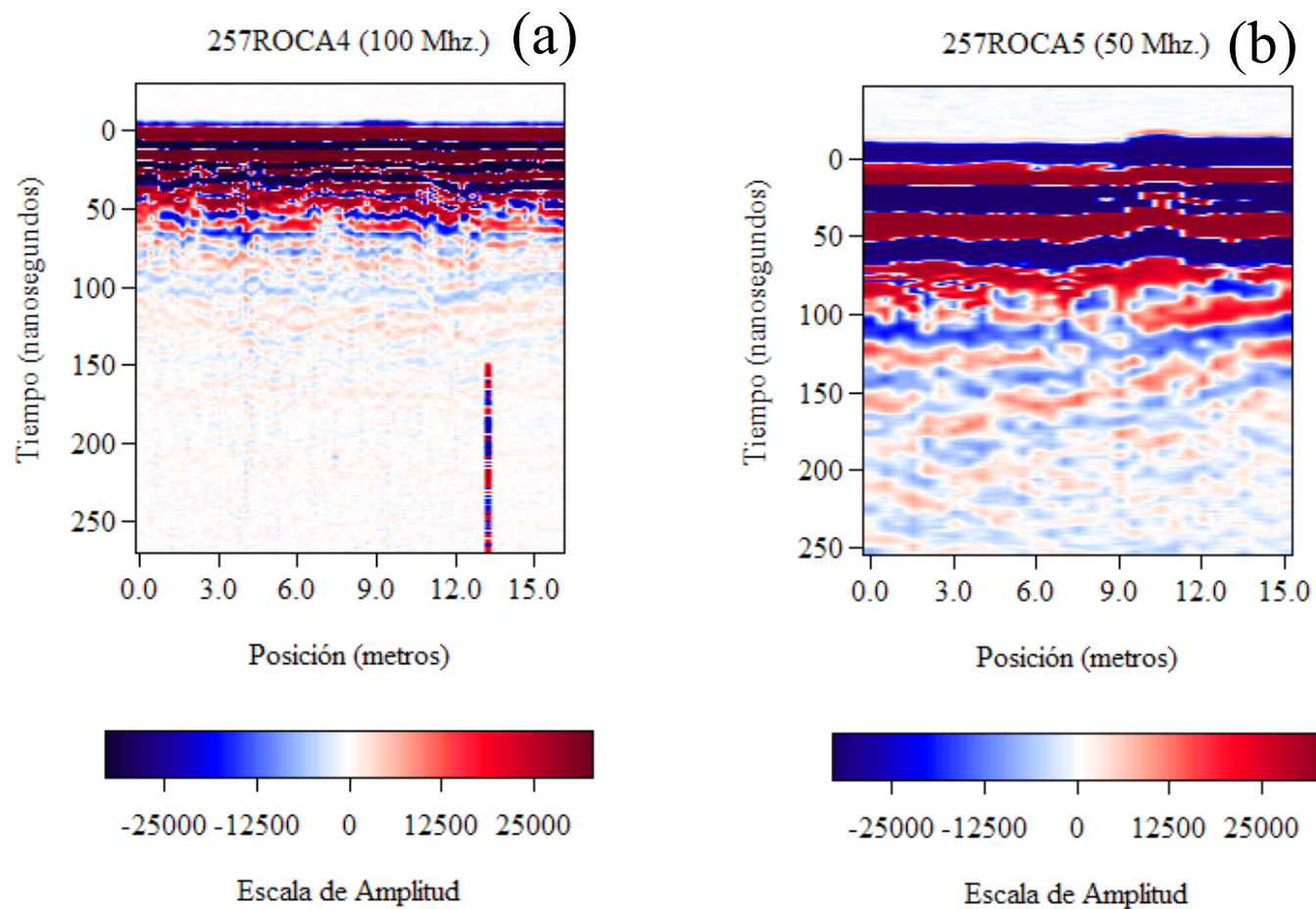


Figura 6.12. Perfiles de tipo reflexión adquiridos sobre rocas de la Sección A, utilizando las antenas de (a)100 Mhz. (b) 50 Mhz.

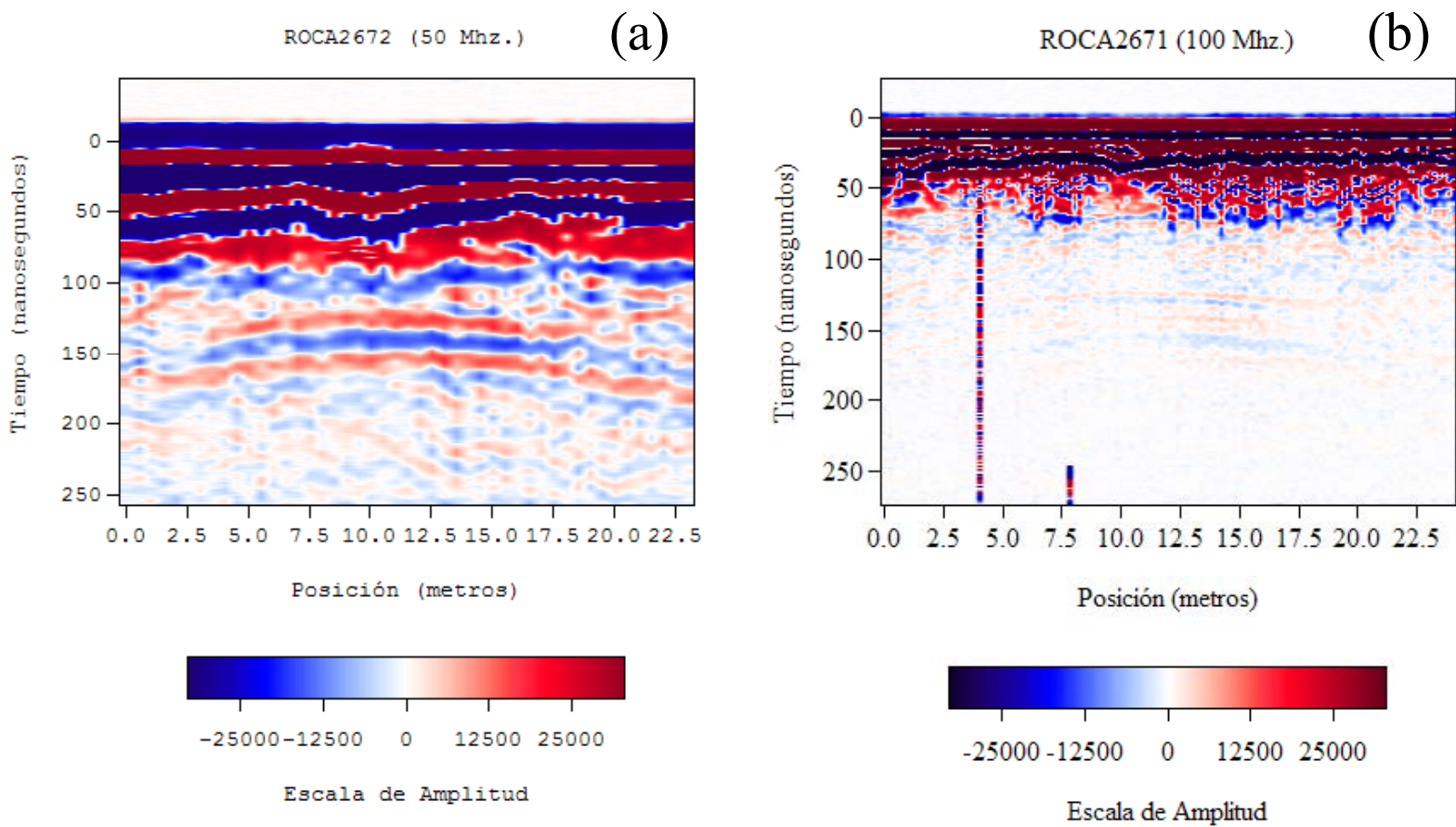


Figura 6.13. Perfiles de tipo reflexión, adquiridos sobre rocas de la Sección B, utilizando las antenas de (a) 50 Mhz. (b) 100 Mhz.

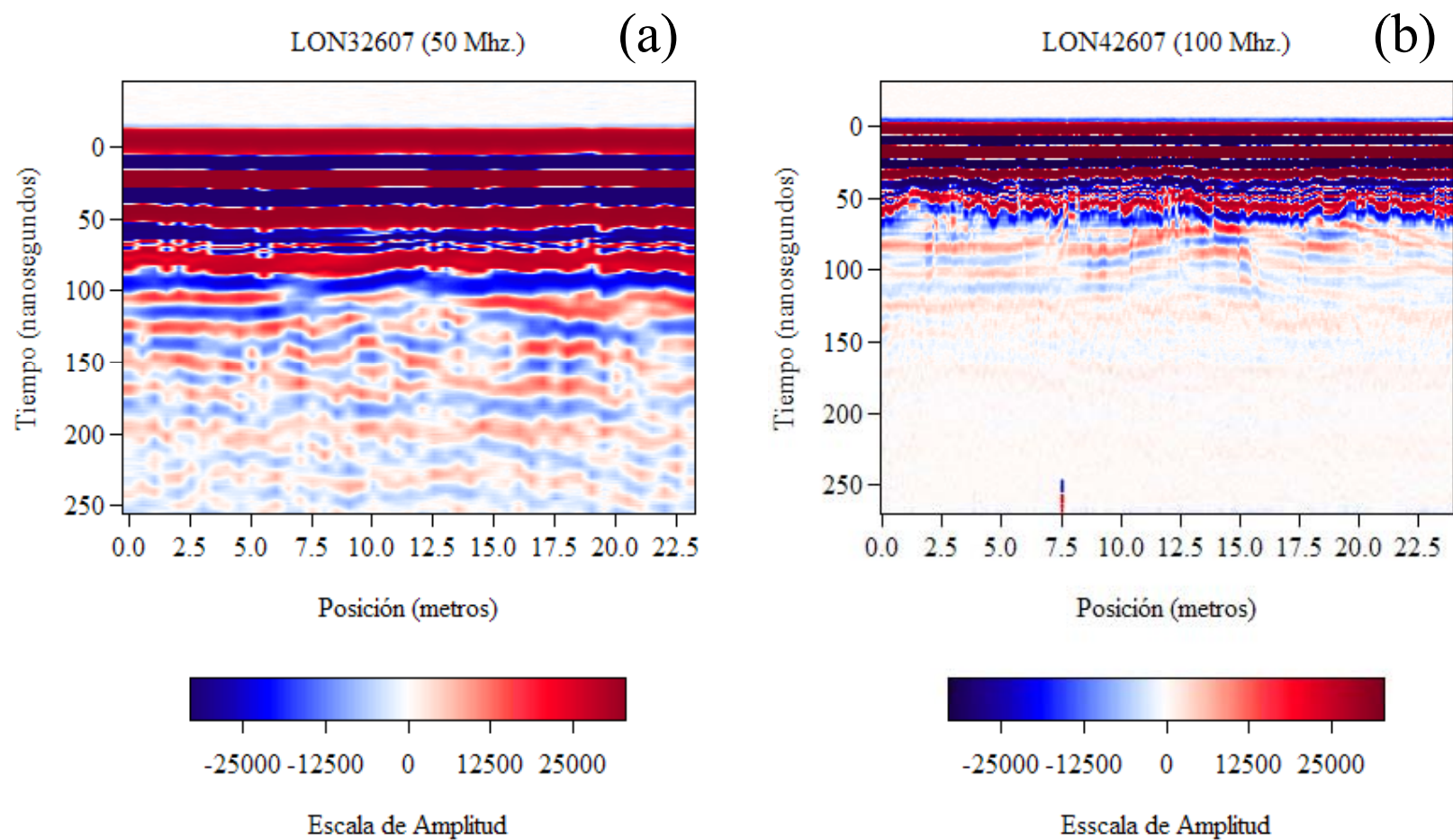


Figura 6.14. Perfiles de tipo reflexión, adquiridos sobre el talud aguas arriba de la Sección B, utilizando las antenas de (a) 50 Mhz. (b) 100 Mhz.

6.6 Perfiles y trazas sintéticas sobre el dique

En la mayoría de los perfiles (Figuras 6.15-6.18), aunque hayan sido sometidos al procesamiento descrito, se observa que las máximas amplitudes se encuentran en las primeras llegadas, entre 0,45–0,7 ns, las cuales se pueden atribuir a las ondas directas de aire y del primer estrato. Próximo a este fenómeno, ocurre la reflexión de la primera interfaz contemplada en las trazas sintéticas (Figuras 6.15-6.18). Estas pueden asignarse a las amplitudes que se encuentran exactamente después de las primeras llegadas, donde los tiempos de la reflexión de la primera interfaz son: en el tope del dique entre 100 y 90 ns y en la berma 75 y 80 ns, para las Secciones A y B respectivamente.

Se ha especificado que el radar de penetración de suelos es un método muy eficiente para definir el nivel freático. Sin embargo, las respuestas obtenidas en el tope del dique de la Sección A no lo indican en forma evidente, quizás a causa de la saturación de agua y la notable atenuación del primer estrato de arcilla.

El nivel freático en el tope de la Sección B (Figura 6.17) se puede relacionar con un reflector ubicado aproximadamente a 170 ns en el radargrama discreto, observándose a 210 ns según el sintético. El interés de disminuir esta diferencia de tiempo entre la traza sintética y el radargrama (40 ns) promueve ajustes en los modelos propuestos de espesores y velocidades de capas. Esta situación además se reporta en todos los perfiles del dique.

La berma 1 de la Sección A tiene unas imágenes particulares, ya que sus perfiles con el procesamiento indicado, muestran una mejor definición de los reflectores en tiempo y forma en el estudio realizado, facilitando la interpretación entre los estratos modelados con los radargramas (Figura 6.16). Las imágenes (a) y (b) de dicha figura son perpendiculares entre sí, donde la imagen transversal al dique indica que la forma de los estratos a 100 ns son curvos hacia el lado oeste, lo cual pudiera interpretarse

como producto de la sobrecompactación que sufrieron dichos estratos cuando se elevaron la berma 2 y el tope del dique.

Por otro lado, el nivel freático de esta área no está claro al referirlo en el tiempo de los datos sintéticos (170 ns). Esto puede deberse a dos razones: la primera es que la arcilla que se encuentra por arriba del nivel freático tiene una saturación alta, producto de la presión capilar, creando un reflector que opaca la distinción del nivel freático. La segunda alternativa es que el nivel freático se encuentre a unos 200 ns, referido por el perfil longitudinal.

Con respecto a la berma 1 de la Sección B, se tiene que para las reflexiones profundas de la traza sintética (Figura 6.18), no es fácil hallar una correspondencia con las del radargrama, debido a que el ruido ambiental producido por la caseta y la reja adyacente a este perfil opaca la señal del subsuelo. Este mismo fenómeno ocurre en los tendidos perpendiculares al dique del terreno natural de la Sección B [Figura 5.9 (a)].

El único reflector que se observa en la berma 1 de la Sección B se encuentra a 150 ns, el cual se le puede atribuir al nivel freático. En el modelo propuesto de esta área, solo variaría el indicador del nivel freático de 180 ns a 150 ns.

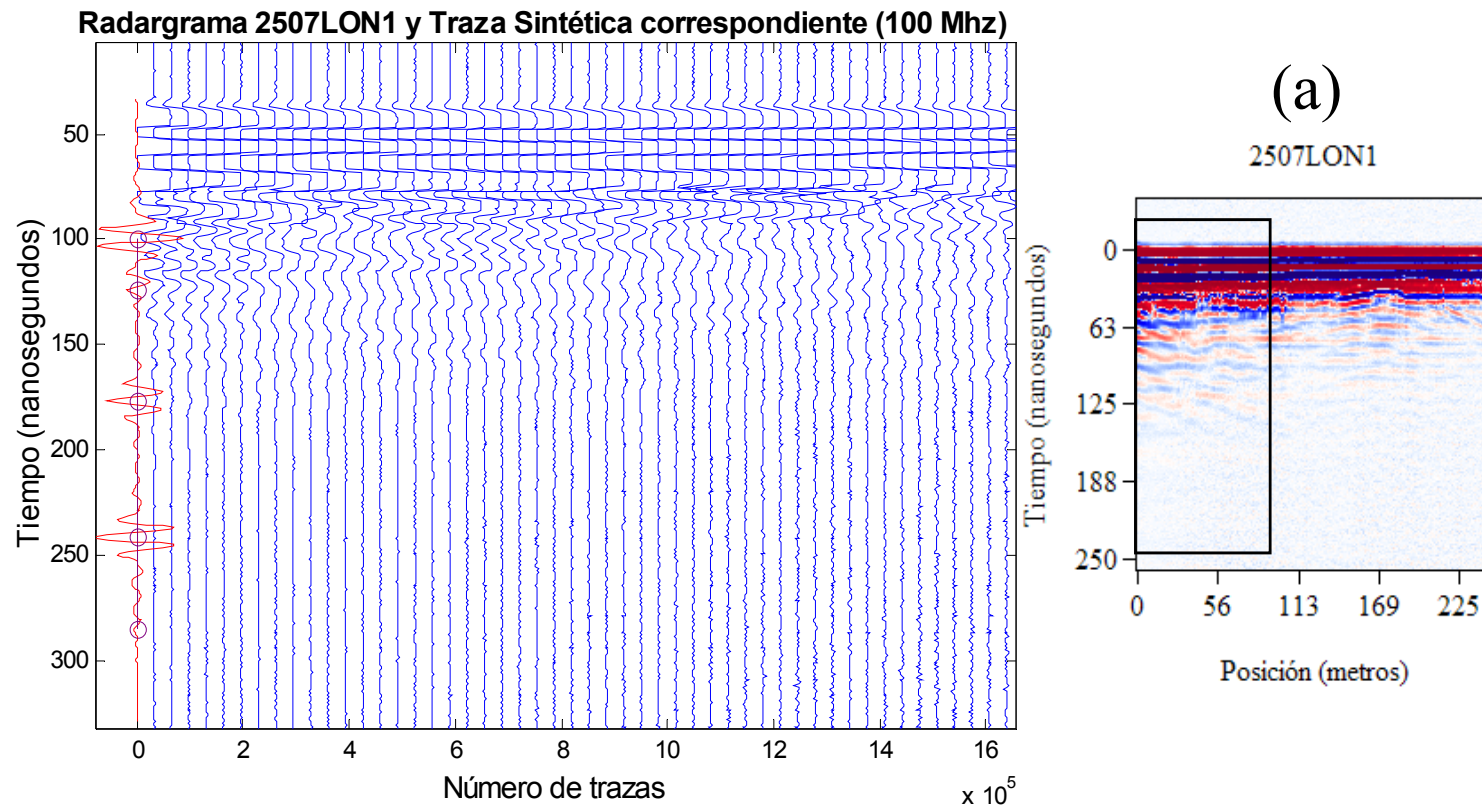


Figura 6.15.(a). Perfil de tipo reflexión, adquirido sobre el tope de la Sección A y su traza sintética correspondiente, utilizando la antena de 100 Mhz.

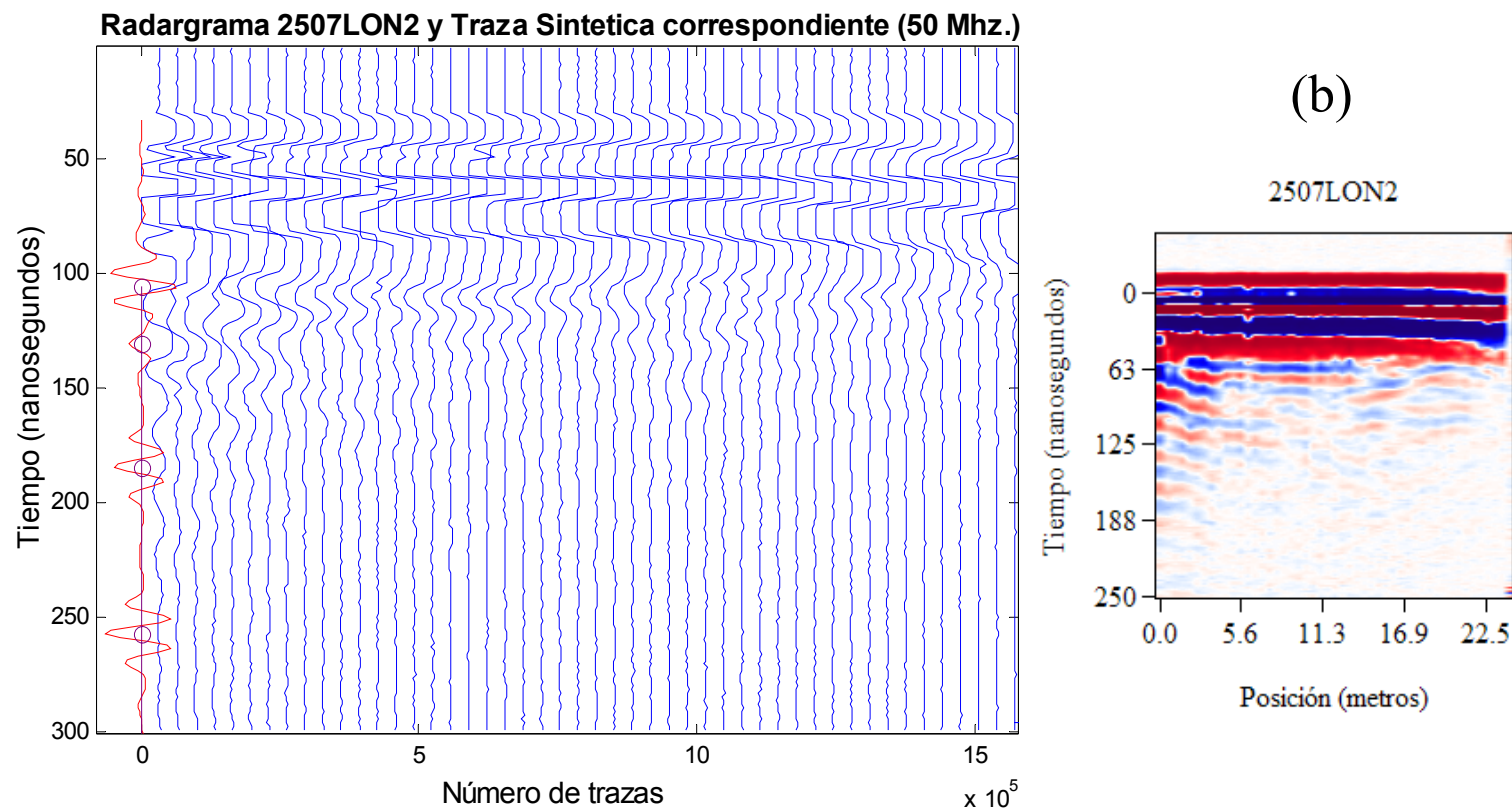


Figura 6.15.(b). Perfil de tipo reflexión, adquirido sobre el tope de la Sección A y su traza sintética correspondiente, utilizando la antena de 50 Mhz.

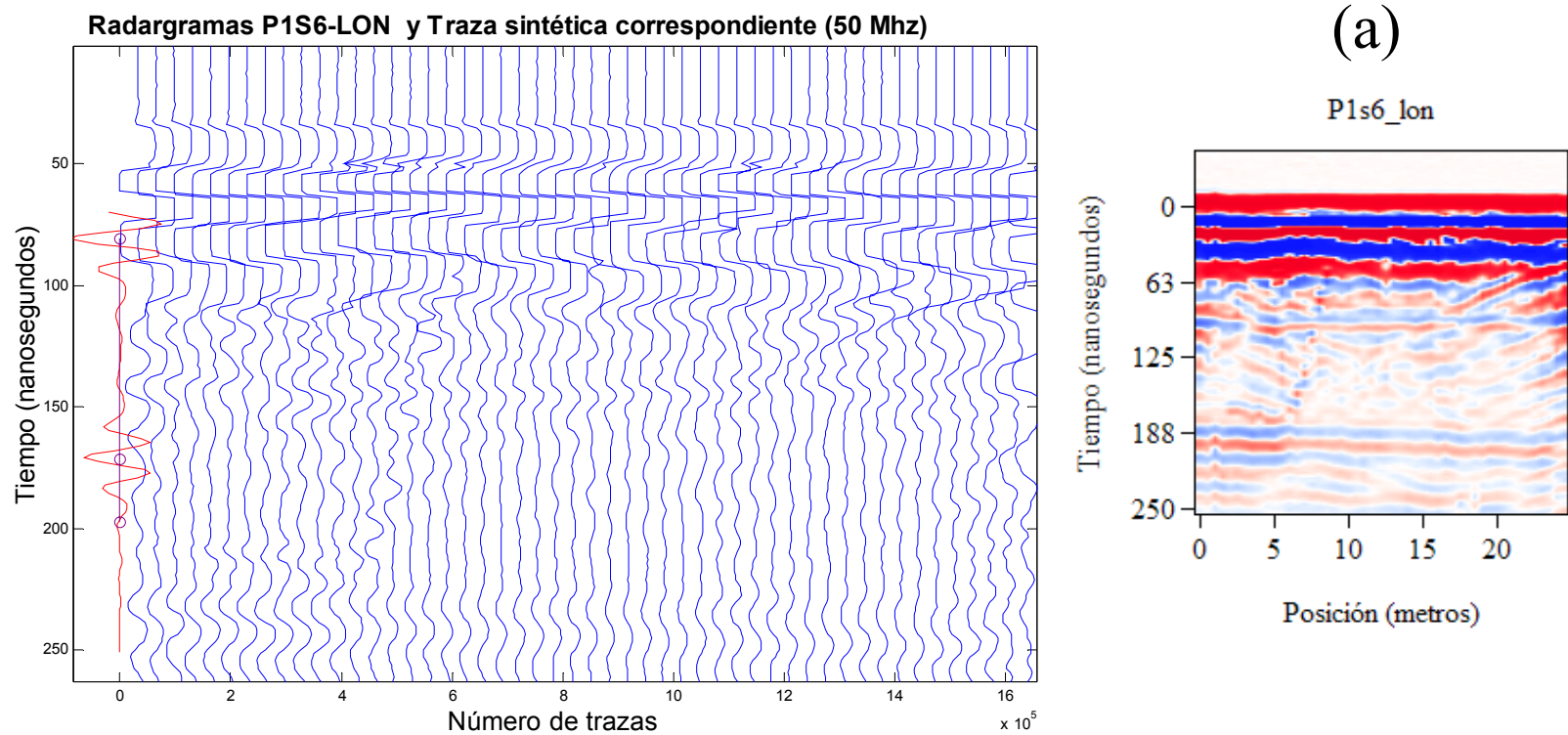


Figura 6.16.(a). Perfil de tipo reflexión, adquirido longitudinal a la berma 1 de la Sección A y la traza sintética correspondiente, utilizando la antena de 50 Mhz.

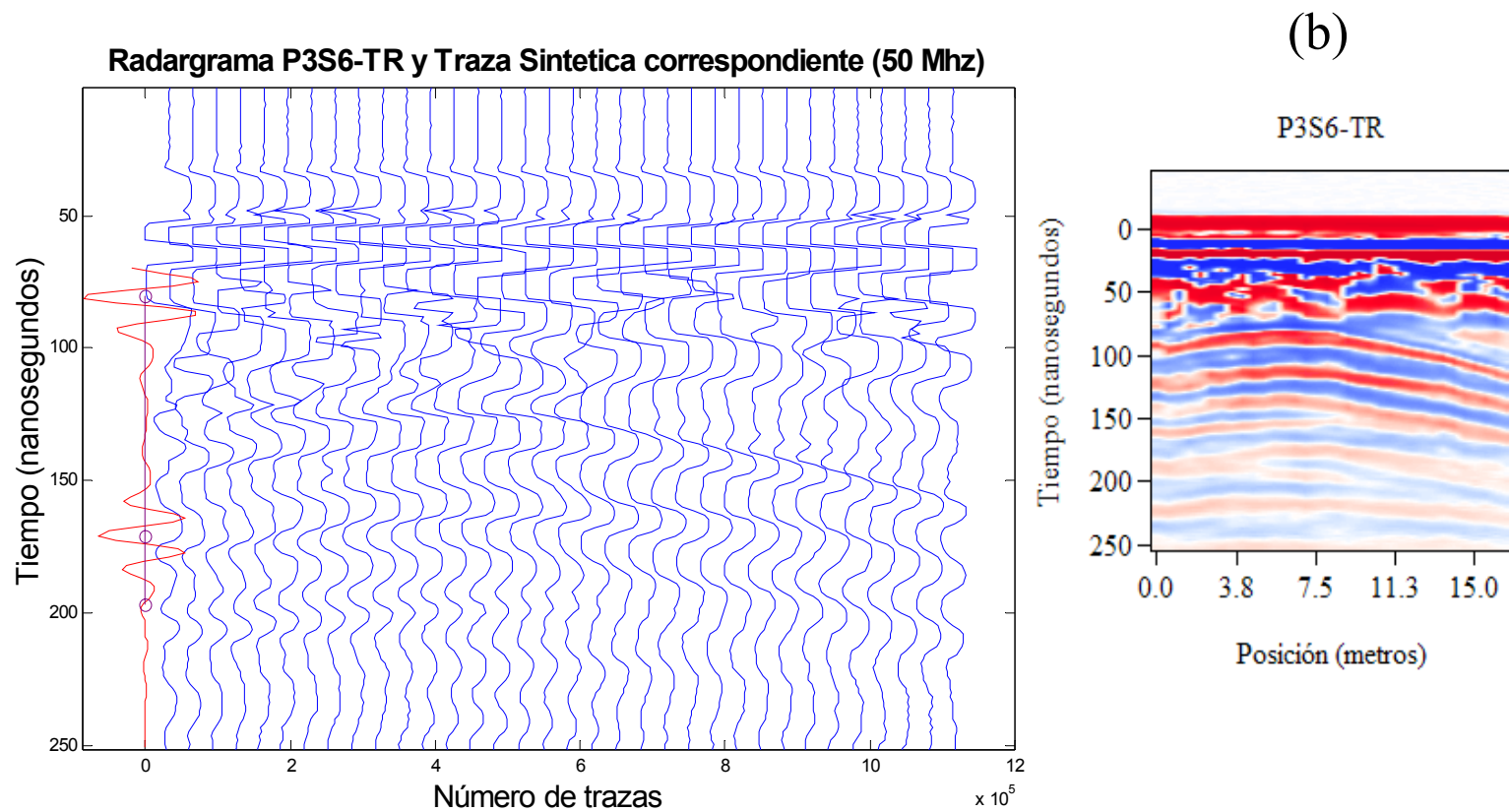


Figura 6.16.(b). Perfil de tipo reflexión, adquirido transversal a la berma 1 de la Sección A y la traza sintética correspondiente, utilizando la antena de 50 Mhz.

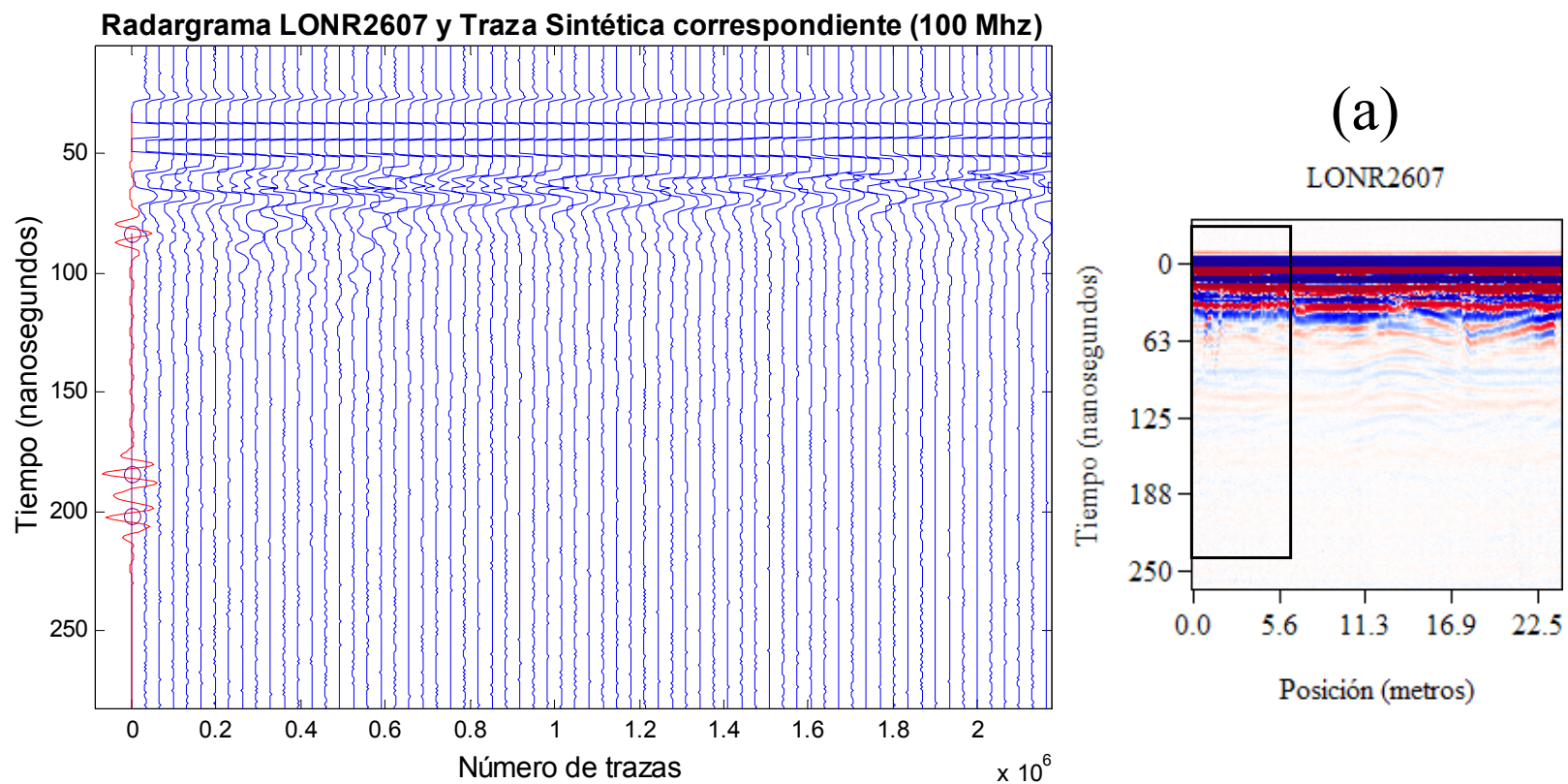


Figura 6.17.(a). Perfil de tipo reflexión, adquirido sobre el tope de la Sección B y la traza sintética correspondiente, utilizando la antena de 100 Mhz.

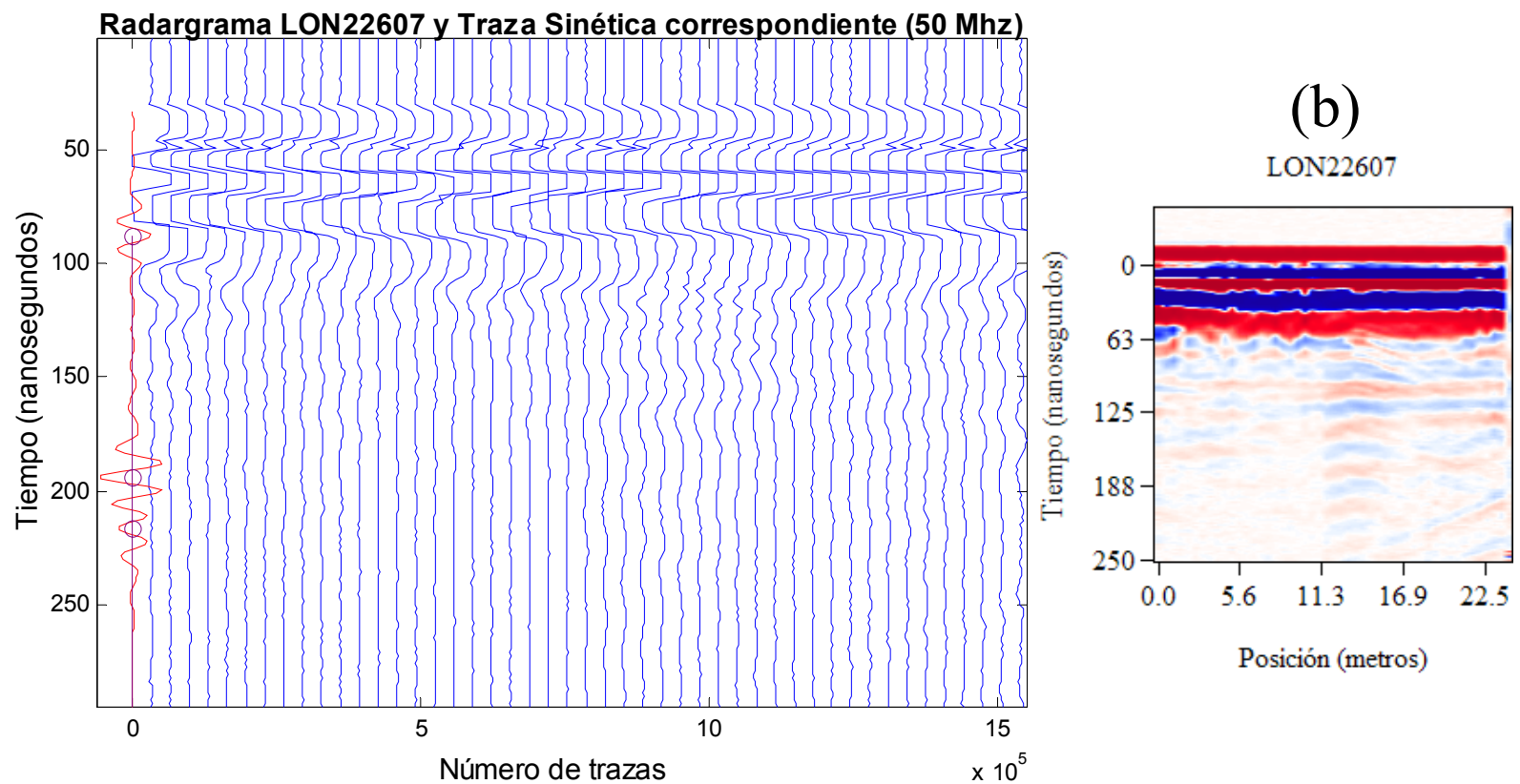


Figura 6.17. (b) Perfil de tipo reflexión, adquirido sobre el tope de la Sección B y su traza sintética correspondiente, utilizando la antena de 50 Mhz.

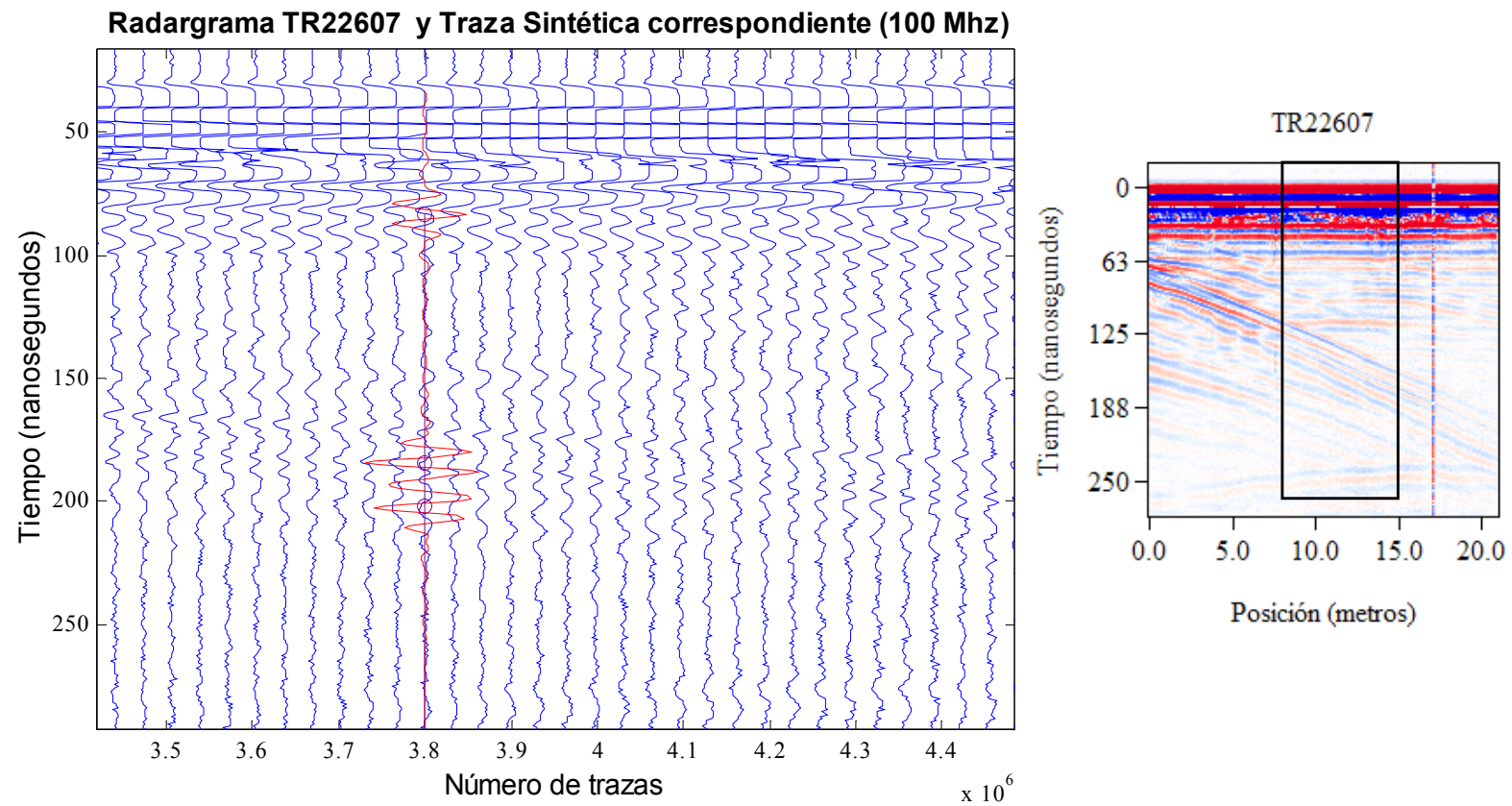


Figura 6.18. Perfil de tipo reflexión, adquirido sobre la berma 1 de la Sección B y la traza sintética correspondiente, utilizando la antena de 100 Mhz.

6.7 Perfiles y trazas sintéticas sobre el terreno natural

Las imágenes longitudinales y tridimensionales del terreno natural (Figura 6.19) destacan la continuidad del comportamiento de dos reflectores, que son producto del ruido ambiental ocasionado por una reja de un lado del mallado y, por el otro lado, debido a un canal de agua [Figura 5.9(b) y 5.10(a)].

En dirección oeste, estos reflectores tienden a converger, debido a que el canal y la reja se encontraban en lados opuestos a los perfiles longitudinales. Además, los reflectores provocados por la reja se encuentran más profundos, debido a que la misma se encuentra más alejada del mallado (3 m) en comparación con el canal (Figura 5.9).

En el caso de los perfiles transversales (Figura 6.20) se observa con claridad la parábola ocasionada por la reja, pero, a diferencia de los perfiles longitudinales, no se refleja la respuesta del canal. Esto se puede deber a la direccionalidad de las antenas y que a pesar que la reja se encuentra más lejos, su influencia ante las ondas electromagnéticas es mucho mayor, por ser un material más conductor que el canal, el cual se constituye de concreto.

El análisis descrito de los perfiles con su correcta ubicación espacial, como se observa en las Figuras 6.19 y 6.20, es la manera más adecuada, ya que si la imagen se interpola para crear una imagen 3D continua mediante el programa “*T3D*”. Posteriormente, se generan imágenes como la observada en la Figura 6.21, la cual indica que la tendencia del programa es correlacionar los reflectores de tal manera que los integre de forma horizontal, generando interpretaciones incorrectas.

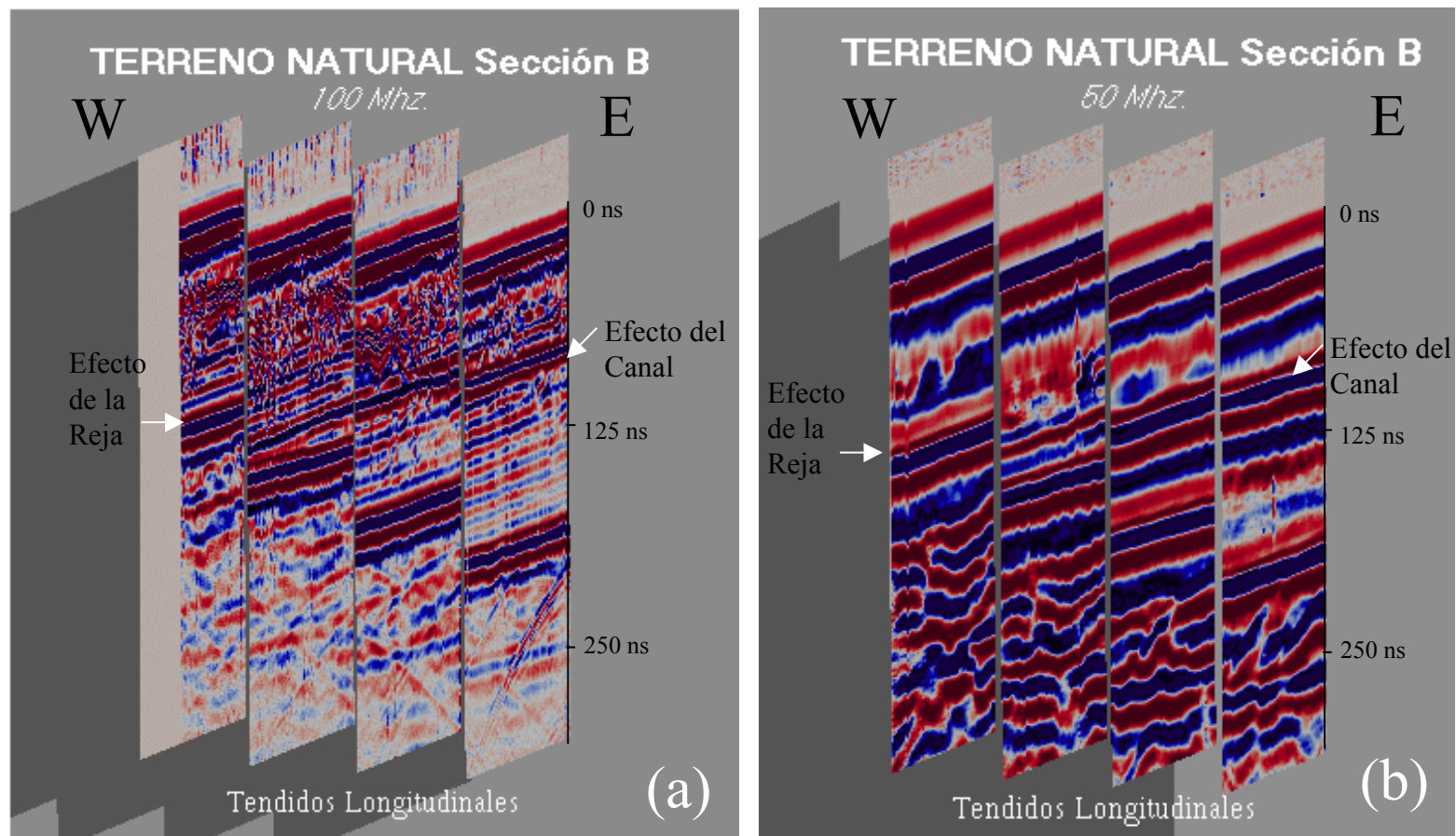


Figura 6.19. Perfiles, de tipo reflexión, adquiridos sobre el terreno natural de la Sección B, longitudinales al dique, utilizando las antenas de (a) 100 Mhz. (b) 50 Mhz.

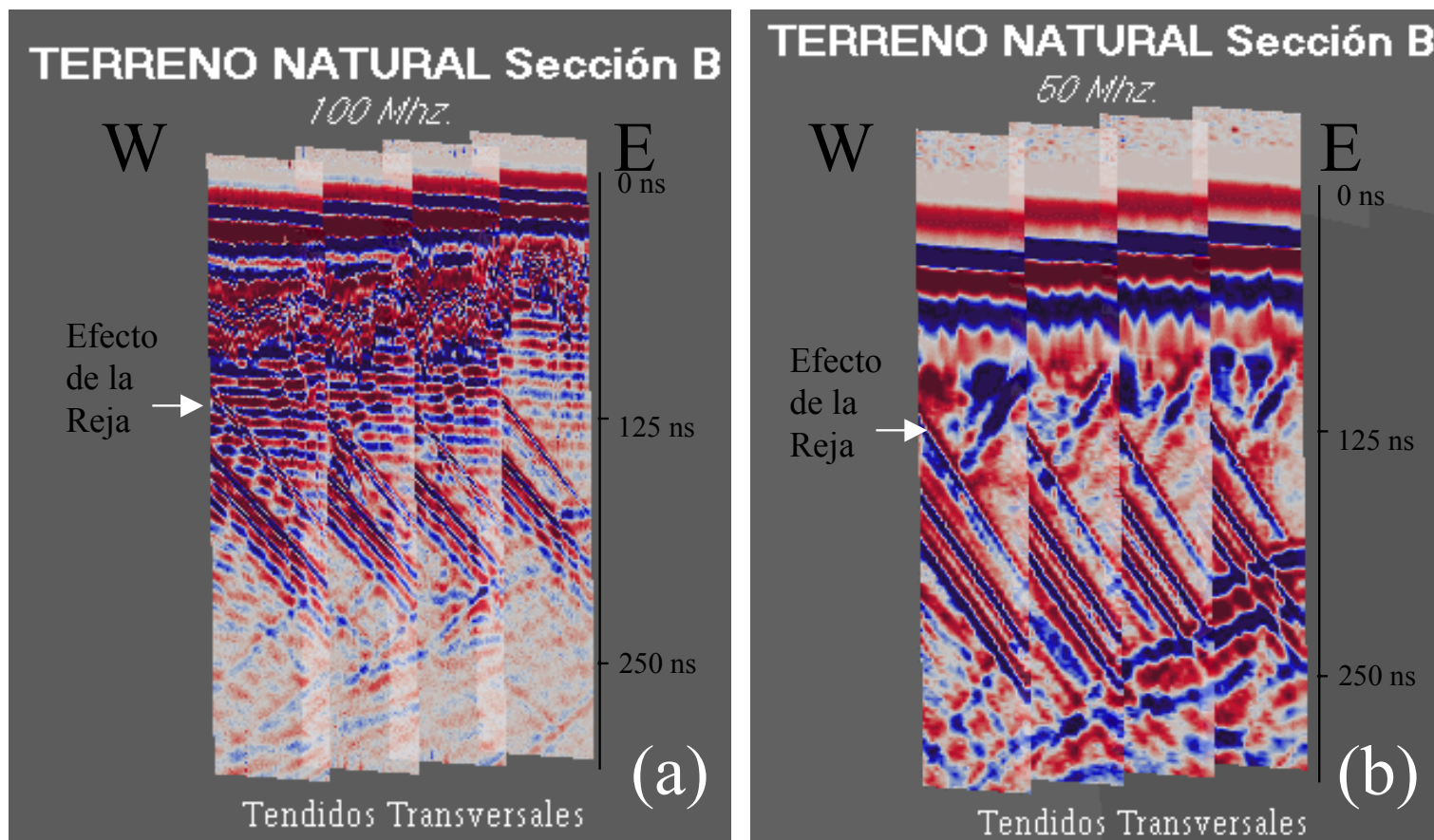


Figura 6.20. Perfiles, de tipo reflexión, adquiridos sobre el terreno natural de la Sección B, transversales al dique, utilizando las antenas de (a) 100 Mhz. (b) 50 Mhz.

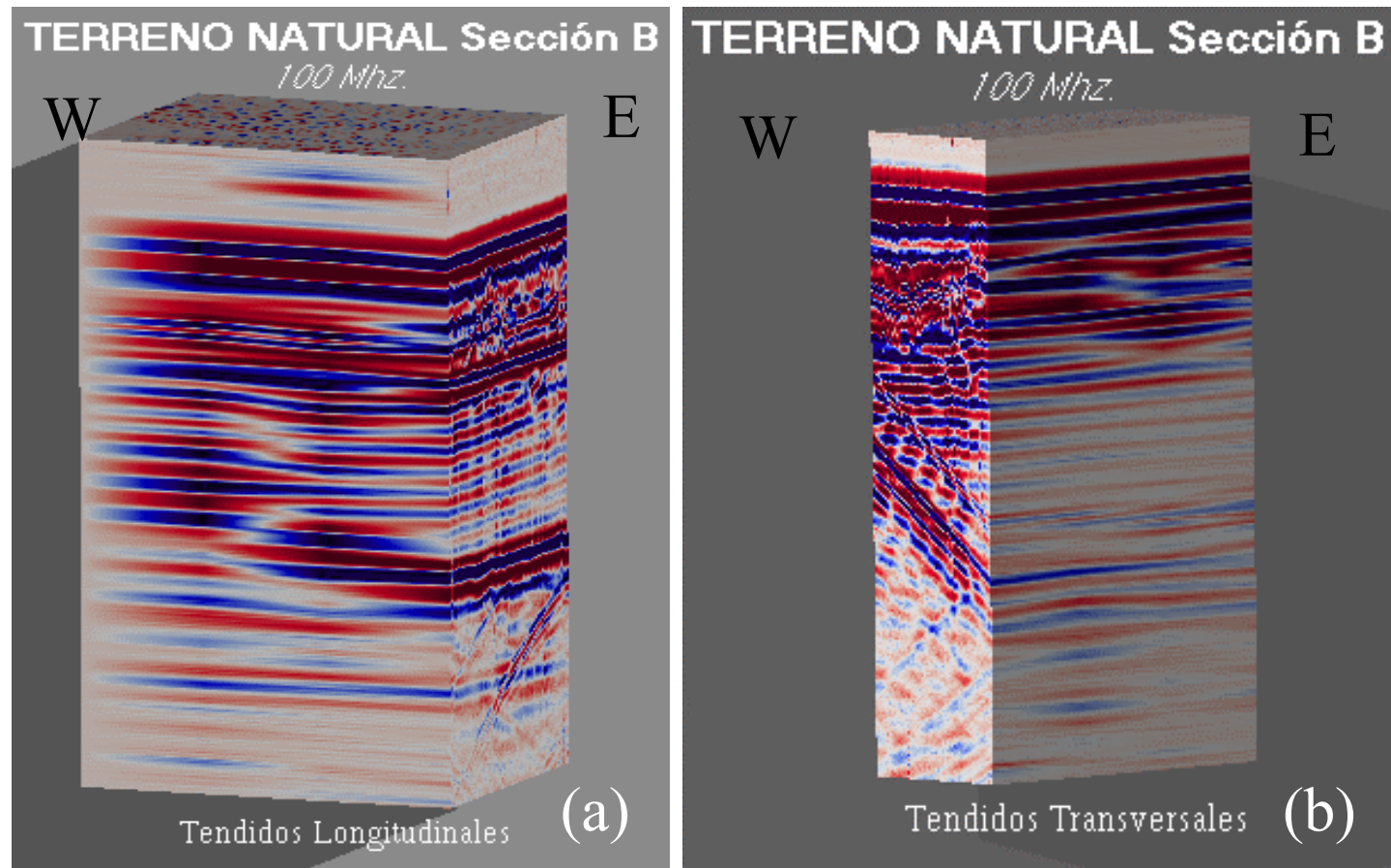


Figura 6.21. Imágenes 3D, de perfiles adquiridos sobre el terreno natural de la Sección B, utilizando la antena de 100 Mhz (a) longitudinales (b) transversales.

Los tendidos del terreno natural con las antenas de 100 Mhz, poseen una serie de interrupciones significativas en los reflectores someros. Dichas interrupciones no se presentan en los tendidos adquiridos con frecuencia de 50 Mhz (Figura 6.19 y 6.20). Esta observación demuestra que el fenómeno que provoca estas interrupciones tienen dimensiones comprendidas entre 2 y 1 m de largo y ancho, deducidas de las longitudes de onda de las antenas de 50 y 100 Mhz, respectivamente.

La Figura 6.22 expresa la relación de algunas de las interrupciones mencionadas, las cuales son completamente coherentes en tiempo y forma, entre los puntos de intersección de los perfiles longitudinales y transversales. Una muestra clara se observa en el tendido número 3 (figura 6.22), ya que las posiciones de intersección con los perfiles longitudinales, poseen distintas expresiones en las reflexiones discontinuas. Del mismo modo, esta gráfica muestra la coherencia del ruido ambiental anteriormente explicado.

La discontinuidad de estos reflectores puede atribuirse, por un lado, a la presencia de acumulaciones de agua dulce en el primer metro de profundidad, en términos de tiempo a unos 100 ns, la cual permite mayor penetración con respecto al agua del dique. Por otro lado, a cambios litológicos en la relación de volumen (vacíos) que disminuyan o aumenten la porosidad.

Los perfiles adquiridos en el terreno natural también se correlacionaron con trazas sintéticas correspondientes al área, de la misma manera que los perfiles analizados del dique. Una diferencia notable entre estos tendidos y los del dique es que la primera reflexión no es posible corresponderla con las amplitudes que se encuentran justo después de las primeras llegadas. Esto se debe a que, por un lado, el primer estrato es un tanto más profundo que los del resto de los estratos del dique y, por el otro, las velocidades de propagación en esta zona son mucho menores que las encontradas en el dique, dominadas por el volumen de agua (Tabla 6.3).

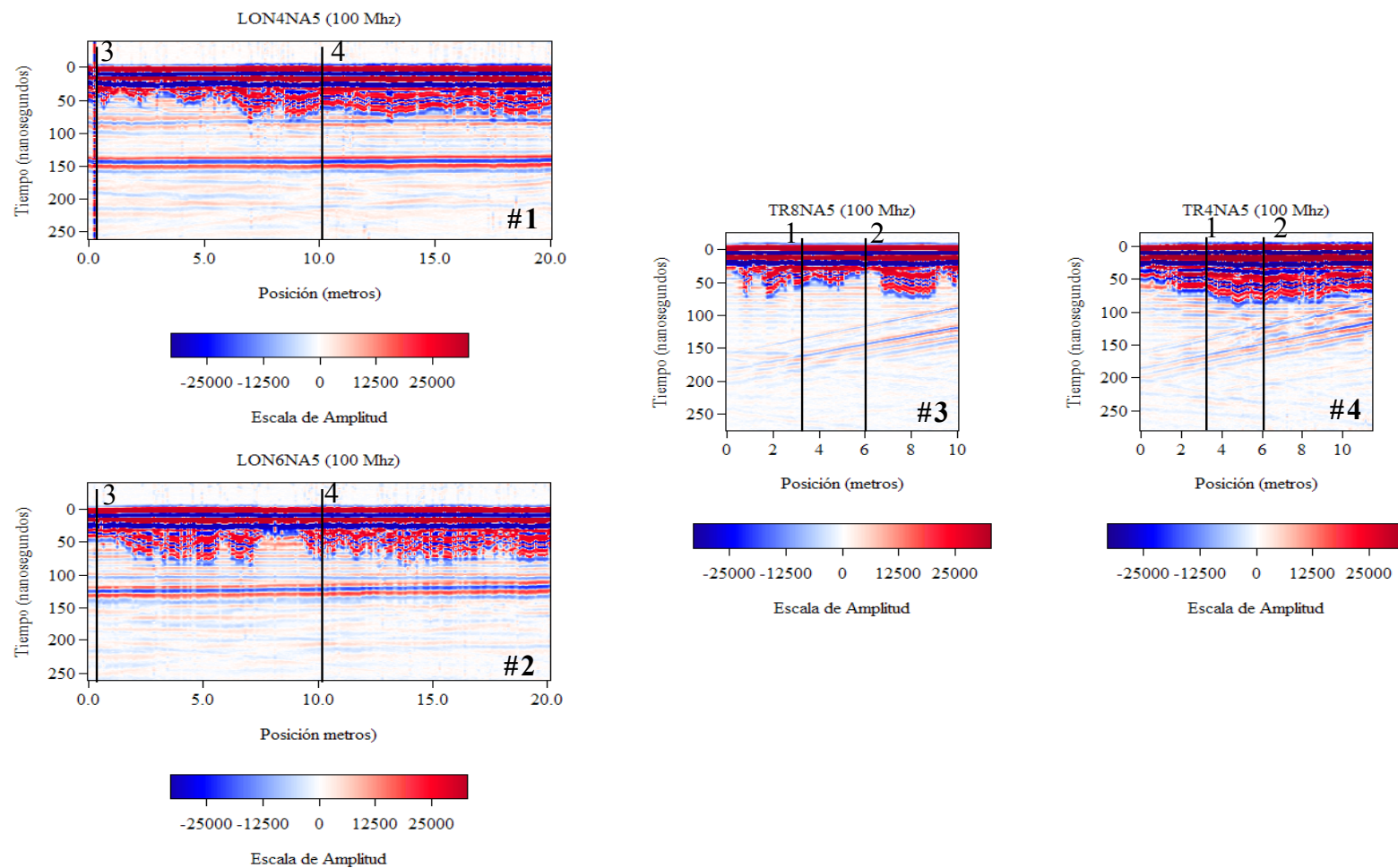


Figura 6.22. Relación entre intersecciones de perfiles de tipo reflexión, longitudinales y transversales al dique, adquiridos sobre el terreno natural.

Al no verificarse los posibles elementos adyacentes a la zona que ocasionen ruido, se podrían obtener interpretaciones incorrectas en los análisis de radargramas. Esto se evidencia en las imágenes de la Figura 6.23, donde las reflexiones provocadas por el ruido de la reja, se interpretarían como cambios significativos en las propiedades electromagnéticas en el suelo y, por consiguiente, las trazas sintéticas también serían adaptadas a inferencias erradas.

Las Figuras 6.23 (b) y (c) demuestran los reflectores que se encuentran en tiempos mayores a 125 ns. Estos perfiles fueron adquiridos con antenas de frecuencia de 50 Mhz, y, por consiguiente, demuestran que la atenuación fue menor a esta frecuencia en comparación con los perfiles adquiridos con antenas de frecuencias de 100 Mhz. Además, los perfiles adquiridos a frecuencias de 100 Mhz dejaron gran parte de la energía en los reflectores discontinuos ubicados entre los 25-75 ns,

Por otra parte, los perfiles señalados anteriormente, adquiridos a 50 Mhz, poseen una ventana de tiempo tal que permite indicar las reflexiones de sólo las dos primeras interfaces del modelo propuesto de la zona. Estas dos reflexiones se encuentran a un tiempo de 220 y 270 ns, representados en la traza sintética a la que corresponden. La semejanza de la disposición de estas con las reflexiones de los radargramas es considerable para determinar que, por lo menos, los dos primeros estratos modelados poseen valores adecuados de velocidades y espesores.

Para los perfiles transversales (Figura 6.24), sucede lo mismo que en la berma 1 de la Sección B (Figura 6.18), donde las reflexiones de la traza sintética no son fáciles de correlacionar con las del radargrama, debido a que el ruido ambiental producido por la reja adyacente a este perfil opaca la señal del subsuelo.

Con respecto al nivel freático, se conoce que no se midió en los datos de los ensayos geotécnicos del terreno natural utilizados en este análisis. Por lo tanto, no se

tiene un nivel de referencia para el mismo en las trazas sintéticas. Sin embargo, las experiencias previas acerca de las características del dique y sus adyacencias, indican que el nivel freático en el terreno natural de esta zona, no excede de un metro de profundidad. Además, los cálculos de saturación (Tabla 5.3) de este suelo concuerdan con esta afirmación.

Basándose en lo anterior, la reflexión del nivel freático debería encontrarse a menos de 80 ns, ya que la equivalencia a este tiempo en los radargramas del terreno natural es aproximadamente 1 m de profundidad. En este tiempo, no es posible determinar la ubicación precisa de la reflexión del nivel freático, ya que las reflexiones se encuentran indefinidas. Además, según los datos geotécnicos, prácticamente todo el suelo se encuentra saturado de agua. Por lo tanto no existe la posibilidad que el nivel freático genere alguna reflexión.

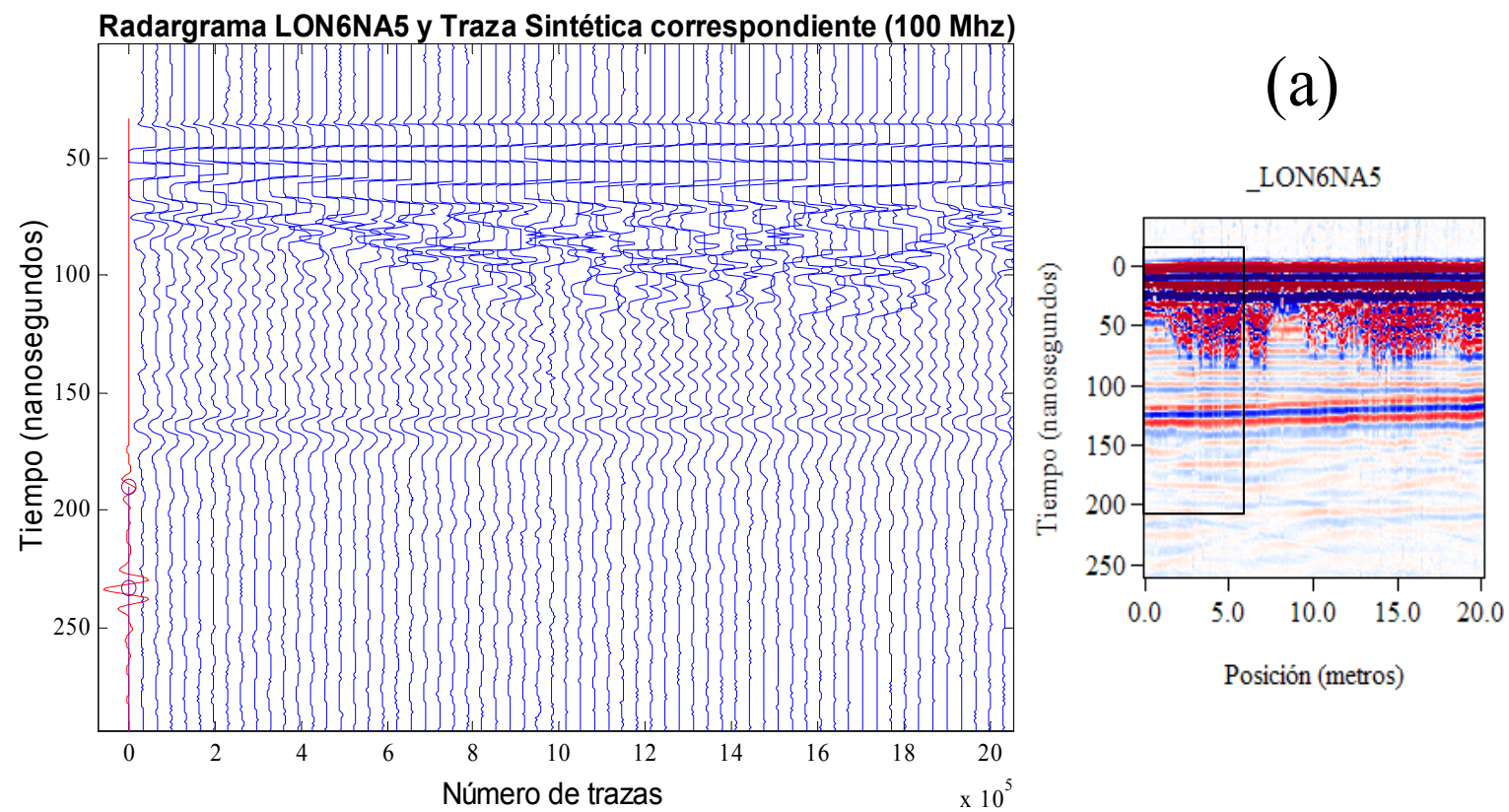


Figura 6.23.(a). Perfil de tipo reflexión, adquirido sobre el terreno natural de la Sección B, longitudinal al dique y su traza sintética correspondiente, utilizando la antena de 100 Mhz.

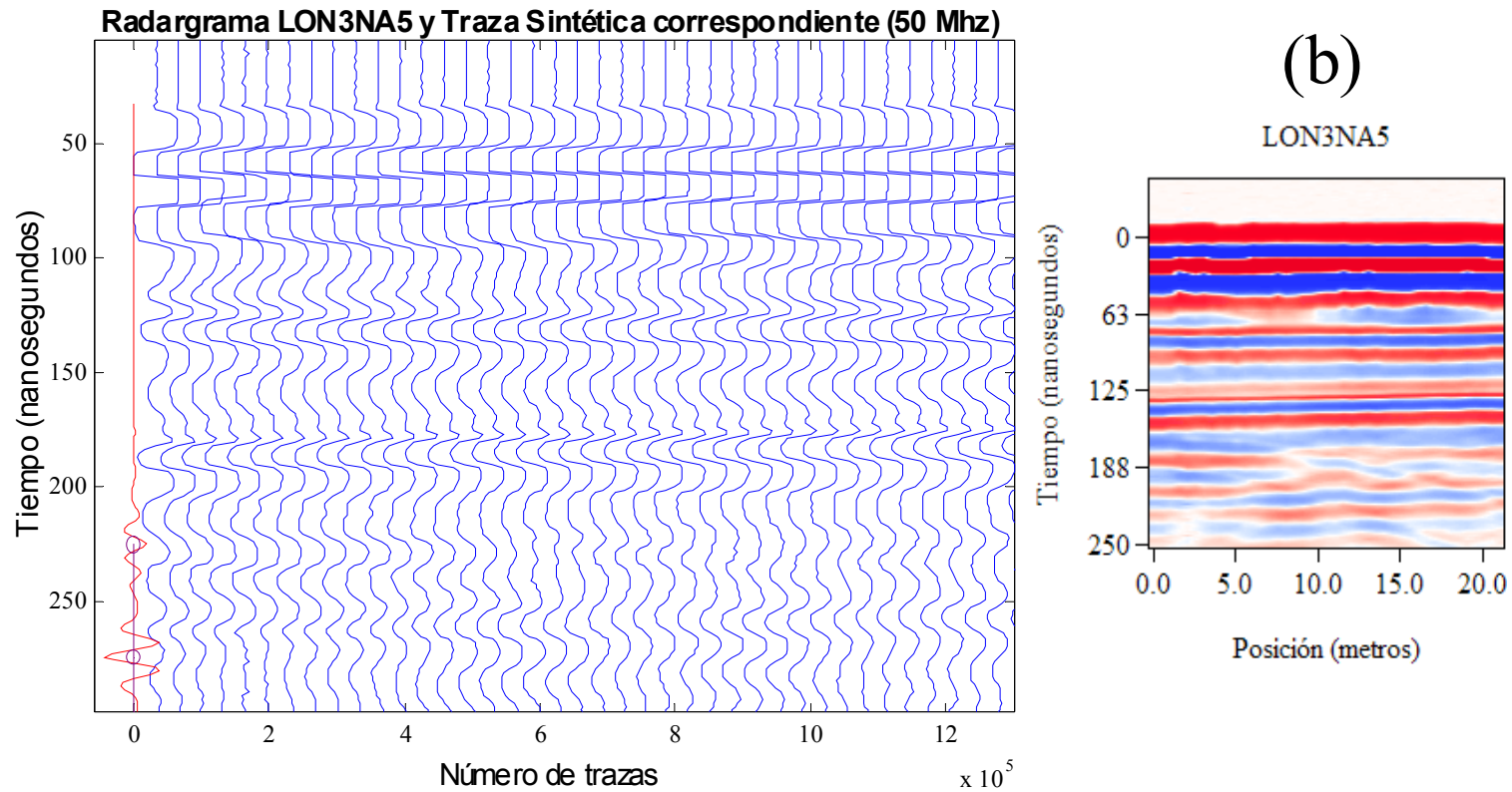


Figura 6.23.(b). Perfil de tipo reflexión, adquirido sobre el terreno natural de la Sección B, longitudinal al dique y su traza sintética correspondiente, utilizando la antena de 50 Mhz.

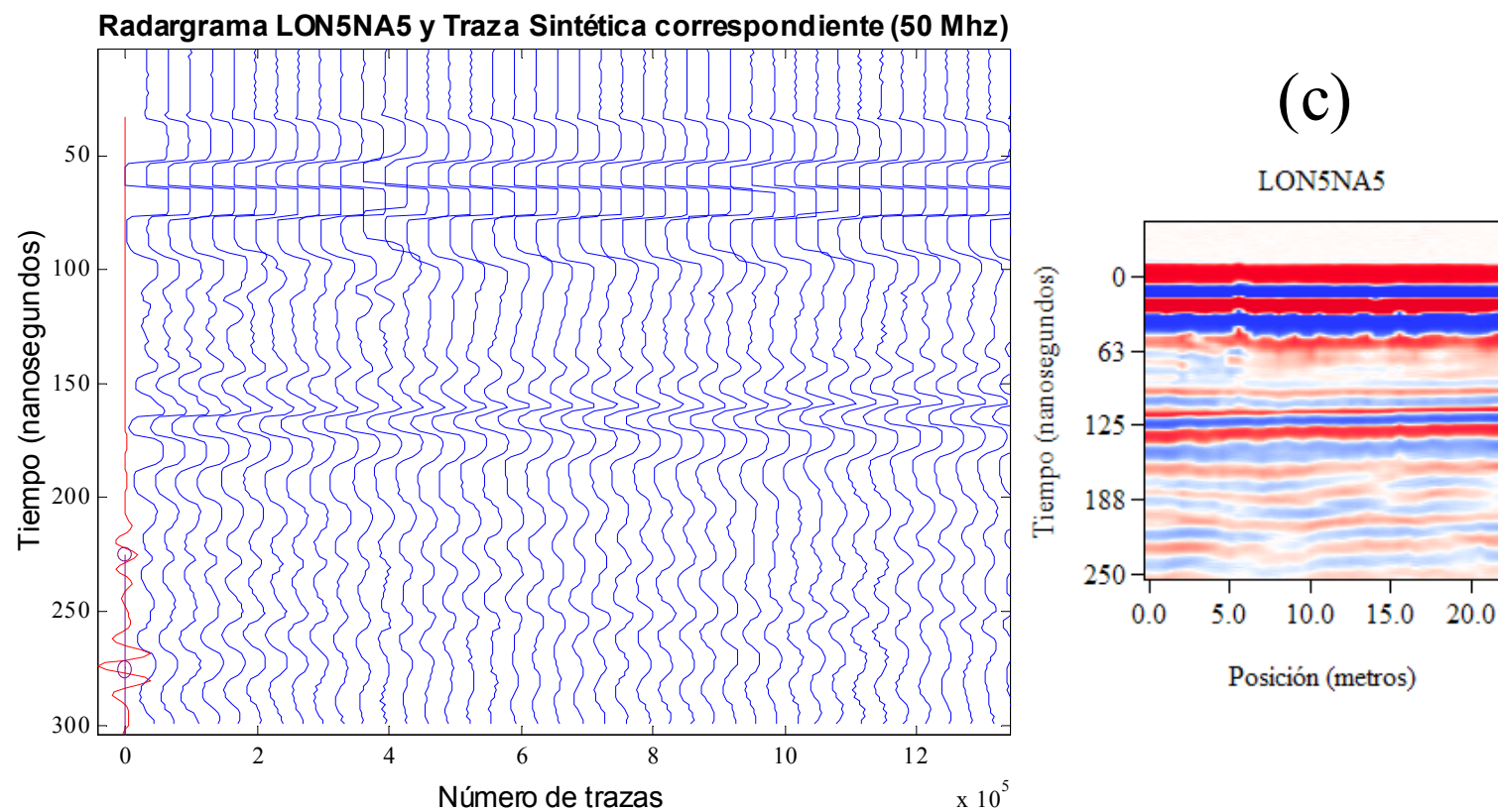


Figura 6.23.(c). Perfil de tipo reflexión, adquirido sobre el terreno natural de la Sección B, longitudinal al dique y su traza sintética correspondiente, utilizando la antena de 50 Mhz.

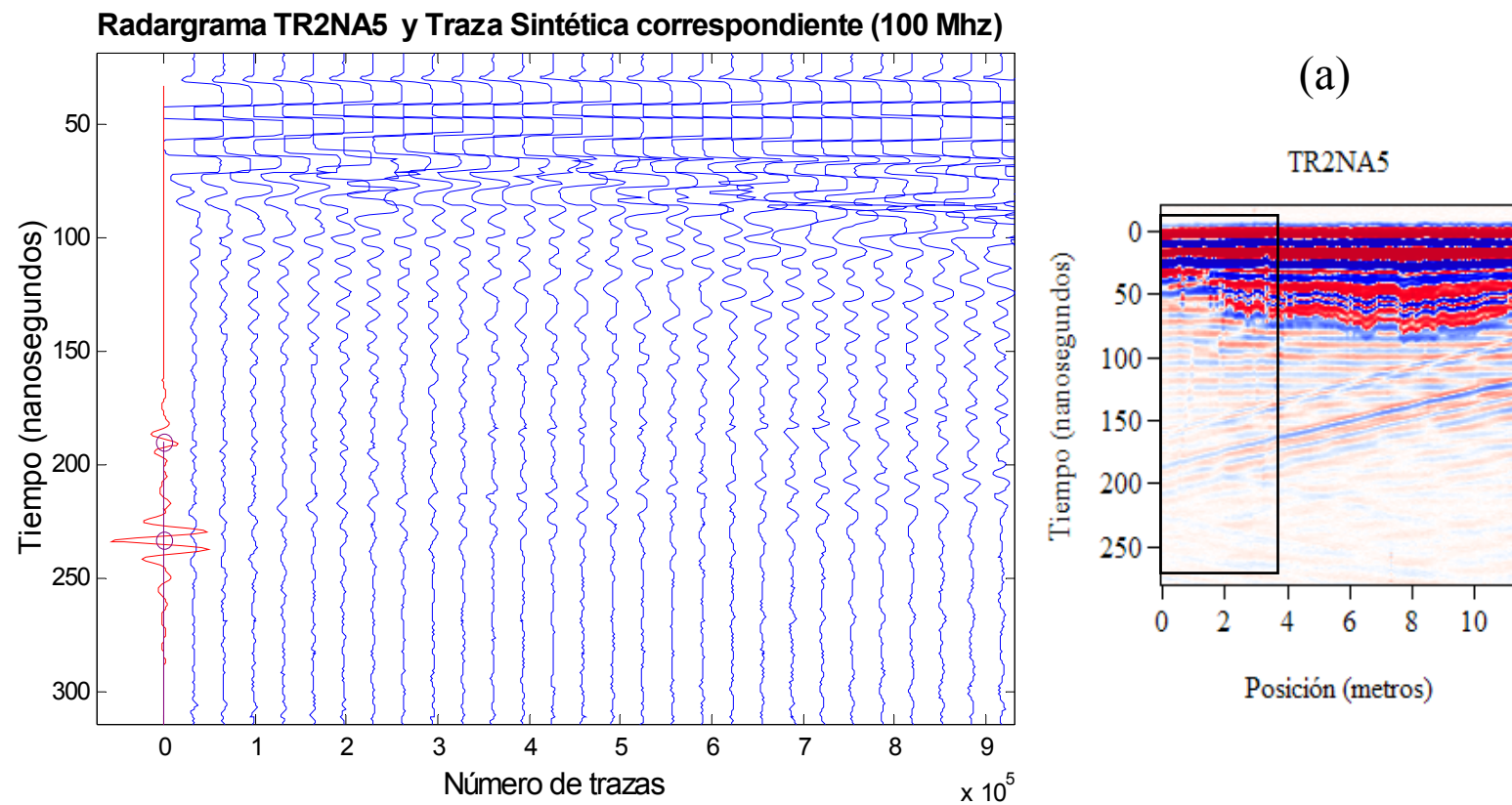


Figura 6.24.(a). Perfil de tipo reflexión, adquirido sobre el terreno natural de la Sección B, transversal al dique y su traza sintética correspondiente, utilizando la antena de 100 Mhz.

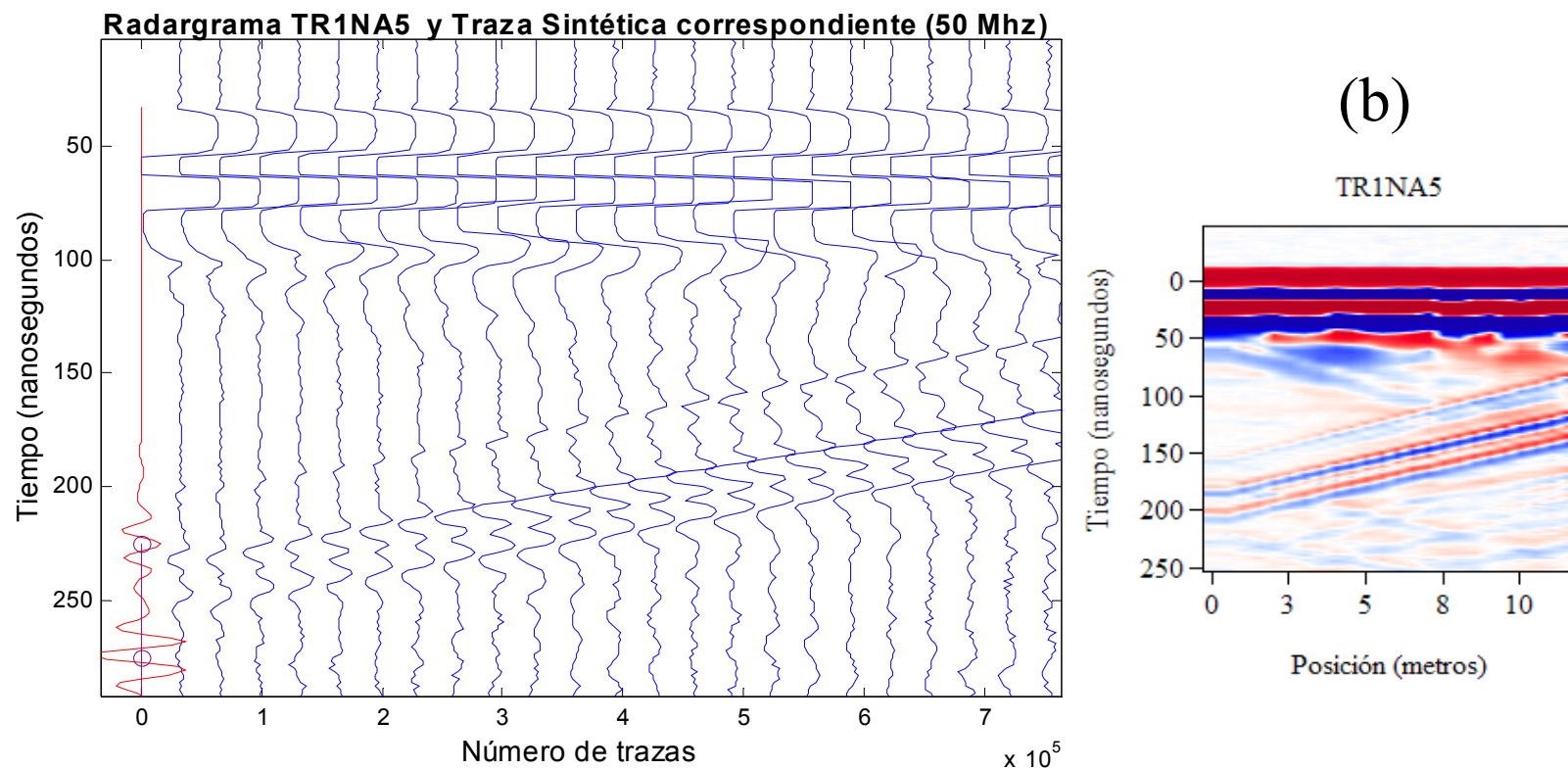


Figura 6.24.(b).Perfil de tipo reflexión, adquirido sobre el terreno natural de la Sección B, transversal al dique y su traza sintética correspondiente, utilizando la antena de 50 Mhz.

6.8 Perfiles de la zona de inyección

Previamente la evaluación de los resultados de los perfiles adquiridos en la zona de inyección, se hace prudente precisar las conclusiones previas que se generaron con la imagen tomográfica, las cuales se tomaron de informes técnicos no publicados de PDVSA-Intevep.

La Figura 6.25 representa claramente la forma del bulbo, apreciada mediante el color rojo, el cual corresponde a las velocidades más altas de ondas de corte (140 m/s). Esta imagen revela que el medio periférico posee un contraste alto en sus propiedades mecánicas con respecto al material inyectado, indicando el contraste de densidades entre la mezcla y el suelo.

Por otro lado, la forma del bulbo se puede relacionar con una elipse, donde su eje mayor tiende a ser horizontal. Dicha forma es la naturalmente esperada en suelos arcillosos-limosos.

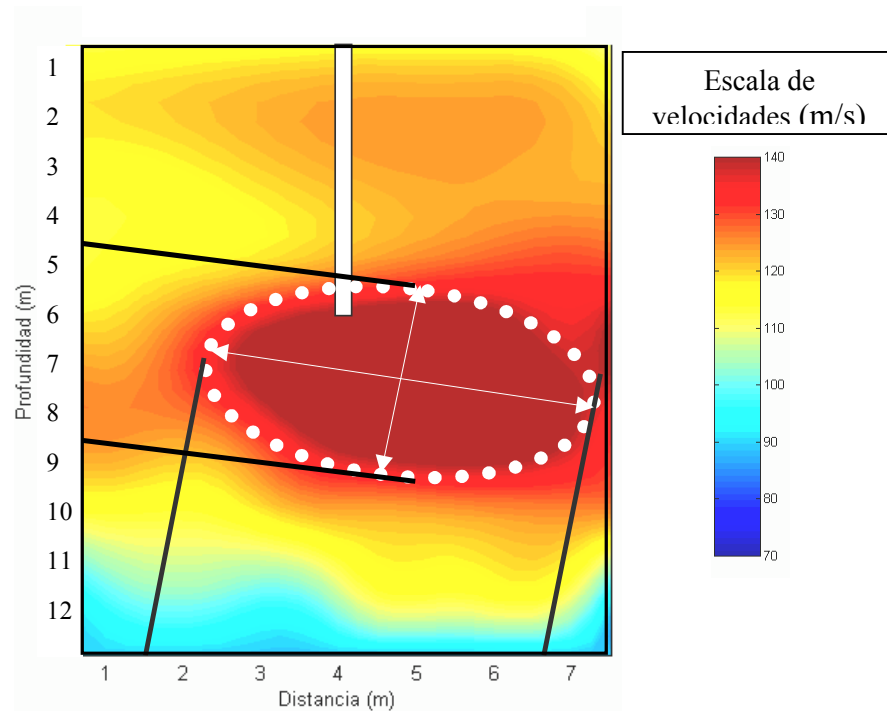


Figura 6.25. Tomografía post-inyección mostrando la zona del bulbo resaltada por sus velocidades acústicas. (Fuente: PDVSA- Intevep)

Una vez expuestos los resultados de los estudios tomográficos y conociendo las propiedades geotécnicas y electromagnéticas del suelo de la zona de inyección (Tablas 5.4 y 6.4) es posible analizar los radargramas adquiridos en la zona referida.

La particularidad de la saturación tan elevada en los estratos del área, se percibe en los radargramas mediante el comportamiento poco continuo de los reflectores (Figuras 6.26 y 6.27). Asimismo, esta particularidad causa que las velocidades calculadas sean bajas (0,03 m/ns), similares al terreno natural de la Sección B. Asociando estas velocidades y la profundidad en donde se encuentra inyectada la mezcla, las respuestas del bulbo en los radargramas serían más de 330 ns.

Para este último tiempo es improbable considerar que algún reflector visto en los radargramas sea por consecuencia del mencionado bulbo. Además, por encima de la mezcla inyectada existe una capa de turbas, las cuales producen una atenuación importante que también dificultaría las reflexiones del mencionado bulbo.

No obstante, en la Figura 6.26 existen tendencias parabólicas en los reflectores encontrados un poco después de los 125 ns, que pueden ser indicios del levantamiento que causa la inyección en los estratos superiores.

Las imágenes del radar mostraron profundidades hasta de 4 metros aproximadamente, calculadas a través de la velocidad promedio del medio (0,03 m/ns). Para esta profundidad la tomografía tampoco muestra respuesta alguna de la mezcla inyectada.

La inconsistencia entre las respuestas de los radargramas y la imagen tomográfica se debe a que miden diferentes propiedades del suelo.

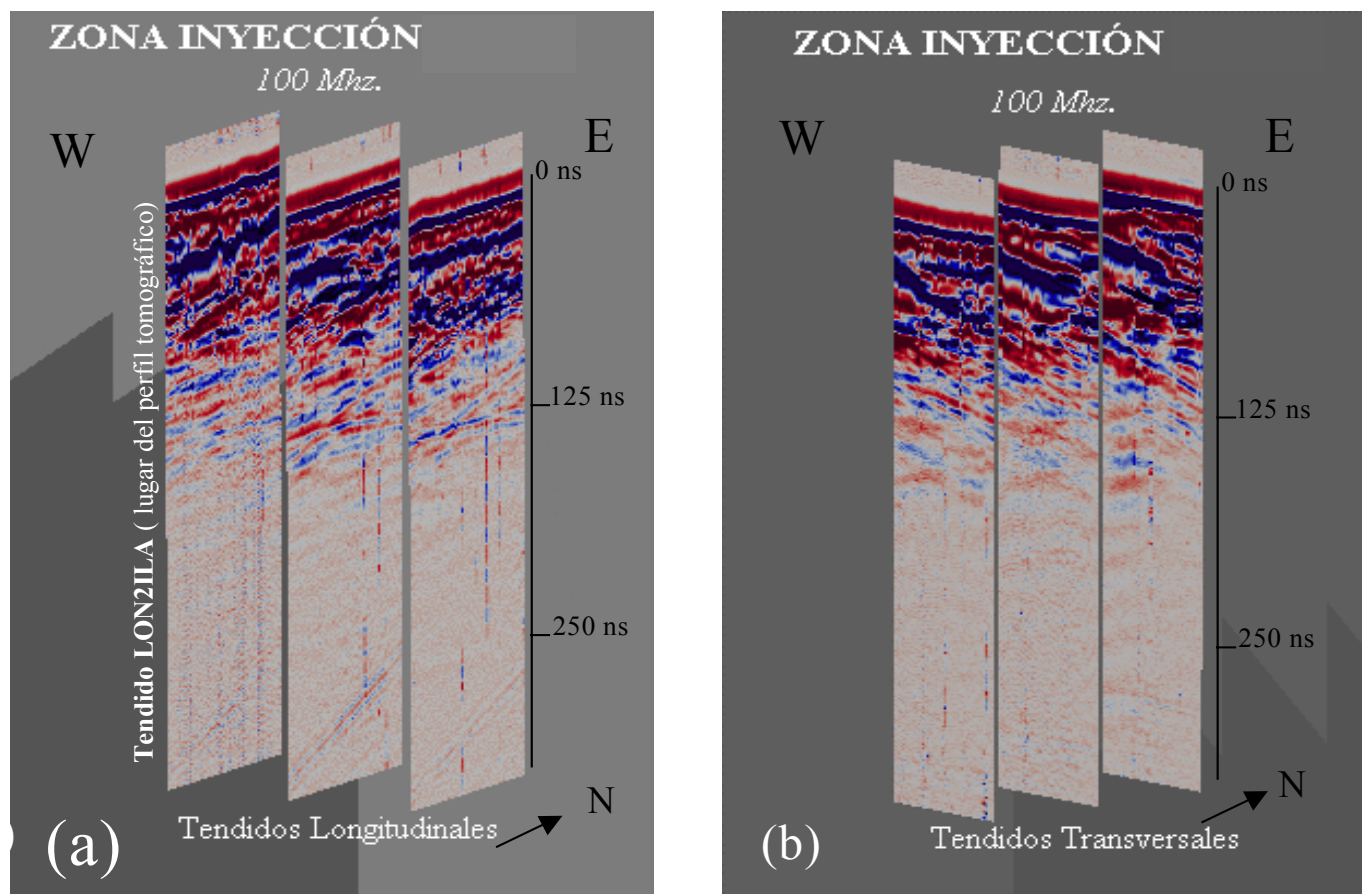


Figura 6.26. Perfiles, de tipo reflexión, adquiridos sobre la zona de inyección, con las antenas de 100 Mhz., (a) longitudinales, (b) transversales

Por otro lado, el acoplamiento de las imágenes a y b de la Figura 6.26 se realizó por medio de los tres perfiles transversales y el perfil longitudinal LON2ILA, el cual se adquirió exactamente donde se efectuó la tomografía (Figura 6.27).

Uno de los reflectores más apropiados para las correlaciones entre estos perfiles es el segundo reflector de amplitud negativa (ubicado aproximadamente a 25 ns), ya que éste es interceptado a diferentes posiciones en los tendidos transversales TR1ILA (número 2), TR2ILA (número 3) y TR3ILA (número 1). De acuerdo con las líneas de intercepto descritas, el reflector se observa ligeramente en el tendido transversal numero 2, evidenciándose con mayor nitidez en el número 3. Por el contrario, no se registra en el tendido número 1. Por consiguiente, el reflector tiene correspondencia en las intersecciones respectivas dentro del perfil longitudinal LON2ILA.

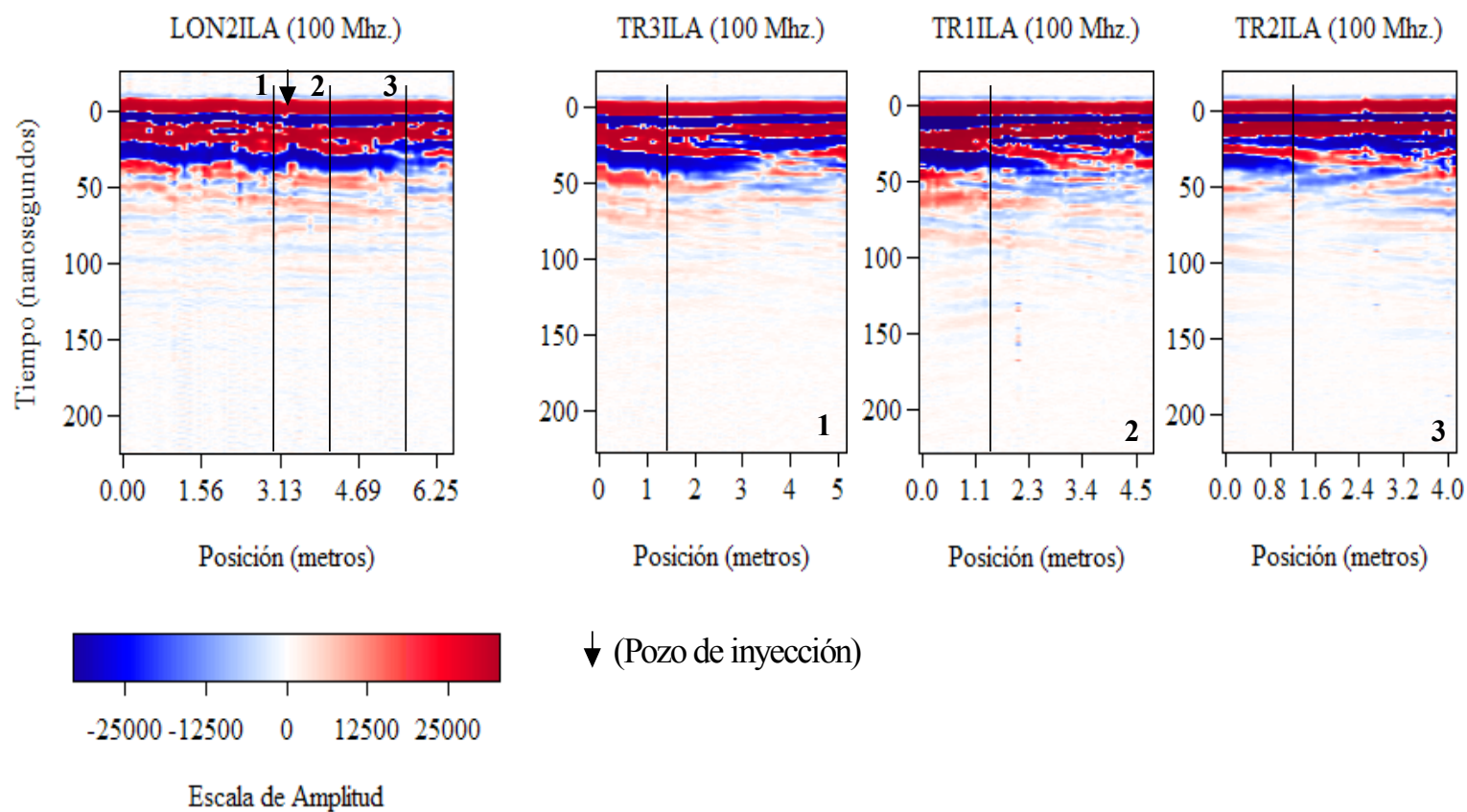


Figura 6.27. Relación entre intersecciones de perfiles longitudinales y transversales de tipo reflexión, adquiridos sobre la zona de inyección.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La aplicabilidad de la técnica de GPR, en conjunto con datos geotécnicos demostró ser una metodología eficaz para la caracterización geotécnica de suelos. La búsqueda del objetivo principal en este estudio de investigación, además de contribuir en la definición del subsuelo, también permitió establecer una nueva metodología de manejo de datos para la caracterización de los suelos, mediante correlaciones entre los resultados de la herramienta de prospección GPR y datos geotécnicos previamente calculados.

Los resultados obtenidos destacan principalmente la identificación del volumen y la conductividad del agua existente en los poros. Las propiedades electromagnéticas de los suelos se encuentran sujetas esencialmente al volumen y a la conductividad electrolítica del agua presente en los mismos. Donde la conductividad y la permitividad imaginaria aumentan con el contenido iónico del agua, y la permitividad real aumenta con el incremento de la humedad volumétrica en los suelos.

Las características del subsuelo estudiado atenuaron considerablemente las señales recibidas por el equipo de medición. Estas atenuaciones posiblemente se deben a la presencia de arenas que se encuentran saturadas de aguas con concentraciones iónicas considerables o arcillas simplemente saturadas. Así pues, *los resultados de los estudios realizados con el radar que tengan una baja penetración, pueden determinar la presencia de volúmenes de agua en el subsuelo.*

No obstante, el suelo no es el único factor que controla las imágenes de los radargramas, también es indispensable la escogencia de la frecuencia de las antenas a utilizar, como se conoce, existe una mayor precisión pero menos profundidad de observación a frecuencias de 100 Mhz, en comparación con la antena de 50 Mhz.

La herramienta de CMP es una guía importante en la interpretación de los perfiles de tipo reflexión, debido a que permite descartar la posibilidad que las reflexiones sean causadas por algún cambio de propiedades del subsuelo o simplemente correspondan al ruido ambiental presente en la zona de estudio.

Para solventar parte de los problemas de atenuación de las ondas electromagnéticas en medios de alta pérdida de energía, se sugiere que en la rutina de procesamiento de los radargramas, se aplique un filtro temporal para eliminar las bajas frecuencias y un control de ganancia que resalte los reflectores menos observables.

En el desarrollo de un modelo litológico del área a prospectar, las relaciones volumétricas, y la conductividad del agua que se involucre en el modelo, son factores determinantes para estimar las respuestas del radar y mantener un control de litologías y espesores que permitan realizar interpretaciones certeras en cuanto a las reflexiones de los radargramas.

De lo antes descrito, se sugiere realizar un modelo previo del subsuelo que defina los espesores, las velocidades electromagnéticas y atenuaciones de los estratos, de manera que sea posible estimar las respuestas esperadas en los radargramas y determinar la posibilidad de reconocer el objetivo mediante la técnica del GPR.

Es importante destacar que, si bien la estrategia de procesamiento resultó eficaz para predecir parte de las respuestas que se pueden esperar de los radargramas, se recomienda para obtener *con mayor precisión* la profundidad de estratos, mediante correlaciones entre trazas sintéticas y radargramas, que se realicen los ensayos geotécnicos y geofísicos justamente sobre la misma localización. Además, las trazas sintéticas deben obtenerse con un programa que emplee ondas electromagnéticas, a fin de obtener mejores correlaciones.

En relación con el dique, las diferencias entre los radargramas del talud aguas arriba de las Secciones A y B en lo que respecta a la penetración, determinan que la protección del tablestacado a lo largo del dique no necesariamente es uniforme y que a su vez depende del tipo de suelo presente. Por otro lado, los radargramas adquiridos sobre el tope del Dique tienen una menor visibilidad de los reflectores a mayores tiempos en comparación con el resto, posiblemente debido a factores ambientales.

Una de las recomendaciones más importantes en la adquisición es la observación general del entorno, ya que puede facilitar las interpretaciones de los radargramas resultantes. Por un lado, precisando las posiciones relativas de los distintos factores causantes de ruido (rejas, cables eléctricos, tuberías, etc.) y, por otro, observando factores ambientales importantes que puedan afectar al comportamiento de las capas más superficiales, tal como es el caso del tope del dique.

Por último, debido a que las imágenes de los radargramas adquiridos en la zona de inyección no tuvieron suficiente resolución de la señal a partir de los 125 ns (3,75 m aprox.), se recomienda realizar una imagen tomográfica con las antenas de radar de pozos.

REFERENCIAS

Annan A. (1992). “*Ground Penetrating Radar Workshop Notes*”. Manual de Sensor & Software Inc. Mississauga, en Santamarina J. (2001). “*Soils and Waves*”. Editorial: John Wiley & Sons, LTD, Pgs. 301-430.

Annan A. (2002). “*Ground Penetrating Radar Workshop Notes*”. Manual de Sensor & Software Inc., Canada, Pgs. 9-188.

Archie, G. E. (1942). “*The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics*”. Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, Petroleum Engineers, N. 164, Pgs. 54-62, en Santamarina J. (2001). “*Soils and Waves*”. Editorial: John Wiley & Sons, LTD, Pgs. 301-430.

Badillo E. y A. Rico (1972). “*Mecánica de Rocas*”. 3ra ed., Mexico Editorial Limusa. 641 p.

Bowles, J. (1982). “*Propiedades Geofísicas de los Suelos*”. Bogotá, Editorial McGraw-Hill, en Santamarina J. (2001). “*Soils and Waves*”. Editorial: John Wiley & Sons, LTD, Pgs. 301-430.

Cabrera, J. y F. López (1993). “*Optica Electromagnética*”. Editorial. Addison-wesley Iberoamericana. 100-256 p.

Cai, J. y G. McMechan (1995). “*Ray-based synthesis of bistatic ground-penetrating radar profiles*”. Geophysics, 60(1), Pgs. 87-96.

Carcione, J. (1996). “*Ground Penetrating Radar: Wave Theory and Numerical Simulation in Lossy Anisotropic Media*”. Geophysics, 61 (6), Pgs. 1664-1677.

Carcione, J. (1998). “*Radiation patterns for 2-D forward modelling*”. Geophysics, 63 (2), Pgs. 424-430.

Davis, J. y A. Annan (1989). “*Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy*”. Geophysical Prospecting, N° 37, Pgs. 531-551.

De Marco P. (2002), “*Corrección del índice de resistencia a la penetración (SPT) considerando la eficiencia energética del equipo*”, Geos, N° 35, Universidad Central de Venezuela, Fac. Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Caracas. Pgs. 65-67.

González M. y H. Echezuría (1994). “*Riesgos Sísmicos y Vulnerabilidad de Instalaciones de la IPPCN.*”. Informe Técnico, PDVSA- INTEVEP, departamento de Ingeniería general. Pgs. 14-18.

Leal, J. (1989). “*Integration of GPS and Levelling in Subsidence Monitoring Studies at the Costa Bolivar Oil Fields*”. Tecchnical report No 144. Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, N.B., Canada.

Mitchell, J. (1993). “*Fundamentals of Soils Behavior*”. Second Edition, John Wiley & Sons, New York, 437p.

O’Konski, C.T. (1960). “*Electrical Properties of Macromolecules. V. Theory of Ionic Polarization in Polyelectrolytes*”. Journal of Physical Chemistry, 64, Pgs. 605-618, en Santamarina J. (2001). “*Soils and Waves*”. Editorial: John Wiley & Sons, LTD, Pgs. 301-430.

Santamarina J. (2001). "*Soils and Waves*". Editorial: John Wiley & Sons, LTD, Pgs. 301-430.

Santamarina J.y K. Klein (2001). "*Re-examination of Fabric Formation in High Specific Surface Soils*". Georgia Institute of Technology, Atlanta, en Santamarina J. (2001). "*Soils and Waves*". Editorial: John Wiley & Sons, LTD, Pgs. 301-430.

Santamarina J., K. Klein, Y. Wang, y E. Prencke, (2002). "*Specific Surface: Determination and Relevance*". Canadian Geotechnical, 39 (1), Pgs.233-241.

Saarenketo T. (1996). "*Electrical properties of water in clay and silty soils*". Journal of Applied Geophysics. 40 (1-3). Pgs. 73-88.

Sensors & Software Inc. (1999). "*Pulse Ekko 100 Run*". Guía de usuario, Version 1.2, Canada, Pgs. 7-51.

Sensors & Software Inc (2001). "*Win Ekko*". Guía de usuario, Version 1.0, Canada, Pgs. 13-64.

Suman R. y R. Knight (1997). "Effects of pore structure and wettability on the electrical resistivity of partially saturated rocks". Geophysics, 62 (4). Pgs. 1151-1162.

Sully, J. (1992). "*Undrained Shear Strength and Consolidation Characteristics of COLM Clays*". Informe Técnico INTEVEP, S.A.; INT-TEIG-0042,92,oct., Pg. 44.

Topp G., J. Davis, W. Bailey y W. Zebchuk (1980). “*The Measurement of Soil Water Content Using a Portable TDR Hand Probe*”. Canadian Journal of Soil Science, 64, Pgs. 313-321.

Turner, G. y A. Siggins (1994). “*Constant Q Attenuation of Subsurface Radar Pulse*”. Geophysics, 39 (8). Pgs. 1192-1200.

Facultad de Ingeniería Civil y Geociencias, CITG, (2003):
<http://www.gpr2004.tudelft.nl/> [Consulta: 02-2003]

Radioaficionados:

<http://espanolgeoties.com/elradioaficionado/antenas/propagacion02.htm> [Consulta: 06-2003].

TRX engineering & Earth Sciences: www.Trxconsulting.com/m_gpr_carpeta.htm
[Consulta: 05-2003].

Universidad Politécnica de Valencia: http://ttt.topo.upv.es/~juagarcu/pdf/1-4_Generalidades%20G.P.R..pdf [Consulta: 09-2003].

APÉNDICE A.

Superficie Específica de los minerales.

La superficie específica es la relación del área superficial de una partícula y su masa.

$$S = \frac{A_s}{m} \quad [\text{m}^2/\text{gr}] \quad (\text{a.1})$$

En muchos experimentos, se demuestra que los minerales que conforman las arenas, tienen una superficie específica muy baja alrededor de $1\text{-}40 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{g}$, Mitchell (1993), a diferencia de las arcillas que poseen una superficie específica mayor, entre un rango de $20\text{--}400 \text{ m}^2/\text{g}$.

Los suelos con una superficie específica alta dependen del fenómeno de sedimentación y por la fábrica de los granos que lo conforman, los cuales son controlados por los factores del medio ambiente donde existan condiciones insaturadas y acoplamiento mecánico-químico, (Santamarina et al, 2002).

Los suelos con una superficie específica alta, se caracterizan por tener un excelente espacio de conducción por la facilidad con que puede fluir la corriente. En el caso de las arcillas, además de poseer una superficie específica considerable, también poseen una concentración de cationes en sus espacios interlaminares que compensan su carencia de iones positivos.

Estos iones niveladores son capaces de diluirse fácilmente en el agua, creando una nube de partículas cerca de su superficie contribuyendo a la conducción superficial. Este proceso ocurre con el agua que existe en los espacios porales de las arcillas, lo cual promueve a un aumento en la conductividad electrolítica.

APENDICE B.

Deducción de la ecuación de ondas electromagnéticas.

Aplicando la derivada con respecto al tiempo en la ecuación de la Ley de Ampere, una de las ecuaciones de Maxwell, se obtiene:

$$\nabla \times \frac{\partial H}{\partial t} = \sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (b.1)$$

De la Ley de Faraday, otra de las ecuaciones de Maxwell se obtiene que:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{-\nabla \times E}{\mu} \quad (b.2)$$

Sustituyendo en la ecuación de Ampere, nos da que:

$$\nabla \times (-\nabla \times E) = \mu \sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (b.3)$$

Citando al vector identidad: $\nabla \times \nabla \times E = \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E$ y, reconociendo que $\nabla \cdot E = 0$, asumiendo una electroneutralidad en el medio de propagación, la variación de intensidad del campo eléctrico en el espacio y tiempo es:

$$\nabla^2 E = \mu \sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (b.4) \text{ Ec. de onda plana para el campo eléctrico}$$

De manera similar, se obtiene la ecuación de onda del campo magnético, comenzando con la ecuación de Faraday, Santamarina, (2001)

$$\nabla^2 H = \mu \sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (b.5) \text{ Ec. de onda plana para el campo magnético}$$

Una variación sinusoidal es solución de estas ecuaciones. Considerando una onda electromagnética que se propaga en dirección x, con un campo eléctrico polarizado en dirección y se obtiene que:

$$E_y = E_0 e^{j\omega t - \gamma^* x} \quad (b.6)$$

Cuando E_y es sustituido en la Ley de Faraday $\nabla_x E = -\mu \partial H / \partial t$ uno obtiene la variación del campo magnético:

$$Hz = -j \frac{\gamma^*}{\mu \omega} E_0 e^{j\omega t - \gamma^* x} = -\frac{j\gamma^*}{\mu \omega} E_y \quad (b.7)$$

APENDICE C.

Constante de propagación en función de los parámetros electromagnéticos.

Sustituyendo la ecuación de variación sinusoidal en la ecuación de onda plana se obtiene:

$$E_0 \nabla^2 (e^{j\omega t - \gamma^* x}) = \mu \sigma E_0 \frac{\partial e^{j\omega t - \gamma^* x}}{\partial t} + \mu \varepsilon E_0 \frac{\partial^2 e^{j\omega t - \gamma^* x}}{\partial t^2} \quad (c.1)$$

$$\cancel{E_0 e^{j\omega t - \gamma^* x}} \cdot (-\gamma^{*2}) = \mu \sigma \cancel{E_0 e^{j\omega t - \gamma^* x}} \cdot (j\omega) + \mu \varepsilon \cancel{E_0 e^{j\omega t - \gamma^* x}} \cdot (j^2 \omega^2) \quad (c.2)$$

$$\gamma^{*2} = \mu \sigma j \omega - \mu \varepsilon \omega^2 \quad (c.3)$$

$$\gamma^* = \sqrt{j \mu^* \sigma \omega - \mu^* \varepsilon^* \omega^2} \quad (c.4)$$

Para materiales no ferromagnéticos donde $\mu \approx \mu_0$ y $\varepsilon = \varepsilon_0 (\varepsilon' - j \varepsilon'')$

$$\gamma^* = \sqrt{j \mu_0 \sigma \omega - \mu_0 \varepsilon_0 (\varepsilon' - j \varepsilon'') \omega^2} \quad (c.5)$$

$$\gamma^* = \sqrt{j (\mu_0 \sigma \omega - \mu_0 \varepsilon_0 \omega^2 \varepsilon'') + \mu_0 \varepsilon_0 \omega^2 \varepsilon'} \quad (c.6)$$

$$\gamma^* = \omega \sqrt{j \left(\frac{\mu_0 \sigma}{\omega} - \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon'' \right) + \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon'} \quad (c.7)$$

Se sabe que la velocidad de la luz es $c_0 = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} = 2.998 \times 10^8$ m/s, tomando factor común c_0 , se obtiene:

$$\boxed{\gamma^* = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{j \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} - \varepsilon'' \right) + \varepsilon'}} \quad (c.8)$$

Sabemos que $\sigma/(\varepsilon_0 \omega) - \varepsilon''$, expresa la ε_{eff} , entonces:

$$\gamma^* = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{j \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} - \varepsilon'' \right) + \varepsilon'} = \frac{\omega \sqrt{\varepsilon'}}{c_0} \sqrt{j \left(\frac{\varepsilon_{\text{eff}}}{\varepsilon'} \right) + 1} \quad (c.9)$$

La relación $(\epsilon_{\text{eff}})/\epsilon'$, determina el factor de pérdida de los materiales, la cual se denomina tangente de pérdida:

$$\gamma^* = \frac{\omega \sqrt{\epsilon'}}{c_0} \sqrt{j \tan(\delta) + 1}$$

APÉNDICE D.

Deducción de los coeficientes de Reflexión y Transmisión.

Las siguientes ecuaciones son llamadas condiciones de borde, las cuales son derivadas de las ecuaciones de Maxwell, para pequeñas regiones límites entre dos capas, Santamarina (2001)

$$\text{De la Ley de Gauss: } \epsilon_1 E_{\text{norm}}^{<1>} - \epsilon_2 E_{\text{norm}}^{<2>} = \rho_s \quad (\text{d.1})$$

$$\text{De la Ley de Gauss para el Magnetismo: } \mu_1 H_{\text{norm}}^{<1>} = \mu_2 H_{\text{norm}}^{<2>} \quad (\text{d.2})$$

$$\text{De la Ley de Faraday: } E_{\text{tan}}^{<1>} = E_{\text{tan}}^{<2>} \quad (\text{d.3})$$

$$\text{De la Ley de Ampere: } H_{\text{tan}}^{<1>} = H_{\text{tan}}^{<2>} \quad (\text{d.4})$$

Dichas ecuaciones indican que la componente normal del campo eléctrico no es continua cuando existen cargas libres en los límites de estratos, a diferencia de la componente normal del campo magnético.

Con respecto a las componentes tangenciales se observa que son continuas para ambos campos. Aunque cuando existe conductividad infinita en el medio, el campo magnético tangencial es afectado por la superficie de corriente.

Los estudios realizados con el Radar de Penetración de Suelos se realizan con reflexiones de muy bajo ángulo, es decir, que trabajan con incidencia normal, por lo tanto los campos magnético y eléctrico son tangenciales a la interface, ver figura 2.5. Entonces las ecuaciones de borde de interés son las dos últimas.

Se sabe que cuando la ondícula pasa por una interface, parte de la energía se refleja y parte se transmite, aplicando dicho fenómeno en las ecuaciones de borde de interés queda:

$$(E_i + E_r)_{\text{tan}}^{<1>} = (E_t)_{\text{tan}}^{<2>} \quad (\text{d.5})$$

$$(H_i + H_r)_{\text{tan}}^{<1>} = (H_t)_{\text{tan}}^{<2>} \quad (\text{d.6})$$

Donde i, r, t son los índices incidente, reflejado y transmitido respectivamente.

Hay dos ecuaciones con cuatro incógnitas, E_r , E_t , H_r , H_t . Sin embargo, se puede relacionar los campos magnéticos con el campo eléctrico por medio de la impedancia: $H_x = E_x / z_x^*$, resultando dos ecuaciones con dos incógnitas:

$$E_i + E_r = E_t \quad (d.7)$$

$$\frac{E_i}{z_1^*} - \frac{E_r}{z_1^*} = \frac{E_t}{z_2^*} \quad (d.8)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones:

$$E_r = R^* E_i \quad (d.9)$$

$$E_t = T^* E_i \quad (d.10)$$

Donde R^* y T^* son los coeficientes de reflexión y transmisión respectivamente,

$$R_{12}^* = \frac{1 - \frac{z_1^*}{z_2^*}}{1 + \frac{z_1^*}{z_2^*}} \quad \text{Coeficiente de Reflexión.} \quad (d.11)$$

$$T_{12}^* = \frac{2}{1 + \frac{z_1^*}{z_2^*}} \quad \text{Coeficiente de Transmisión.} \quad (d.12)$$

APÉNDICE E.

Valores empíricos para γ_h , de suelos basados en n (número de golpes).

Tabla E.1. Valores empíricos para γ_h , de suelos cohesivos basados en n
(número de golpes), Bowles (1982):

Consistencia	Muy blanda	Blanda	Media	Compacta	Muy ompacta	Dura
N	0-2	2-4	4-8	8-16	16-32	>32
Peso unitario (T/m3)	1,6-1,9	1,6-1,9	1,7-2	1,8-2	1,9-2,2	2,2

Tabla E.2. Valores empíricos para γ_h , de suelos granulares basados en n,
(número de golpes), Bowles (1982):

Parámetro	Muy Suelta	Suelta	Media	Densa	Muy Densa
N	5-10	8-15	10-40	20-70	>35
Peso unitario (T/m3)	1,1-1,6	1,4-1,8	1,7-2	1,7-2,2	2-2,3

APENDICE F.

Deducción de las ecuaciones de porosidad y saturación mediante datos geotécnicos.

Figura F. Modelo trifásico.

Los subíndices encontrados a lo largo del apéndice son: a, aire; w, agua y s, suelo.

Las fórmulas a utilizar son:

Peso unitario: $\gamma_h = \frac{W}{V}$ [gr/cm³] (f.1)

Siendo, W peso y V volumen.

Peso total: $W = W_w + W_s$ [gr] (f.2)

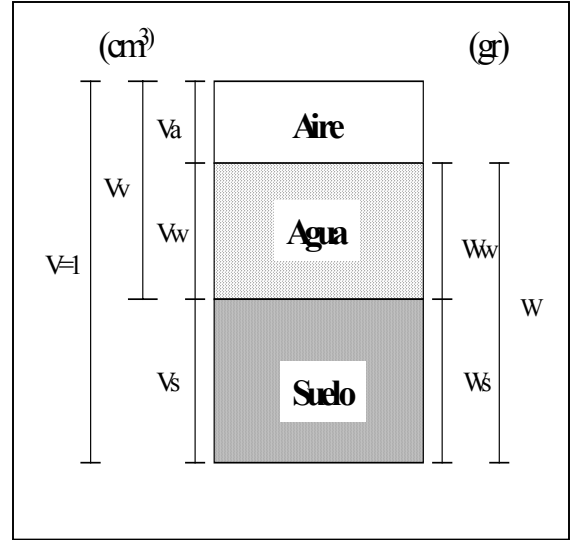
Gravedad específica:

$G_s = \frac{W_s}{V_s \cdot \gamma_w}$ (f.3)

Humedad: $hum = \frac{W_w}{W_s}$ (f.4)

Porosidad: $\phi = \frac{V_v}{V}$ (f.5)

Saturación: $Sat = \frac{V_w}{V_v}$ (f.6)



Los parámetros conocidos son: Gravedad específica G_s , Peso unitario γ_h , y humedad.

Despejando de la fórmula (f.1) el peso del agua, y sabiendo que el peso unitario del agua es 1 gr/cm³, se obtiene que:

$W_w = \underbrace{\gamma_w}_{1 \text{ gr/cm}^3} \cdot V_w$ [gr] (f.7)

Observando la Figura F se asume que el volumen total de la muestra es 1cm³, entonces el valor del peso unitario de la muestra queda:

$\gamma_h = \frac{W}{V \} 1 \text{ cm}^3}$ [gr/cm³] (f.8)

Despejando W_w de la fórmula (f.4) y sustituyéndolo en la fórmula de peso total

(f.2) nos queda:

$$W_w = hum \cdot W_s \quad [gr] \quad (f.9)$$

Entonces:

$$W = hum \cdot W_s + W_s \quad [gr] \quad (f.10)$$

Igualando f.10 con f.8 nos queda que γ_h es:

$$\gamma_h = \frac{(hum + 1)W_s}{1cm^3} \quad [gr/cm^3] \quad (f.11)$$

Despejando W_s :

$$W_s = \frac{\gamma_h \cdot 1cm^3}{(1 + hum)} \quad [gr] \quad (\text{Fórmula para } W_s) \quad (f.12)$$

Sustituyendo esta ecuación (f.12) en la de humedad (f.4) y despejando W_w :

$$W_w = \frac{hum \cdot \gamma_h \cdot 1cm^3}{1 + hum} \quad [gr] \quad (\text{Fórmula para } W_w) \quad (f.13)$$

Ahora sustituyendo f.13 en la ecuación f.7 y despejando V_w :

$$V_w = \frac{hum \cdot \gamma_h \cdot 1cm^3}{(1 + hum) \cdot \underbrace{\gamma_w}_{1gr/cm^3}} \quad [cm^3] \quad (\text{Fórmula para } V_w) \quad (f.14)$$

Despejando V_s en la ecuación de gravedad específica y sustituyendo la fórmula f.12:

$$V_s = \frac{W_s}{G_s \cdot \gamma_w} \quad [cm^3] \quad (f.15)$$

$$V_s = \frac{\gamma_h \cdot 1cm^3}{(1 + hum) \cdot G_s \cdot \underbrace{\gamma_w}_{1gr/cm^3}} \quad [cm^3] \quad (\text{Fórmula para } V_s) \quad (f.16)$$

Observando la figura F el volumen total es: $V = V_a + V_w + V_s = V_v + V_s$ y
 asumiendo anteriormente que $V = 1 \text{ cm}^3$. Entonces despejando V_v , y sustituyendo
 la ecuación f.16:

$$V_v = V - V_s \quad [\text{cm}^3] \quad (\text{f.17})$$

$$V_v = 1 \text{ cm}^3 - \frac{\gamma_h \cdot 1 \text{ cm}^3}{(1 + hum) \cdot G_s \cdot \underbrace{\gamma_w}_{1 \text{ gr} / \text{cm}^3}} \quad [\text{cm}^3] \quad (\text{f.18})$$

Entonces, la porosidad quedaría de la siguiente manera:

$$\phi = \frac{V_v}{V} = \frac{1 \text{ cm}^3 - \frac{\gamma_h \cdot 1 \text{ cm}^3}{(1 + hum) \cdot G_s \cdot \underbrace{\gamma_w}_{1 \text{ gr} / \text{cm}^3}}}{1 \text{ cm}^3} \quad (\text{f.19})$$

$$\boxed{\phi = 1 - \frac{\gamma_h}{(1 + hum) \cdot G_s \cdot \underbrace{\gamma_w}_{1 \text{ gr} / \text{cm}^3}}} \quad (\text{f.20})$$

Y la saturación queda:

$$Sat = \frac{V_w}{V_v} = \frac{\frac{hum \cdot \gamma_h \cdot 1 \text{ cm}^3}{(1 + hum) \cdot \underbrace{\gamma_w}_{1 \text{ gr} / \text{cm}^3}}}{1 \text{ cm}^3 - \frac{\gamma_h \cdot 1 \text{ cm}^3}{(1 + hum) \cdot G_s \cdot \underbrace{\gamma_w}_{1 \text{ gr} / \text{cm}^3}}} \quad (\text{f.21})$$

$$\boxed{Sat = \frac{hum \cdot \gamma_h \cdot G_s}{(1 + hum) \cdot G_s \cdot \underbrace{\gamma_w}_{1 \text{ gr} / \text{cm}^3} - \gamma_h}} \quad (\text{f.22})$$

APENDICE G.

Deducción de la utilización del valor absoluto de los coeficientes de Reflexión y Transmisión.

Se tiene que las ecuaciones de las ondas electromagnéticas pueden ser de la siguiente manera:

$$f(t)=A \cos(wt) + i B \sin(wt) \quad (g.1)$$

Ahora suponga la ecuación de una onda sinusoidal, que varía en el tiempo, y con una amplitud α en un tiempo t específico:

$$f(t)=\alpha \cos(wt+\phi) \quad (g.2)$$

Aplicando la identidad de suma de ángulos en cosenos se obtiene:

$$f(t)=\alpha [\cos(wt)\cos(\phi)-\sin(wt)\sin(\phi)] \quad (g.3)$$

Se toma como:

$$A=\alpha \cos(\phi) \text{ y} \quad (g.4)$$

$$B=\alpha \sin(\phi) \quad (g.5)$$

La función quedaría como: $f(t)=A \cos(wt) + B \sin(wt)$, dicha ecuación describe a la onda electromagnética mencionada.

Se elevan las dos ecuaciones anteriores al cuadrado y sumando:

$$\begin{array}{r} A^2=\alpha^2 \cos^2(\phi) \quad + \\ \underline{B^2=\alpha^2 \sin^2(\phi)} \\ A^2+B^2=\alpha^2 \cos^2(\phi)+\alpha^2 \sin^2(\phi) \end{array} \quad (g.6)$$

Tomando el factor común α^2 :

$$A^2+B^2=\alpha^2 [\cos^2(\phi)+ \sin^2(\phi)] \quad (g.7)$$

Se sustituye la identidad: $\cos^2(\phi)+ \sin^2(\phi)=1$, y se despeja la amplitud y el tiempo específico α :

$$\alpha = [A^2+B^2]^{1/2} \quad (g.8)$$

“Se observa que la ecuación del cálculo de amplitud (g.8) es el valor absoluto de las amplitudes de la parte imaginaria y real de la onda electromagnética”.

APENDICE H.

Selección del intervalo de muestreo en tiempo.

Uno de los parámetros que es determinante en el diseño de la adquisición es el intervalo de muestreo en tiempo para la definición de las trazas.

Este intervalo se encuentra controlado por el intervalo de Nyquist, el cual se encuentra definido por lo mínimo la mitad del período de la más alta frecuencia.

$$T_N \geq 1/(2W) \quad (h.1)$$

Donde T_N es el intervalo Nyquist y W es la frecuencia máxima.

Por lo tanto la frecuencia de Nyquist debe mayor o igual que el doble de la frecuencia máxima.

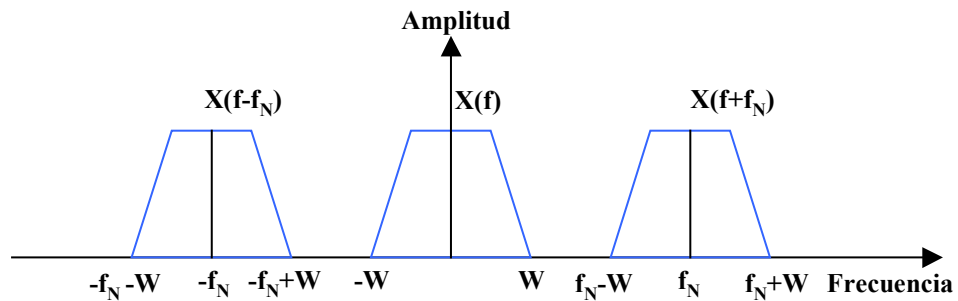


Figura H. Intervalo de muestreo en el tiempo

Según la figura es evidente que si es tomado $f_N - W \geq W$, es decir que $f_N \geq 2W$, no existirá solapamiento entre los espectros parciales, por lo tanto el efecto de “aliasing” quedaría solucionado.

El software de adquisición utilizado, para el radar, recomienda que la frecuencia utilizada como Nyquist sea tres veces el valor de la antena empleada.

APÉNDICE I.

Descripción de los tendidos adquiridos con el GPR.

Tabla I. Descripción de los tendidos de GPR adquiridos

TENDIDOS GPR DIQUES

Fecha: 27/06/2003 SECCION A

Tendido	Tipo adquisición	Rumbo	Frec. (Mhz)	Int. Muestreo (m)	Sep. Antena (m)	Longitud (m)
P1S6-LON	Reflexion	S-N	50	0,5	2	24,5
P3S6-LON	Reflexion	N60E	100	0,1	1	16,3
P3S6-TR	Reflexion	S-N	50	0,5	2	16,5

Fecha: 25/07/2003 SECCION A

Tendido	Tipo adquisición	Rumbo	Frec.(Mhz)	Int. Muestreo (m)	Sep. Antena (m)	Longitud (m)
2507LON1	Reflexion	N20W	100	0,1	1	24,7
2507LON2	Reflexion	N20W	50	0,5	2	24
257ROCA2	Reflexion	N20W	100	0,1	1	15,6
257ROCA4	Reflexion	N20W	100	0,2	1	16
257ROCA5	Reflexion	N20W	50	0,5	2	15
257ROCA6	Reflexion	N20W	50	0,5	2	15
CMPLO2	CMP	N20W	100	0,2	1 (inicialmente)	24,2
CNPLON3	CMP	N20W	50	0,4	2 (inicialmente)	22,8

Fecha: 26/07/2003 SECCION B

Tendido	Tipo adquisición	Rumbo	Frec. (Mhz)	Int. Muestreo (m)	Sep. Antena (m)	Longitud (m)
CMP267L1	CMP	N30W	100	0,2	1 (inicialmente)	23,8
CMP267L2	CMP	N30W	50	0,4	2 (inicialmente)	22,8
CMP267L3	CMP	N30W	50	0,4	2 (inicialmente)	22,8
CMP267L4	CMP	N30W	100	0,2	1 (inicialmente)	23,8
CMP267L5	CMP	N32W	50	0,4	2 (inicialmente)	20
CMP267L6	CMP	N32W	100	0,2	1 (inicialmente)	20,8
CMROC261	CMP	N28W	100	0,4	1 (inicialmente)	24,4
LON22607	Reflexión	N30W	50	0,5	2	24
LON32607	Reflexión	N30W	50	0,5	2	23
LON42607	Reflexión	N30W	100	0,1	1	23,9
LON52607	Reflexión	N32W	50	0,5	2	20
LON62607	Reflexión	N32W	100	0,1	1	21
LONR2607	Reflexión	N30W	100	0,1	1	24
ROCA2671	Reflexión	N28W	100	0,2	1	24
ROCA2672	Reflexión	N28W	50	0,5	2	23
TR12607	Reflexión	N60E	50	0,5	2	20
TR22607	Reflexión	N60E	100	0,1	1	20,9
TR3267NA	Reflexión	N60E	100	0,1	1	14,9
TR4267NA	Reflexión	N60E	50	0,5	2	14
TR4CMPNA	CMP	N60E	50	0,4	2 (inicialmente)	14
TRCMPL1	CMP	N60W	50	0,4	2 (inicialmente)	19,6
TRCMPL2	CMP	N60E	100	0,2	1 (inicialmente)	21
TRCMPL3N	CMP	N60E	100	0,2	1 (inicialmente)	15

Fecha: 21/01/2004

TERRENO NATURAL SECCIÓN B

Tendido	Tipo adquisición	Rumbo	Frec. (Mhz)	Int. Muestreo (m)	Sep. Antena (m)	Longitud (m)
CVPL1NA5	CMP	N32W	50	0,4	2 (inicialmente)	19
CVPL2NA5	CMP	N32W	100	0,2	1 (inicialmente)	25
CMT1NA5	CMP	N60E	50	0,2	1 (inicialmente)	11
CVPT2NA5	CMP	N60E	100	0,4	2 (inicialmente)	10,2
LON1NA5	Reflexión	N32W	50	0,5	2	22
LON2NA5	Reflexión	N32W	100	0,1	1	17
LON3NA5	Reflexión	N32W	50	0,5	2	21
LON4NA5	Reflexión	N32W	100	0,1	1	20
LON5NA5	Reflexión	N32W	50	0,5	2	21,5
LON6NA5	Reflexión	N32W	100	0,1	1	20
LON7NA5	Reflexión	N32W	50	0,5	2	20
LON8NA5	Reflexión	N32W	100	0,1	1	10,3
TR1NA5	Reflexión	N60E	50	0,5	2	19,6
TR2NA5	Reflexión	N60E	100	0,1	1	11,5
TR3NA5	Reflexión	N60E	50	0,5	2	11,3
TR4NA5	Reflexión	N60E	100	0,1	1	11,5
TR5NA5	Reflexión	N60E	50	0,5	2	11,4
TR6NA5	Reflexión	N60E	100	0,1	1	11,5
TR7NA5	Reflexión	N60E	50	0,5	2	10
TR8NA5	Reflexión	N60E	100	0,1	1	10,2

Fecha: 22/01/2004

ZONA INYECCIÓN RIPIOS

Tendido	Tipo adquisición	Rumbo	Frec. (Mhz)	Int. Muestreo (m)	Sep. Antena (m)	Longitud (m)
CVPL1LA	CMP	N-S	100	0,2	1 (inicialmente)	5,8
CVPT11LA	CMP	W-E	100	0,2	1 (inicialmente)	5
LON11LA	Reflexión	N-S	100	0,1	1 (inicialmente)	6,5
LON31LA	Reflexión	N-S	100	0,1	1	3,5
LON41LA	Reflexión	N-S	100	0,1	1	6,7
LON51LA	Reflexión	N-S	100	0,1	1	6,4
TR11LA	Reflexión	W-E	100	0,1	1	4,8
TR21LA	Reflexión	W-E	100	0,1	1	4,1
TR31LA	Reflexión	W-E	100	0,1	1	5,1
TR41LA	Reflexión	W-E	100	0,1	1	6,5

APÉNDICE J.

**Impedancia y Coeficientes de Reflexión y Transmisión de los estratos
procedentes de los datos geotécnicos.**

Tabla J.1 Impedancia, coeficientes de reflexión y transmisión sobre el tope de la Sección A:

ESTRATO	Profundidad	IMPEDANCIA (V/A)		COEFICIENTE REFLEXIÓN		COEFICIENTE TRANSMISIÓN	
		50 Mhz.	100 Mhz.	50 Mhz.	100 Mhz.	50 Mhz.	100 Mhz.
AIRE	0	3,77E+02	3,77E+02	-7,48E-01	-6,90E-01	2,84E-01	3,25E-01
1	2	5,44E+01	6,91E+01	2,90E-01	2,02E-01	1,26E+00	1,18E+00
2	3	9,88E+01	1,04E+02	-5,56E-02	-4,09E-02	9,55E-01	9,63E-01
3	5	8,84E+01	9,59E+01	-2,39E-01	-1,61E-01	8,13E-01	8,81E-01
5	7	5,43E+01	6,93E+01	-2,35E-01	-1,98E-01	7,75E-01	8,22E-01
5(NF)	8	3,36E+01	4,64E+01	-3,14E-02	-2,83E-02	9,72E-01	9,81E-01
6	9	31,5816	43,846				

Tabla J.2 Impedancia, coeficientes de reflexión y transmisión sobre la Berma 1 de la Sección A:

ESTRATO	Profundidad	IMPEDANCIA (V/A)		COEFICIENTE REFLEXIÓN		COEFICIENTE TRANSMISIÓN	
		50 Mhz.	100 Mhz.	50 Mhz.	100 Mhz.	50 Mhz.	100 Mhz.
AIRE	0	3,77E+02	3,77E+02	-5,17E-01	-5,17E-01	4,83E-01	4,83E-01
4	0,5	1,20E+02	1,20E+02	-3,98E-01	-2,84E-01	9,66E-01	7,70E-01
5	3	5,17E+01	6,69E+01	-2,35E-01	-1,98E-01	7,75E-01	8,22E-01
5(NF)	3,5	3,20E+01	4,48E+01	-3,14E-02	-2,83E-02	9,72E-01	9,81E-01
6	4,5	3,00E+01	4,23E+01				

Tabla J.3 Impedancia, coeficientes de reflexión y transmisión sobre el dique de la Sección B

ESTRATO	Profundidad	IMPEDANCIA (V/A)		COEFICIENTE REFLEXIÓN		COEFICIENTE TRANSMISIÓN	
		50 Mhz.	100 Mhz.	50 Mhz.	100 Mhz.	50 Mhz.	100 Mhz.
AIRE	0	3,77E+02	3,77E+02	-7,46E-01	-6,91E-01	2,84E-01	3,22E-01
1	1,5	5,49E+01	6,87E+01	1,39E-01	1,01E-01	1,13E+00	1,09E+00
2	5	7,26E+01	8,42E+01	-3,13E-01	-2,40E-01	7,35E-01	8,36E-01
2(NF)	5,5	3,79E+01	5,16E+01	-1,08E-01	-1,06E-01	8,92E-01	8,94E-01
3	8,5	3,06E+01	4,17E+01	-3,93E-02	-3,77E-02	9,61E-01	9,63E-01
4	9	2,83E+01	3,87E+01				

Tabla J.4 Impedancia, coeficientes de reflexión y transmisión sobre el terreno natural de la Sección B

ESTRATO	Profundidad	IMPEDANCIA (V/A)		COEFICIENTE REFLEXIÓN		COEFICIENTE TRANSMISIÓN	
		50 Mhz.	100 Mhz.	50 Mhz.	100 Mhz.	50 Mhz.	100 Mhz.
AIRE	0	3,77E+02	3,77E+02	-8,53E-01	-7,95E-01	1,82E-01	2,34E-01
1	3,5	2,98E+01	4,30E+01	9,70E-02	8,14E-02	1,09E+00	1,05E+00
2	4,5	3,62E+01	5,06E+01	-1,59E-01	-1,35E-01	8,48E-01	8,78E-01
3	12	2,63E+01	3,86E+01	-1,36E-01	-1,25E-01	8,66E-01	8,80E-01
4	13	2,00E+01	3,00E+01	2,30E-01	2,12E-01	1,23E+00	1,21E+00
5	15	3,20E+01	4,61E+01				