

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE



Caracterización de Tuberías Enterradas para Redes de Abastecimiento en Servicio Mediante el Análisis de Imágenes Obtenidas con Radar de Subsuelo (Ground Penetrating Radar – GPR)

**TESINA DE MASTER
PRESENTADA POR**

Ing. David Ayala Cabrera

**Director: Dr. Rafael Pérez García
Codirector: Dr. Joaquín Izquierdo Sebastián**

**Valencia, España
Diciembre de 2009**

Caracterización de Tuberías Enterradas para Redes de Abastecimiento en Servicio Mediante el Análisis de Imágenes Obtenidas con Radar de Subsuelo (Ground Penetrating Radar – GPR).

Resumen

Este trabajo se plantea como un primer avance para el desarrollo de una herramienta metodológica que permita dar respuesta rápida a la problemática del desconocimiento de los trazados y características de los componentes de los sistemas de abastecimiento urbano en uso, empleando metodologías que permitan su conocimiento sin alterar sus condiciones y las características del entorno (Métodos no Destructivos), concretamente a través del estudio de las imágenes obtenidas con GPR (Ground Penetrating Radar). El estudio se lleva a cabo tomando como punto de partida la amplitud de onda, que es uno de los parámetros que proporciona una respuesta diferenciada del paso de las señales emitidas por el GPR a través de los distintos materiales inspeccionados. Se presentan los principios y procedimientos aplicados para la obtención de la herramienta y la aplicación de la misma en ensayos de laboratorio, realizados en condiciones controladas en un tanque de laboratorio, con la variación de cuatro materiales de tubería enterrados en suelo seco.

Tras la aplicación del procedimiento planteado en esta tesis, se obtuvo en ensayos de laboratorio: mejora sustancial de la visualización de las características en conjunto de las tuberías enterradas, permitiéndose la visualización del material de polietileno (plásticos en general), lo que representa una característica muy interesante, ya que la permitividad dieléctrica del PE es del mismo orden de magnitud que la del suelo. De igual manera se observa la aparición en las diferentes capas de las características de las tuberías enterradas en suelo, acorde a su composición, generándose la posibilidad, principalmente en grupos de conductos muy cercanos entre sí; para los cuales dadas las características que presentan tras el paso de la señal de GPR a través de los materiales, las mismas tienden a superponerse en las imágenes, dificultándose la visualización en imágenes en bruto. Por último, cabe indicar que se trata de un proceso de cuya aplicación es sencilla y no dependiente de la consideración y criterio del especialista (proceso no subjetivo), que brinda la posibilidad de ser repetible y también, con los adecuados ajustes, la posibilidad de parametrizar radargramas con el objetivo servir como base para el entrenamiento de sistemas inteligentes para la caracterización de Componentes de Sistemas de Abastecimiento en servicio.

Palabras Clave: Radar de subsuelo, Ensayos no destructivos (END), Localización y caracterización de tuberías, Análisis y procesado de señales e imágenes.

Characterization of Buried Pipes in Water Supply Systems in use Through GPR (Ground Penetrating Radar) Image Analysis.

Abstract

This work is a first attempt to develop a methodological tool that allows to give a quick response to the lack of knowledge of the layouts and the characteristics of the components of an urban water supply system, using techniques that alter neither the network conditions nor the characteristics of the environment (non destructive techniques). Specifically, the methodology is based on the study of the images obtained with GPR (Ground Penetrating Radar). The study is carried out taking as a starting point the wave amplitude, which is one of the parameters that provides a differential response to the signals emitted and received by the GPR passing through the different inspected materials. The used principles and procedures to develop the tool are presented, and the tool is applied to different laboratory experiments carried out under conditions controlled in a laboratory setting that considers the variation introduced by four different pipe materials buried in dry floor.

The following main results have been obtained. First, a substantial improvement of the joint visualization of the characteristics of a group of buried pipes, which allows the difficult visualization of polyethylene (PE) materials (plastic materials, in general). This feature is very interesting, since PE and ground have dielectric characteristics of the same order. It can also be clearly observed the appearance in the different layers of the buried pipes characteristics, according to their composition. The interest of this result resides in its ability to discriminate among different pipes, especially in groupings of very close pipes. Finally, it is a process whose application is simple and independent of skills and experience (it is not a subjective process), which is easily repeatable, and also, with the appropriate adjustments, gives the possibility that radargrams will be parameterized with the purpose of serving as training data for intelligent systems that are able to characterize the components of water supply systems under operation.

Keywords: Ground Penetrating Radar (GPR), Nondestructive Methods (NMD), Localization and Characterization of Pipelines, Signal and images Processing and analysis.

Caracterització de Canonades Soterrades per a Xarxes d'Abastiment en Servei Per mitjà de l'Anàlisi d'Imatges Obtingudes amb Radar de Subsòl (Ground Penetrating Radar – GPR).

Resum

Este treball es planteja com un primer avanç per al desenrotllament d'una ferramenta metodològica que permeta donar resposta ràpida a la problemàtica del desconeixement dels traçats i característiques dels components dels sistema d'abastiment urbà en ús, emprant metodologies que permeten el seu coneixement sense alterar les seues condicions i les característiques de l'entorn (Mètodes no Destructius), concretament a través de l'estudi de les imatges obtingudes amb GPR (Ground Penetrating Radar). L'estudi es Du a terme prenent com a punt de partida l'amplitud d'onda, que és un dels paràmetres que proporciona una resposta diferenciada del pas dels senyals emesos pel GPR a través dels distints materials inspeccionats. Es presenten els principis i procediments aplicats per a l'obtenció de la ferramenta i l'aplicació de la mateixa en assajos de laboratori, realitzats en condicions controlades en un tanc de laboratori, amb la variació de quatre materials de canonada soterrats en sòl sec.

Després de l'aplicació del procediment plantejat en esta tesina, es va obtindre en assajos de laboratori: millora substancial de la visualització de les característiques en conjunt de les canonades soterrades, permetent-se la visualització del material de polietilè (plàstics en general), la qual cosa representa una característica molt interessant, ja que la permitivitat dielèctrica del PE és del mateix orde de magnitud que la del sòl. De la mateixa manera s'observa l'aparició en les diferents capes de les característiques de les canonades soterrades en sòl, d'acord amb la seua composició, generant-se la possibilitat, principalment en grups de conductes molt pròxims entre si; per als quals donades les característiques que presenten després del pas del senyal de GPR a través dels materials, les mateixes tendixen a superposar-se en les imatges, dificultant-se la visualització en imatges en brut. Finalment, cal indicar que es tracta d'un procés de l'aplicació del qual és senzilla i no dependent de la consideració i criteri de l'especialista (procés no subjectiu), que brinda la possibilitat de ser repetible i també, amb els adequats ajustos, la possibilitat de parametritzar radargrames amb l'objectiu servir com a base per a l'entrenament de sistemes intel·ligents per a la caracterització de Components de Sistemes d'Abastiment en servei.

Paraules Clau: Radar de subsòl, Assajos no destructius (END), Localització i caracterització de canonades, Anàlisi i processat de senyals i imatges.

Índice

CAPÍTULO 1..... 1

INTRODUCCIÓN..... 1

1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4. ESQUEMA DEL DOCUMENTO	5

CAPÍTULO 2..... 6

GEORADAR (GROUND PENETRATING RADAR, GPR)..... 6

2.1. INTRODUCCIÓN.....	6
2.2. MÉTODOS DE PROSPECCIÓN	6
2.3. UN POCO DE HISTORIA DEL GPR	7
2.4. GENERALIDADES DEL GEORADAR.....	8
2.5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL GPR	10
2.5.1. ECUACIONES DE MAXWELL.....	10
2.5.2. ECUACIÓN DEL GPR.....	11
2.6. PARÁMETROS ELECTROMAGNÉTICOS	12
2.6.1. CONDUCTIVIDAD.....	12
2.6.2. PERMITIVIDAD ELÉCTRICA.....	12
2.6.3. VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN Y LONGITUD DE ONDA	12
2.6.3.1. Velocidad de Propagación de Onda	12
2.6.3.2. Longitud de Onda en un Medio Diferente del Vacío.....	13
2.6.4. FACTOR DE ATENUACIÓN	13
2.6.5. REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN	13
2.7. PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN DE GPR.....	15
2.7.1. FILTROS.....	15
2.7.1.1. Filtros Horizontales (espaciales).....	16
2.7.1.2. Filtros Verticales (temporales).....	16
2.7.2. DECONVOLUCIÓN PREDICTIVA.....	16
2.7.3. MIGRACIÓN	16
2.7.4. TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (TRF).....	17
2.7.5. TRANSFORMADA HILBERT	17
2.7.6. PROCEDIMIENTOS DE CORRECCIÓN DE SEÑALES	17
2.7.6.1. Remoción de Fondo	17
2.7.6.2. Correcciones Estáticas.....	17
2.7.6.3. Ganancia.....	18
2.7.6.4. Superposición de Trazas.....	18

CAPÍTULO 3..... 19

POSPROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE GEORADAR – PRINCIPIOS DEL PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO EXPERIMENTAL PLANTEADO..... 19

3.1. INTRODUCCIÓN.....	19
3.2. PRINCIPIOS DEL PROCEDIMIENTO PLANTEADO.....	19
3.3. DIVISIÓN EN RANGOS DE AMPLITUDES DE ONDA	20
3.3.1. PROCEDIMIENTO.....	20
3.3.2. APLICACIÓN – MATRIZ A.	22
3.4. EXTRACCIÓN POR PARTES DE LA ONDA	30
3.4.1. EXTRACCIÓN DE ONDAS PARTIENDO DESDE SU VALOR MÍNIMO DE AMPLITUD HASTA SU MÁXIMO.	30
3.4.1.1. Procedimiento.....	30
3.4.1.2. Aplicación a la Matriz A. Extracción de la Parte Superior de la Onda con Punto de Inicio en Valores Mínimos de Amplitud.....	31
3.4.1.3. Aplicación a la Matriz A. Extracción de la Parte Inferior de la Onda con Punto de Inicio en Valores Mínimos de Amplitud.....	33
3.4.2. EXTRACCIÓN DE ONDAS PARTIENDO DESDE SU VALOR MÍNIMO DE AMPLITUD HASTA SU MÁXIMO.	34
3.4.2.1. Procedimiento.....	34
3.4.2.2. Aplicación a la Matriz A. Extracción de la Parte Superior de la Onda con Punto de Inicio en Valores Máximos de Amplitud.	36
3.4.2.3. Aplicación a la Matriz A. Extracción de la Parte Inferior de la Onda con Punto de Inicio en Valores Máximos de Amplitud.	37
3.5. CREACIÓN DE LAS MATRICES T3, T5, T9, T12, T14 Y T15	39
3.6. CONCLUSIONES.....	40

CAPÍTULO 4..... 42

POSPROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE GEORADAR EN ENSAYOS DE LABORATORIO EN TUBERÍAS ENTERRADAS DE DIFERENTES MATERIALES 42

4.1. INTRODUCCIÓN.....	42
4.2. METODOLOGÍA – ENSAYOS EN TUBERÍAS ENTERRADAS	42
4.2.1. ENSAYOS EN PARALELO DE DIFERENTES MATERIALES DE TUBERÍA ENTERRADOS.	43
4.2.2. ENSAYOS EN SIMULTÁNEO DE DIFERENTES MATERIALES DE TUBERÍA ENTERRADOS.....	44
4.3. IMÁGENES EN BRUTO DE LAS PROSPECCIONES REALIZADAS EN LABORATORIO CON TUBERÍAS ENTERRADAS DE DIFERENTES MATERIALES.	45
4.3.1. IMÁGENES EN BRUTO – ENSAYOS EN PARALELO.....	45
4.3.2. IMÁGENES EN BRUTO – ENSAYO EN SIMULTÁNEO.	47
4.4. POSPROCESAMIENTO. ANÁLISIS MEDIANTE LAS MATRICES T3, T5, T9 Y T12 - ENSAYOS EN TUBERÍAS ENTERRADAS.	48
4.4.1. PROCESAMIENTO POR MATRICES T3, T5, T9 Y T12 – ENSAYOS EN PARALELO.	48
4.4.2. PROCESAMIENTO POR MATRICES T3, T5, T9 Y T12 – ENSAYO EN SIMULTÁNEO.	56
4.5. POSPROCESAMIENTO. ANÁLISIS MEDIANTE MATRICES T14 Y T15 – ENSAYOS EN TUBERÍAS ENTERRADAS..	58
4.5.1. PROCESAMIENTO POR MATRICES T14 Y T15 – ENSAYOS EN PARALELO.	58
4.5.2. PROCESAMIENTO POR MATRICES T14 Y T15 – ENSAYO EN SIMULTÁNEO.....	71
4.6. CONCLUSIONES.....	78

CAPÍTULO 5..... 79

<u>CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS</u>	<u>79</u>
5.1. INTRODUCCIÓN.....	79
5.2. DESARROLLOS FUTUROS	82
<u>REFERENCIAS</u>	<u>83</u>

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

Los sistemas de abastecimiento de agua están formados por numerosos y variados componentes necesarios para su funcionamiento. En los países en desarrollo, por lo general, no se realiza un control exhaustivo de las tuberías instaladas, ni tampoco de los cambios que se realizan en el sistema, por lo que, en muchos casos, se desconoce las características de dichas tuberías, tales como su diámetro, material, estado, tiempo de uso y otros. Esta circunstancia dificulta en gran medida la práctica de una buena gestión y planificación del sistema. No es necesario ir muy lejos para encontrar sistemas de abastecimiento que no cuentan con sistemas de referenciación adecuados o apenas se encuentran en una implementación incipiente; en muchos casos, la única referencia la constituye un juego de planos que, con el tiempo, se va quedando obsoleto, se deteriora o se pierde, de forma que solamente queda la memoria viva del sistema en el conocimiento de los operarios que trabajan en él.

Para estudiar en detalle los componentes de un sistema de abastecimiento en operación y levantar la información por métodos tradicionales sería necesario realizar catas y remover cantidades considerables de suelo, con una ingente cantidad de trabajo laborioso, un coste muy elevado y gran cantidad de molestias para los ciudadanos.

El conocimiento exhaustivo del sistema y de sus componentes es necesario para poder emprender acciones y tomar decisiones relativas a la gestión técnica del mismo, lo que comenzaría normalmente mediante la realización de un modelo matemático apropiado, que pueda ser utilizado, entre otras cosas, en la detección de acometidas ilegales, la estimación de volumen de agua perdida, el planteamiento de escenarios de funcionamiento del sistema, el estudio de la evolución de contaminantes que han entrado en la red, y otros usos.

Este proyecto se plantea como un primer avance para el desarrollo de una herramienta que permita dar respuesta a la problemática del desconocimiento de los trazados y características de los componentes de un sistema de abastecimiento urbano en uso; para ello se empleará el georadar, el cual es una técnica no invasiva, que permite el conocimiento de los materiales en el subsuelo sin alterar el medio, y cuyo funcionamiento se basa en la emisión de señales electromagnéticas al suelo con su posterior recepción.

El objetivo principal del trabajo es evaluar la viabilidad del método propuesto de análisis de radargramas para la caracterización de los componentes del sistema de abastecimiento, siendo estudiadas en primera instancia las tuberías, observando la respuesta del equipo a la variación de algunos tipos de materiales y medios. Para ello se realizaron ensayos de laboratorio, en las instalaciones del *Centro Multidisciplinar de Modelación de Fluidos – CMMF*, de la Universidad Politécnica de Valencia, con tuberías enterradas de diferentes características materiales en un entorno controlado, lo que nos permitió analizar el efecto que tienen estas condiciones y el entorno de la tubería en las condiciones de propagación de la señal.

Esta investigación no pretende abarcar todos los aspectos y espectro de posibilidades que brindan las técnicas no destructivas, en este caso el GPR. La misma pretende, por el contrario, ser un primer avance que sirva como base en la determinación de las características de componentes de sistemas de abastecimiento en servicio, por medio de sistemas de clasificación inteligentes, a fin de generar posibilidades de actuaciones eficaces y eficientes en la misma.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General.

Evaluar la viabilidad del método propuesto de análisis de radargramas para la caracterización de los componentes del sistema de abastecimiento en servicio, siendo estudiadas en primera instancia las tuberías, observando la respuesta del equipo a la variación de algunos tipos de materiales y medios. Con la realización de ensayos de laboratorio, empleando tuberías de diferentes características materiales en un entorno controlado, analizando estas condiciones la propagación de la señal y su respuesta en los radargramas.

1.2.2. Objetivos Específicos.

Realización de ensayos de laboratorio en un tanque, con material de propagación suelo, en el que se instalará la tubería, recopilando información mediante GPR de tuberías de diferentes materiales.

Procesamiento de la información obtenida, extrayendo las características principales de las tuberías en los radargramas.

Generación de una herramienta metodológica para el análisis de componentes de sistemas de abastecimiento, basada en el parámetro amplitud de onda.

Comparación de las características obtenidas de las imágenes de laboratorio en bruto con los resultados obtenidos tras el procesamiento con la herramienta generada.

Establecer conclusiones y recomendaciones generales para su consideración en casos reales.

1.3. Justificación

Un gran número de sistemas de abastecimiento de agua en Europa e Iberoamérica, presentan relativa antigüedad, siendo en numerosos casos desconocida la posición exacta de sus componentes (tuberías, válvulas, etc.). En países en desarrollo, por lo general, no se tiene un control exhaustivo de las tuberías instaladas, desconociéndose características propias y relevantes de los sistemas, tales como el diámetro de las mismas. En otros casos, la red tiene que abastecer espacios muy amplios y/o dispersos, alcanzando los tramos de tuberías longitudes considerablemente largas, lo que hace que la red sea susceptible de sufrir la instalación de acometidas ilegales realizadas por empresas y particulares para utilizar el agua de forma fraudulenta. La ausencia de sistemas de referenciación y control adecuados de los sistemas, dificulta consigo la correcta gestión de los mismos.

Caracterizar una tubería es identificar su conformación y constitución, determinar su material de composición, diámetro interno y externo, tiempo de uso (edad de la tubería), presencia y características de obstrucciones, estado de uso (en uso o desuso), deformación, entre otras características. La disponibilidad de un sistema de caracterización permite la determinación de actuaciones frente a posibles fallos, la detección de acometidas ilegales, proyectar adecuadamente el funcionamiento del mismo, actuar frente a posibles intrusiones de contaminantes y determinar la vulnerabilidad del mismo, entre otros. En términos generales, la caracterización de los sistemas de abastecimiento permite tomar decisiones para la gestión y planificación eficiente de los mismos.

En redes internas de abastecimiento, de igual manera, pero a menor escala, a los sistemas de abastecimiento, con frecuencia se encuentra que los planos de las casas se pierden y constantemente existe la necesidad de hacer reparaciones, especialmente cuando las mismas presentan cierta antigüedad, por lo cual también se hace necesaria la caracterización de este tipo de sistemas.

Es en este punto cuando cobran importancia los métodos que permitan dar respuesta a la problemática del desconocimiento de los trazados y características de los componentes de los sistemas de abastecimiento. Aprovechando los contrastes de las distintas propiedades físicas de los materiales, la caracterización de un sistema de abastecimiento puede llevarse a cabo mediante la utilización de distintos métodos geofísicos. La ventaja de la aplicación de métodos no destructivos para este fin, se basa en el conocimiento de los materiales en el medio sin alterar el entorno, con menores costes. Por sí mismo o en conjunción con otros métodos geofísicos de prospección, el GPR constituye una poderosa herramienta para la investigación de estos componentes. La ventaja de su aplicación radica en las propiedades de trabajo y obtención de resultados que presenta dicha metodología. Entre éstas, destacan su carácter no destructivo, la obtención de una visión global del área estudiada y una aplicación que resulta más rápida y económica que el resto de las tecnologías disponibles (Busquet, E.; Casas, A.; *et al.*; 1996).

Los primeros trabajos importantes relacionados con la detección de tuberías enterradas fueron realizados por *Unterberger* y *Ulriksen* en los años '70-'80. Sobre todo este último, de la Universidad de Lund (Suecia), describió en su tesis doctoral (*Application of Impulse Radar to Civil Engineering, Lund University of Technology, 1982*) las varias formas en las cuales se pueden visualizar las tuberías enterradas dependiendo de su contenido, material y espesor. *Lorenzo* y *Cuellar* (1995), de la Universidad de La Coruña, llevaron a cabo varios ensayos y demostraron la utilidad del georadar en la localización de tuberías enterradas. Gracias a la imagen característica de un cilindro obtenida por medio del radar, que nos proporciona dos reflexiones, tuvieron la posibilidad de estimar, en muchos casos, el diámetro de la tubería, ya que la velocidad de transmisión de las ondas en el aire y en el agua (que fluyen dentro de las tuberías) es bien conocida (Tavera, M.; 2008).

La mayoría de prospecciones realizadas con georradar tienden a basar su interpretación en la forma o figura que se observa en el radargrama, que es determinada por el contraste que se obtiene en función de las características de los materiales que encuentra la señal, al ser emitida y posteriormente recibida por el equipo. En otros casos, la aplicación de múltiples etapas de posprocesamiento de los registros proporcionan exitosos resultados. Sin embargo, la interpretación de los resultados, ya sea de manera directa o por la aplicación de métodos de posprocesamiento, debe ser realizada con especial cuidado, ya que la inadecuada aplicación de los mismos puede conducir a errores de interpretación, obteniéndose conclusiones erróneas de los resultados.

Es de esta manera como toma importancia la generación de herramientas que permitan el procesamiento de los registros obtenidos en las prospecciones de georradar de manera no subjetiva y sencilla, que brinden la posibilidad de parametrizar la información y conduzcan a clasificaciones más avanzadas, tales como las que proporcionan los sistemas inteligentes de clasificación, con aplicabilidad en componentes de sistemas de abastecimiento.

1.4. Esquema del Documento

En el **capítulo 1**, se ha introducido el trabajo a desarrollar y se han explicado brevemente los objetivos de la tesina. En el **capítulo 2** se realiza una breve introducción a la historia del georradar y se plantea un repaso a la literatura referente a los principios de funcionamiento del GPR, los principios electromagnéticos de los medios sometidos a prospección y las metodologías más empleadas en el posprocesamiento de los registros de georradar.

Los principios de la metodología experimental planteada para la parametrización de registros de georradar generados en esta tesina se plasman en el **capítulo 3**. Se plantea mediante notación matemática adecuada la formulación y se muestra de manera visual la aplicación tras cada procedimiento planteado, mediante un ejemplo, con el objetivo de generar mayor claridad de los planteamientos.

En el **capítulo 4**, son mostrados los resultados de las prospecciones realizadas a cuatro materiales de tuberías enterradas en suelo seco, con configuraciones de las mismas y con parámetros controlados. En este capítulo, además, se contrastan estos resultados con los obtenidos tras la aplicación del procedimiento planteado en esta tesina y la posterior consecución de las denominadas matrices *T3*, *T5*, *T9*, *T12*, *T14* y *T15*.

Finalmente, en el **capítulo 5** se presentan las conclusiones de este trabajo y se indican las posibles líneas de trabajo y de investigación futuras.

Capítulo 2

Georadar (Ground Penetrating Radar, GPR)

2.1. Introducción

El radar de penetración de suelo (Ground Penetrating Radar, GPR) en algunos casos llamado georadar, radar de subsuelo, radar de sondeo de terreno o radar de penetración terrestre, es una técnica geofísica electromagnética no invasiva para la exploración del subsuelo, para su caracterización y monitoreo (Olhoeft, 2006). En este capítulo se intentará abordar el GPR, desde una perspectiva global a fin de conocer sus características generales, composición, principios básicos de funcionamiento, sus aplicaciones.

2.2. Métodos de Prospección

La geofísica estudia la tierra en su composición, sobre la base de medidas de tipo físico que normalmente se realizan desde la superficie o desde sondeos. Cuando este estudio está relacionado con áreas relativamente pequeñas y profundidades que no sobrepasen pocos kilómetros, para obtener un fin económico inmediato, se habla de geofísica aplicada, y el conjunto de métodos para obtener ese fin constituyen la prospección geofísica. Cuando las áreas son relacionadas a metros o decenas de metros, con aplicación a la obra civil, se habla de geotecnia. En este estudio se hablará de *Geofísica Aplicada* a la ingeniería del agua, en sistemas de abastecimiento.

De la aplicación de estudios geofísicos, se puede obtener información referente a la composición del subsuelo, mediante algún parámetro físico medido en superficie, que puede ser la velocidad de ondas mecánicas, variaciones de campos gravitacionales; las mediciones tratan de detectar diferencias de densidad, intensidad de corriente asociada a la mayor o menor facilidad de propagación de las cargas eléctricas. Esta capacidad de caracterizar rápidamente las condiciones del subsuelo sin perturbar el sitio ofrece el beneficio de costos más bajos, menos riesgo y menor impacto ambiental, dando mejor entendimiento general de las condiciones complejas del sitio.

Los métodos geofísicos se basan en la medición de las propiedades físicas de los elementos que componen el subsuelo (rocas, sedimentos, agua, cavidades, objetos, etc.) y se pueden clasificar en dos tipos: pasivos y activos.

Pasivos, son aquellos que se basan en la detección de las variaciones de las propiedades naturales del terreno, sin introducir señales artificiales. Ejemplos de estos podrían ser: Gravimetría, Potencial espontáneo, Magnetometría, Geoquímica, Radiometría, Geobotánica y Geobiología, entre otros.

Activos, son aquellos que estudian el comportamiento de los materiales del subsuelo mediante la creación de señales artificiales y viendo cómo estas señales interactúan con dichos materiales. Ejemplos de estos podrían ser: Polarización inducida, Métodos sísmicos (sísmica de refracción, sísmica de reflexión), métodos eléctricos (SEV, tomografía, métodos geoeléctricos), métodos electromagnéticos, georadar, entre otros.

No todos los métodos geofísicos sirven para medir y caracterizar cualquier cosa. Cada método geofísico tiene una serie de características especiales que lo hace distinto de los demás. No se ahondará mucho en este aspecto, pues no es objetivo de esta investigación; sin embargo a modo de mostrar de manera general las posibilidades se presenta la siguiente tabla con puntos de vista particulares de las diferentes metodologías planteadas por Manresa, conforme su experiencia.

Tabla 2.1. Métodos geofísicos, propiedades y aplicaciones.

Método Geofísico	Propiedad Física Dependiente	Aplicaciones						
		Exploración de hidrocarburos	Estudios geológicos regionales (>100Km ²)	Desarrollo y exploración de depósitos minerales	Geotecnia ingeniería	Hidrogeología	Detección de cavidades y objetos enterrados	Lixiviados y penachos de contaminación
Gravimetría	Densidad	█	█	█	█	█	█	█
Magnetometría	Susceptibilidad magnética	█	█	█	█	█	█	█
Sísmica de refracción	Modelo elástico, densidad	█	█	█	█	█	█	█
Sísmica de reflexión	Modelo elástico, densidad	█	█	█	█	█	█	█
Eléctricos (SEV, Tomografías geoeléctricas)	Resistividad eléctrica	█	█	█	█	█	█	█
Potencial espontáneo	Diferencias de potencial	█	█	█	█	█	█	█
Polarización inducida	Resistividad y capacidad eléctrica	█	█	█	█	█	█	█
Electromagnetismo	Conductividad	█	█	█	█	█	█	█
EM-VLF	Conductividad	█	█	█	█	█	█	█
EM Georadar	Permitividad y conductividad	█	█	█	█	█	█	█
Magneto-telúrico	Resistividad eléctrica	█	█	█	█	█	█	█

-  Método más adecuado
-  Método secundario y complementario
-  Inservible
-  Método que puede ser utilizado aunque no es muy recomendado

2.3. Un Poco de Historia del GPR

El primer monitoreo con radar de penetración de subsuelo o georadar, fue realizado en Austria por el investigador Stern en 1929, teniendo como propósito de este ensayo la determinación de la profundidad de un glaciar. La tecnología fue olvidada (a pesar de las más de 36 patentes presentadas entre 1936 y 1971) hasta después de 1950, cuando los radares de la Fuerza Aérea de E.E.U.U. veían cómo al intentar desembarcar aviones en

Groenlandia, uno de los mismos no pudo detectar una formación de hielo, estrellándose contra el suelo. Este incidente marca el inicio de las investigaciones sobre la capacidad del radar para ver el interior de las subsuperficies, no solo en el hielo, sino también para realizar cartografías del subsuelo y nivel freático. En 1967, un sistema muy similar al original de Stern para sondear el glaciar fue propuesto y eventualmente construido y puesto en marcha como experimento para evaluar las propiedades eléctricas de la superficie de la luna en el Apollo 17. Antes de 1970, si quería inspeccionarse el suelo tenía que ser construido el sistema por los interesados, pero en 1972, Rex Monrey y Art Drake iniciaron la venta de un sistema comercial de GPR. A partir de este momento comienza la explosión de aplicaciones, publicaciones e investigaciones, en gran parte por los contratos del Geological Survey de Canadá, la U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL), entre otros (Olhoef, 2006).

2.4. Generalidades del Georadar

La prospección geofísica con georadar es una tecnología capaz de solucionar en gran medida la problemática inherente al estudio del subsuelo, de forma eficaz, precisa y sin necesidad de recurrir a métodos invasivos de los medios estudiados. Este método permite frecuentemente detectar y ubicar estratos y objetos enterrados con alta precisión, obteniéndose mapas detallados del subsuelo. Las prospecciones de GPR (Ground Penetrating Radar) normalmente requieren de tiempos de inspección relativamente cortos, pudiendo ser realizadas con costos razonables y bajo condiciones no destructivas. Este método de prospección geofísica, basado en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas, es extremadamente versátil y rápido para investigaciones a profundidad limitada, cuya principal característica es permitir delinear las interfaces entre los diferentes materiales que constituyen el subsuelo, *siempre que exista suficiente contraste entre las propiedades dieléctricas de las estructuras involucradas*.

Sus aplicaciones son numerosas: caracterización de elementos constructivos (cimentaciones, hormigones, asfaltos, etcétera), prospección mineral, cartografía, estratigrafía, arqueología, paleontología, tectónica y sismología, contaminación ambiental, caracterización de perfiles edáficos, búsqueda de víctimas en aludes, detección de objetos enterrados, entre muchas otras. Esta versatilidad del GPR se basa en que ofrece un registro de alta resolución, es un método rápido y la utilización de intervalos de disparo pequeños permite considerarlo como un método casi continuo (Pueyo, O.; Zamora, S.A.; *et al*; 2005).

El georadar puede proporcionar información sobre la localización exacta (posición y profundidad) del objeto detectado. Esta técnica, presenta como ventaja, además, su mayor poder de resolución y la posibilidad de detectar objetos no magnéticos (Busquet, E.; Casas, A.; *et al*; 1996). La respuesta del medio a las señales emitidas, captada en tiempos determinados, se denomina traza, la cual contiene las características electromagnéticas del medio atravesado. La sucesiva acumulación de estas trazas genera lo que se ha denominado radargrama, la cual para ser visualizada, se suele presentar en escalas de colores, generando las imágenes. Este último aspecto es de particular interés en este documento, debido a que el análisis del mismo se realiza tomando esta clasificación como punto de partida. En la Figura 2.1, se presenta de manera esquemática los principios de funcionamiento del georadar y la obtención de imágenes resultado de la prospección por este método.

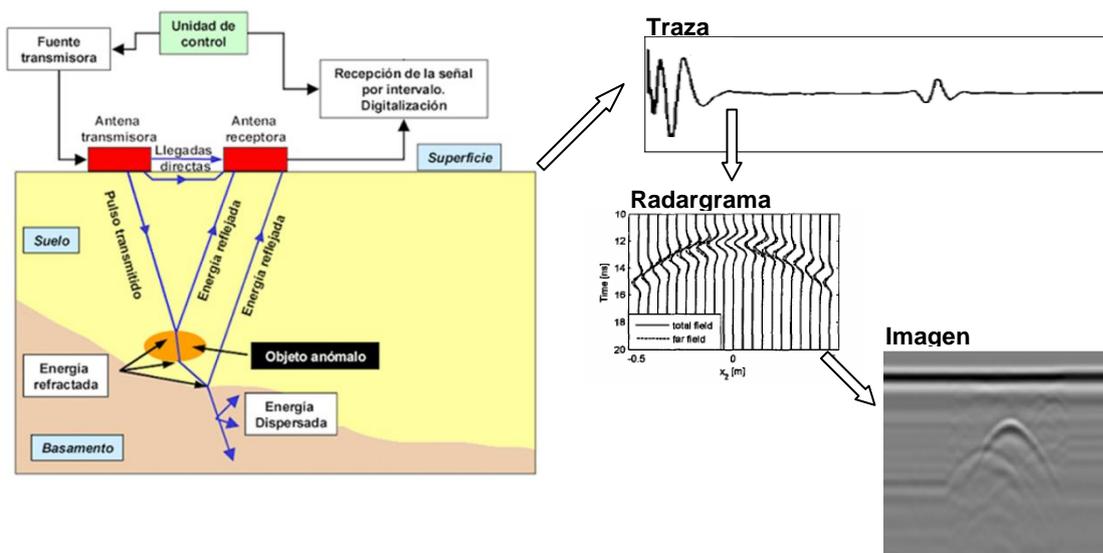


Figura 2.1. Obtención de imágenes a través de prospección por GPR.

Como se puede observar en la Figura 2.1, la antena emisora envía una señal al suelo, la cual puede sufrir reflexión, refracción o difracción. Cuando la onda radiada encuentra heterogeneidades en las propiedades eléctricas de los materiales del terreno, parte de la energía se refleja hacia la superficie y otra parte se transmite, alcanzando mayor profundidad. La señal reflejada es amplificada, transformada al espectro de *audio-frecuencia* y registrada directamente en un equipo informático, donde puede ser visualizada casi en tiempo real durante las labores de prospección. Este tipo de equipos permiten cierto procesamiento preliminar de los datos durante la prospección, permitiendo de esta forma obtener resultados directamente en campo, aunque sea necesario un posterior posprocesamiento. Estas heterogeneidades van asociadas a interfaces tipo estrato/estrato, suelo/roca, zona saturada/no saturada, contenidos en agua, arcillas, discontinuidades, fracturas, cavidades, intrusiones, penachos contaminantes y objetos enterrados, como bidones y tuberías, entre otros (Pueyo, O.; Zamora, S.A.; *et al*; 2005).

Los datos que obtiene el equipo indican variaciones de las propiedades electromagnéticas de los materiales del subsuelo. Las características de las ondas recibidas dependerán tanto de variaciones de la permisividad eléctrica, conductividad y permeabilidad magnética del subsuelo, como de las características de la onda emitida y de los objetos que se encuentran a su paso. Estos datos se componen de la intensidad de la señal recibida y de los tiempos de envío y llegada de las ondas (normalmente tiempos dobles o TWT) (Pueyo, O.; Zamora, S.A.; *et al*; 2005) Los equipos de georradar radian impulsos cortos de energía electromagnética (entre 10 MHz y 2 GHz) al subsuelo, mediante una antena transmisora y miden el tiempo doble de ida y vuelta de las ondas reflejadas en los límites entre materiales con diferente permitividad dieléctrica.

Habitualmente, cuando las estructuras buscadas presentan una constante dieléctrica relativa importante, puede someterse los perfiles a filtrado intenso de las señales (background removal, dc stacking, tracking) de forma que se obtienen las típicas anomalías en forma de hipérbola (hipérbolas de reflexión). Sin embargo, en casos en que existen anomalías de desarrollo vertical (anomalías causadas por reflexiones múltiples) la constante eléctrica relativa es mucho mayor y no pueden discriminarse directamente unas anomalías de otras. Con la aplicación de un filtrado intenso puede perderse información sobre los elementos reflectores planos, que pasarían desapercibidos con este tipo de filtrado, y se pierde capacidad de discriminación entre anomalías hiperbólicas y de desarrollo vertical. La

aplicación de filtros a los perfiles, puede hacer perder información y disminuir la capacidad de discriminación cuando existen elementos con contrastes altos de la permisividad relativa.

Las anomalías causadas por elementos metálicos (reflexiones múltiples) son fácilmente identificables en el estudio de los perfiles con un filtrado somero, mientras que la capacidad de discriminación disminuye con la intensidad del filtrado (Pueyo, O.; Zamora, S.A.; *et al*; 2005).

Entre los equipos de georadar más utilizados en Hidráulica Urbana, las antenas emisora y receptora se encuentran en la misma unidad o caja, habitualmente apantalladas; incluso ambas funciones de emisión y recepción pueden ser realizadas por una única antena. Esta configuración de emisor y receptor y la metodología asociada son referidas como *monoestáticas*. Alternativamente, las antenas emisora y receptora pueden ubicarse en cajas distintas, en un montaje denominado *biestático* (Bonomo & De la Vega).

La aplicación del método de georadar en sus versiones monoestática o biestática, con cobertura simple (single fold), en general, permite obtener planos verticales e incluso planos 3D del subsuelo con alta resolución de los reflectores enterrados. Alternativamente, se pueden utilizar otras metodologías. En el caso de cobertura múltiple (multiple folding), se utiliza una antena emisora y otra receptora dispuestas en montaje biestático. Estas usualmente son ubicadas en forma simétrica a ambos lados de un punto fijo central, la distancia entre ambas antenas se denomina *offset*. En algunos casos es apropiado utilizar mediciones de tipo *borehole*. En este caso el receptor, el emisor o ambos se desplazan verticalmente dentro de perforaciones en el suelo, generando así imágenes por transmisión (Bonomo & De la Vega).

El éxito de la técnica depende de las características naturales del terreno, de las características de las estructuras analizadas, del equipo utilizado y de la correcta interpretación de los datos. En conjunto, con una correlación causa-efecto, tal interpretación puede reforzarse con la generación de radargramas sintéticos de forma análoga a los sismogramas sintéticos de uso común en sismica de reflexión (Busquet, E.; Casas, A.; *et al*; 1996), o con la aplicación de valoraciones cualitativas, grados de identificación de estructuras, permitiendo optimizar la presentación de resultados en las guías de excavación y una ponderación sobre su fiabilidad (Pueyo, O.; Zamora, S.A.; *et al*; 2005) , favoreciendo la visualización de los resultados obtenidos.

2.5. Fundamentos Teóricos del GPR

2.5.1. Ecuaciones de Maxwell.

Las ecuaciones de Maxwell son la base teórica en la que se sustenta el fenómeno, en conjunto con las denominadas ecuaciones constitutivas, que relacionan la intensidad del campo eléctrico y magnético con el desplazamiento eléctrico y la inducción magnética, respectivamente, permitiendo correlacionar las interacciones entre las ondas electromagnéticas y los medios en los cuales se propagan. A continuación se presentan las ecuaciones de Maxwell.

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_f$$

(Ecuación 2.1)

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

(Ecuación 2.2)

$$\nabla \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{M}$$

(Ecuación 2.3)

$$\nabla \vec{H} = -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}$$

(Ecuación 2.4)

Donde E y H representan respectivamente el campo eléctrico y magnético; D y B el vector desplazamiento eléctrico y vector inducción magnética; ρ la densidad de carga libre y J la densidad de corriente. Este sistema de ecuaciones en conjunto con las ecuaciones de continuidad, las cuales se presentan a continuación, permite el entendimiento de las interacciones entre las ondas electromagnéticas y los medios en los cuales se propagan.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

(Ecuación 2.5)

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu}$$

(Ecuación 2.6)

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

(Ecuación 2.7)

Este sistema de ecuaciones contiene los tres parámetros que caracterizan un medio electromagnéticamente: ϵ , σ , μ . La conductividad σ representa la medida de la capacidad de un material de conducir corriente eléctrica. La permitividad dieléctrica ϵ brinda la medida de la capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico. Finalmente la medida de la capacidad de un medio para atraer los campos magnéticos viene descrita por la permeabilidad magnética μ .

2.5.2. Ecuación del GPR.

La ecuación del georadar para equipos monoestáticos (antena en función emisor-receptor), presentada en la literatura está determinada por la relación (Q) entre la potencia recibida, P_R , y la potencia emitida, P_E . La Ecuación 2.8, representa esta relación.

$$Q = \frac{P_R}{P_E} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G^2 \cdot \frac{S}{(4\pi r^2)^2} \cdot e^{-4\alpha r}$$

(Ecuación 2.8)

donde

- λ : Longitud de onda en aire.
- G : Ganancia de la antena.
- S : Superficie efectiva del reflector.
- α : Constante de atenuación.
- r : Distancia al reflector.

De la Ecuación 2.8, se puede obtener la relación entre amplitudes de onda (Q_{Amp}) recibida, A_R , y emitida, A_E , de la siguiente manera (Göttsche, 1997):

$$Q_{Amp} = \frac{A_R}{A_E} \propto \sqrt{\frac{1}{r^4} \cdot e^{-4\alpha r}} = \frac{e^{-2\alpha r}}{r^2}$$

(Ecuación 2.9)

2.6. Parámetros Electromagnéticos

Los parámetros electromagnéticos (conductividad, permitividad dieléctrica y permeabilidad), son los que definen un medio al paso de una onda electromagnética.

2.6.1. Conductividad

La conductividad de un medio proporciona la medida de la respuesta de las cargas libres en él, en presencia de un campo eléctrico externo, siendo el factor de proporcionalidad entre el campo libre aplicado y la densidad de volumen de corriente debido al movimiento de estas cargas libres. Es decir, proporciona la medida de la capacidad de un material de conducir corriente eléctrica y es descrita según la ley de Ohm, cuya formulación fue presentada en la Ecuación 2.7.

Las unidades de medida de la conductividad, en el S.I., son omhs/metro o el equivalente de Siemens/metro. La conductividad de un medio es la inversa de su resistividad. En general se puede distinguir entre materiales conductores, semiconductores y aislantes.

2.6.2. Permitividad Eléctrica

La permitividad es una constante que da medida de la capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico. Proporciona un valor de la respuesta estática del material cuando está en presencia de un campo eléctrico externo. La constante dieléctrica del vacío es 1. Para la mayoría de los materiales se pueden encontrar en el subsuelo al realizar prospección electromagnética, los valores de permitividad relativa se encontrarán entre 1 (aire) y 81, siendo esta última la constante dieléctrica del agua a 20° de temperatura (Vega, 2002).

2.6.3. Velocidad de Propagación y Longitud de Onda

2.6.3.1. Velocidad de Propagación de Onda

Las ondas electromagnéticas viajan en un medio a una velocidad que depende de la constante dieléctrica relativa del subsuelo, de la velocidad de la luz en el vacío, y de la permeabilidad magnética relativa. La velocidad de la onda electromagnética (V_m) en un cierto material viene dada por:

$$V_m = \frac{c}{\sqrt{(\epsilon_r \mu_r / 2)((1 + P^2) + 1)}}$$

(Ecuación 2.10)

donde P es el factor de pérdida, de manera que $P = \sigma / \omega \epsilon$ y σ es la conductividad, $\omega = 2\pi f$ (f es la frecuencia), y ϵ la constante dieléctrica absoluta. En un material con un bajo factor de pérdida tenemos $P \rightarrow 0$; entonces la velocidad de la onda electromagnética es dada por:

$$V_m = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{0.3}{\sqrt{\epsilon_r}} m/ns$$

(Ecuación 2.11)

La profundidad de penetración (D) puede ser determinada por la Ecuación 2.12, a partir de la velocidad en el medio V_m . Finalmente, el tiempo doble de propagación puede ser determinado mediante representación gráfica de las señales del GPR. Con estas premisas la profundidad resulta ser (Tavera, M.; Pérez R. *et al.*; 2006):

$$D = \frac{T \cdot V_m}{2}$$

(Ecuación 2.12)

2.6.3.2. Longitud de Onda en un Medio Diferente del Vacío

La longitud de onda en un medio dado, λ_m , dependerá de la velocidad de fase (e indirectamente de la constante dieléctrica efectiva del mismo) y de la frecuencia de onda emitida; su expresión es:

$$\lambda_m = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega} v = \frac{2\pi}{\omega} \frac{c}{Re\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} = \frac{\lambda_0}{Re\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

(Ecuación 2.13)

donde λ_0 es la longitud de onda en el vacío.

En medios no magnéticos ($\mu_r = 1$), la expresión se simplifica, quedando:

$$\lambda_m = \frac{\lambda}{Re\sqrt{\epsilon_r}}$$

(Ecuación 2.14)

La longitud de onda determina la resolución vertical del georadar y dependerá de la frecuencia de emisión de la antena y de la constante dieléctrica efectiva del material.

2.6.4. Factor de Atenuación

Se llama factor de atenuación al parámetro que caracteriza el grado de disminución de la amplitud de onda, conforme aumenta la distancia al punto de emisión (antena), siendo sus unidades m^{-1} y su expresión matemática la siguiente:

$$\alpha = \frac{\omega}{c} Im\sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

(Ecuación 2.15)

Este parámetro permite obtener el grado de decaimiento de la amplitud de onda conforme esta se propaga por el medio material.

2.6.5. Reflexión y Refracción

El funcionamiento del GPR está basado en la detección de las reflexiones y las detecciones de las dispersiones de las señales emitidas. Cuando la energía emitida alcanza una discontinuidad en los parámetros electromagnéticos del medio, se producen los fenómenos

de reflexión y de refracción. Lo cual está relacionado con el cambio en la dirección de viaje de la señal (es decir, el frente de onda se refracta), de conformidad con la ley de Snell (Jol, 2008). La Figura 2.2, presenta de manera esquemática los fenómenos de Reflexión y Refracción de la energía mencionados.

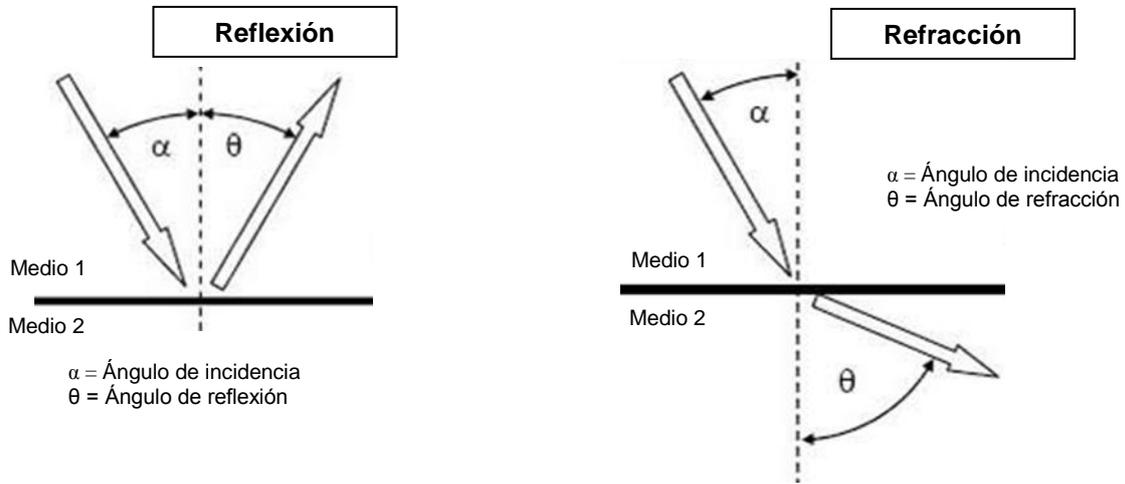


Figura 2.2. Reflexión y Refracción de la Energía Incidente en un Contacto Horizontal.

Una onda es “reflejada” cuando se encuentra con un cambio en el material y varían las propiedades del mismo. El ángulo de reflexión es el mismo que el ángulo de incidencia, por lo general, tomando como referencia la perpendicular a la superficie, o la línea normal. Por otro lado, el cambio de dirección de la señal se da cuando se pasa de un medio a otro con diferente velocidad (diferente índice de refracción), con un ángulo de incidencia diferente a cero grados con respecto a la normal de la interface.

La impedancia de un campo electromagnético es el cociente entre el campo eléctrico y el campo magnético, pudiendo definir una impedancia para el campo electromagnético incidente, η_1 , que coincidirá con la del campo magnético reflejado, y otra para el campo electromagnético refractado, η_2 , es decir, transmitido:

$$\eta_1 = \left\{ \frac{\vec{E}_i}{\vec{H}_i} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \right\} = \left\{ \frac{\vec{E}_r}{\vec{H}_r} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \right\} \quad \text{(Ecuación 2.16)}$$

$$\eta_2 = \left\{ \frac{\vec{E}_t}{\vec{H}_t} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_{r2}}{\epsilon_0 \epsilon_{r2}}} \right\} \quad \text{(Ecuación 2.17)}$$

A partir de las expresiones de las impedancias se puede calcular los coeficientes de transmisión y de reflexión de Fresnel de la energía, como el cociente entre el campo incidente y el campo refractado en el primer caso, y el cociente entre el campo incidente y el campo reflejado en el segundo caso. Si ai es el ángulo de incidencia de la onda sobre la superficie plana, y at es el ángulo de refracción, estos coeficientes adoptan la siguiente expresión:

$$R_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{E}_r}{\vec{E}_i} = \frac{\eta_2 \cos(at) - \eta_1 \cos(ai)}{\eta_1 \cos(ai) + \eta_2 \cos(at)} \quad \text{(Ecuación 2.18)}$$

$$T_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{E}_t}{\vec{E}_i} = \frac{2\eta_2 \cos(at)}{\eta_1 \cos(ai) + \eta_2 \cos(at)} \quad \text{(Ecuación 2.19)}$$

donde $T_{1 \rightarrow 2}$ es el coeficiente de Fresnel de refracción entre los medios superior (1) e inferior (2), $R_{1 \rightarrow 2}$ es el coeficiente de Fresnel de reflexión en el contacto entre los dos medios, E_i es el campo incidente, E_r el campo reflejado y E_t el campo refractado o transmitido.

En los estudios que se realizan con georadar, puede simplificarse estas expresiones ya que el sistema opera con reflexión de un ángulo muy pequeño, pudiendo ser considerados los ángulos de incidencia y de reflexión (en el caso de que la superficie reflectora sea plana) como de cero grados, es decir, que se trabaja con incidencia normal. En estas condiciones, los coeficientes de reflexión y de transmisión únicamente dependen de la relación entre impedancias complejas. Si, además, se trabaja en medios no magnéticos, una aproximación adecuada para la mayoría de los materiales en los cuales se aplican estos estudios con georadar, la expresión de los coeficientes queda como:

$$R = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}$$

(Ecuación 2.20)

$$T = \frac{2\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}$$

(Ecuación 2.21)

Se puede observar que la suma del coeficiente de reflexión (que representa el porcentaje de energía reflejada de la energía incidente) y del coeficiente de refracción (que representa el porcentaje de energía transmitida al segundo medio, de la energía incidente), es la unidad. De las expresiones anteriores, se puede deducir que cuanto mayor sea la diferencia entre los parámetros electromagnéticos de los medios, mayor será el coeficiente de reflexión, es decir, que a mayor contraste entre los dos medios en contacto, mayor porcentaje de la energía incidente será reflejada en la discontinuidad y, por lo tanto, tendremos un menor porcentaje de energía transmitida al medio inferior. Valores de R elevados implican en un estudio con georadar, por una parte, la posibilidad de observar en los registros con más facilidad la onda reflejada, mientras que por otro lado la penetración del método disminuye y las reflexiones producidas en contrastes posteriores son de menor amplitud, ya que el porcentaje de energía refractada es menor, lo que contribuye a que la amplitud de la onda en posteriores reflexiones sea menor (Tavera, 2008).

2.7. Procesamiento de Información de GPR.

Los registros obtenidos con las prospecciones realizadas con georadar pueden ser interpretados, en algunas ocasiones, de manera directa. Sin embargo, dada la inmensa variabilidad de los medios y sus constituyentes (objetos enterrados tales como tuberías, entre otros), en la mayoría de ocasiones, se hace necesario tratar los datos, con el objetivo de mejorar la relación señal/ruido o para resaltar algún evento. Se debe mencionar que los mismos deben ser empleados con especial cuidado, ya que aunque puedan contribuir a mejorar el registro, una incorrecta o excesiva aplicación, puede conllevar a la pérdida de información importante o llevar a interpretación y conclusiones incorrectas. A continuación, se presentan algunos de los más relevantes procedimientos aplicados para este fin.

2.7.1. Filtros

El término filtrado, hace referencia a una variedad amplia de técnicas cuyo objetivo es modificar selectivamente la amplitud o la frecuencia de las señales recibidas. Este tipo de procedimiento podría clasificarse en dos grupos: filtros horizontales y verticales.

2.7.1.1. Filtros Horizontales (espaciales)

Consiste en un tratamiento que se aplica horizontalmente en el registro, en dirección espacial. El objetivo perseguido con la aplicación de estos filtros es la eliminación del ruido de fondo de un radargrama. Este ruido que puede ser de alta frecuencia (se registra en pocas trazas seguidas), generado al deslizar la antena por un terreno irregular.

Esta metodología es una de las más aplicadas en el tratamiento de datos en registros de georadar. El hablar de contenidos frecuenciales, para este tipo de de procesado, está referido a la longitud horizontal de las anomalías. Una anomalía de gran longitud de onda (y por ello de baja frecuencia) quedará registrada en un elevado número de trazas, mientras que una anomalía de pequeña longitud de onda (alta frecuencia) lo será en pocas trazas. Este tipo de tratamiento puede realizarse con dos tipos de filtros: los denominados filtros de respuesta finita (FIR) y los denominados filtros de respuesta infinita (IIR).

2.7.1.2. Filtros Verticales (temporales)

Son tratamientos que se aplican en la dirección vertical o temporal de los registros, sobre cada una de las trazas. Pueden utilizarse para realizar correcciones de línea base o para eliminar parte del ruido electrónico inherente a cada traza. Consisten en multiplicar cada señal por un operador que vale la unidad en la banda de frecuencias que interesa conservar, y que tiende a cero en la banda de frecuencias que no interesa. Cuando se aplica estos filtros es conveniente realizar estudios de las frecuencias antes de la aplicación y después de la misma, para comprobar que se ha realizado correctamente y para evitar perder información que podría ser relevante en el estudio realizado. Pueden ser también de pasa altas o pasa bajas; los filtros de paso alto, impiden que se registren bajas frecuencias, normalmente aquellas que se encuentran por debajo de 10 MHz, las cuales son consideradas como ruidos del sistema. Por lo tanto, tienen como objetivo eliminar el ruido de baja frecuencia, que depende en gran parte de la antena que se utiliza, del cableado y de su longitud. Por otra parte de manera opuesta los filtros pasa bajas, se utilizan para eliminar frecuencias más elevadas que las esperadas. Con la aplicación de estos dos filtros queda demarcado el rango de frecuencia del estudio.

2.7.2. Deconvolución Predictiva

Se trata de un procedimiento que tiene como objetivo la mejora de la resolución vertical en los radargramas. Es una técnica que se ha aplicado a la prospección con georadar y que es proveniente de los estudios de sísmica. Se aplica porque se considera que el medio por el que se produce la propagación de la señal actúa de filtro sobre la misma, de manera que la traza grabada en el radargrama es en realidad una convolución del pulso inicial emitido. El objetivo que persigue es deconvolucionar la onda para eliminar los efectos del medio sobre el pulso inicial. De esta manera, se persigue transformar el radargrama de campo en un registro donde las señales representan únicamente la reflexión primaria.

2.7.3. Migración

Este procedimiento se realiza para trasladar a su posición real los efectos de la inclinación de las reflexiones registradas y colapsar las difracciones que producen. Para utilizar este tratamiento se necesita estimar la velocidad promedio de propagación por el medio, pero puede conocerse a partir de las hipérbolas generadas en las difracciones. Consiste básicamente en el cálculo de la ecuación de cada una de las hipérbolas, desplazando el

reflector al vértice de la hipérbola. Como la ecuación de la hipérbola depende de la velocidad de propagación del medio, un error en la determinación de este parámetro puede ocasionar que no llegue a colapsar totalmente dicha hipérbola (velocidad estimada inferior a la real) o bien que se produzca el efecto conocido como sobremigrado (la velocidad estimada es superior a la real).

2.7.4. Transformada Rápida de Fourier (TDF)

Este tratamiento de datos, conocido ampliamente, consiste en la realización de un análisis frecuencial de los registros, lo que permite el estudio de la evolución de los parámetros de la señal en función de la frecuencia. A menudo se utiliza para obtener los espectros de frecuencia de las trazas, con el fin de seleccionar mejor los filtros frecuenciales que se pueden aplicar, o para comprobar los efectos que sobre las frecuencias ha tenido la aplicación de alguno de los mencionados filtros.

2.7.5. Transformada Hilbert

Este procedimiento matemático expresa la relación entre la parte real y la parte imaginaria de las señales, con el que pueden obtenerse envolventes de las amplitudes en los registros, la fase y la frecuencia instantáneas. Estas últimas pueden utilizarse como indicadores del tipo de filtrado que sufre la señal durante su propagación por el medio, proporcionando información del comportamiento del medio frente a la señal electromagnética aplicada. La obtención de la envolvente de una traza proporciona información acerca de la amplitud instantánea de la señal y, por tanto, acerca de la energía implicada en cada evento.

2.7.6. Procedimientos de Corrección de Señales

2.7.6.1. Remoción de Fondo

En los radargramas de datos en bruto suelen aparecer bandas horizontales de alta intensidad que ocultan parcial o totalmente las señales de interés, por lo que ellas deben ser eliminadas. Estas señales de fondo pueden deberse, por ejemplo, a la recepción directa de las señales provenientes del emisor, lo cual ocurre especialmente cuando la unidad de GPR utiliza antenas no apantalladas, a la reflexión de las señales emitidas en la interfase entre el aire y el suelo, a las reflexiones producidas en objetos extraños al subsuelo, tales como el operador, a reverberaciones de origen diverso, etcétera.

Una técnica sencilla para eliminar estas bandas horizontales consiste en obtener una traza promedio, calculada a partir de todas las trazas que componen el radargrama, la cual luego es restada a cada una de ellas. Como alternativa para calcular la traza promedio a veces se considera sólo una selección de trazas. Es importante notar que la eliminación del fondo a partir de la resta de una traza promedio tiende a eliminar no sólo las señales horizontales indeseadas sino también las reflexiones que pudieran producirse en estratos horizontales o casi-horizontales, lo que podría constituir una pérdida de información relevante. Es en parte por ello que el método a veces sólo se aplica en un área o ventana del radargrama.

2.7.6.2. Correcciones Estáticas

Este tratamiento tiene como objetivo corregir los efectos que se producen sobre un registro como consecuencia de la topografía de la superficie o debido a variaciones bruscas de la velocidad en el medio.

2.7.6.3. Ganancia

Se trata de la amplificación que se introduce a la señal. Esta amplificación no tiene que ser constante durante toda la longitud de la traza, pudiendo variar con el tiempo de propagación. Tiene por objeto amplificar eventos asociados con reflexiones profundas o poco energéticas, aumentando las amplitudes que, por su pequeño tamaño, no serían tenidas en cuenta durante la interpretación de los registros. Se utiliza para corregir los efectos de la disminución de energía producidos durante la propagación de la señal por el medio. La ganancia de un equipo de GPR es definida por la siguiente expresión:

$$G = eD = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{eff}$$

(Ecuación 2.22)

donde

D : directividad

A_{eff} : abertura efectiva de la antena.

2.7.6.4. Superposición de Trazas

Tiene por objetivo la mejora en la relación señal–ruido de los registros. En el caso de antenas monoestáticas, el procedimiento consiste en la suma aritmética de trazas consecutivas. El resultado enfatiza los eventos coherentes y disminuye la amplitud del ruido, mejorando la relación señal–ruido. Se debe tener en cuenta que este procedimiento empeora la resolución horizontal del estudio.

Capítulo 3

Posprocesamiento de Imágenes de Georadar – Principios del Procedimiento Metodológico Experimental Planteado.

3.1. Introducción

Las imágenes de GPR son el resultado de la prospección del suelo; las características de estas imágenes son el resultado de la influencia de múltiples factores, que se podrían clasificar como en la Figura 3.1. Cada uno de estos factores altera de manera sustancial las respuestas de la señal a su paso a través de los diferentes materiales. Tales factores ya han sido tocados de manera muy directa por otros investigadores y, aunque han sido tenidos en cuenta en este documento, no serán la base principal del mismo. En esta investigación se hará principal énfasis en el posprocesamiento de los datos obtenidos en las trazas y su posterior transformación en imágenes.

Los datos que se obtienen de las prospecciones realizadas presentan características electromagnéticas, las cuales son la respuesta electromagnética que presenta el material analizado a las señales emitidas por el equipo, conforme las propiedades del mismo.

Entre estas características se tiene la amplitud de onda y la frecuencia. Para el procedimiento planteado en este capítulo, se toma la amplitud de onda, con el objetivo de generar herramientas para la parametrización de las características, con las que generar bases para un entrenamiento de sistemas inteligentes de componentes de sistemas de abastecimiento (Figura 3.2).



Figura 3.1. Factores de influencia en prospecciones por GPR.



Figura 3.2. Parametrización de características.

3.2. Principios del Procedimiento Planteado

Las señales captadas en el georadar dan como resultado una matriz (radargrama) de vectores (trazas) que representan la variación de las propiedades electromagnéticas del suelo para cada vector X_j en función de la profundidad. A esta matriz la denominaremos matriz A (matriz de datos en bruto). Esta matriz será sometida a diferentes extracciones y procedimientos basándose, en primera instancia, en los valores de amplitud de onda obtenidos. Se trata de determinar sus características principales y el punto hasta el cual es factible obtener información de las amplitudes de onda generadas para la clasificación de componentes de los sistemas de abastecimiento.

Las amplitudes de onda son el resultado o la respuesta directa del medio inspeccionado al impulso emitido por el GPR. La función resultante, debido a las diferentes propiedades del medio, entre otras causas, es cuasi-periódica. Aprovechando esta gran variabilidad de la amplitud de onda, dependiendo del medio en el cual se propague la señal y de su carácter cuasi-periódico, se realizaron los procedimientos que se describen a continuación.

La matriz A analizada para el desarrollo del procedimiento corresponde a una imagen tomada de la base de imágenes del CMMF y es el resultado de la prospección por medio de GPR sobre una tubería de PVC enterrada. La forma de las trazas acumuladas (radargrama), junto con los parámetros del equipo empleados para su toma, son presentados en la Figura 3.3.



Figura 3.3. Matriz A , parámetros de toma de datos y sus componentes vectoriales*.

*Matriz tomada de los ensayos experimentales realizados por Mario Tavera – Base de datos CMMF.

Usualmente, la primera clasificación o asociación que se realiza al obtener la imagen de GPR está asociada a las diferentes formas que se demarcan con las amplitudes de onda, tras visualizarse la misma en escalas de colores. Basándose en esta primera identificación, se lleva a cabo el siguiente desarrollo metodológico de la matriz A tomada. Se realiza una división por rangos de amplitudes de onda; se extrae información por partes de la onda; y se realiza una progresiva acumulación de las matrices generadas, como se muestra a continuación.

3.3. División en Rangos de Amplitudes de Onda

3.3.1. Procedimiento.

Partiendo de la clasificación por escalas de colores, basadas en los valores de amplitud de onda, mostramos el procedimiento tomando como ejemplo una de las trazas de los datos de la imagen de la matriz A presentados en la Figura 3.3. Esta matriz de tamaño $m \times n$ es el resultado de una sola prospección del suelo de manera continua y es, como ya se mencionó anteriormente, el resultado de múltiples vectores X_j ; la matriz A puede ser representada por columnas de la siguiente manera:

$$A = [X_1, X_2, \dots, X_{n-1}, X_n] \quad j = 1, \dots, n. \quad \text{(Ecuación 3.1)}$$

Dado el rango de amplitudes $[R_1, R_2]$, se considera el número

$$R = R_2 - R_1, \quad \text{(Ecuación 3.2)}$$

que se ha ajustado para que sea múltiplo de 20000. Se definen distintas particiones con norma h de valores 20000, 10000, 5000 y 1000, dadas por números

$$a_0, a_1, \dots, a_k,$$

con $K+1$ elementos equidistantes, siendo

$$K = R/h. \quad \text{(Ecuación 3.3)}$$

Se calculan las matrices $B^{(k)}$ cuyos elementos son:

$$b_{ij}^{(k)} = \begin{cases} x_{ij}, & a_{k-1} \leq x_{ij} < a_k \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad k = 1, \dots, K. \quad \text{(Ecuación 3.4)}$$

Si se toma como ejemplo un X_j cualquiera de la matriz A , esta traza sería subdividida, conforme a lo planteado en la ecuaciones anteriores, por rangos de amplitud con norma h (20000, 10000, 5000 y 1000). Tratando de representar el efecto dado por la clasificación de escalas de colores se obtendrían lo presentado en la Figura 3.4.

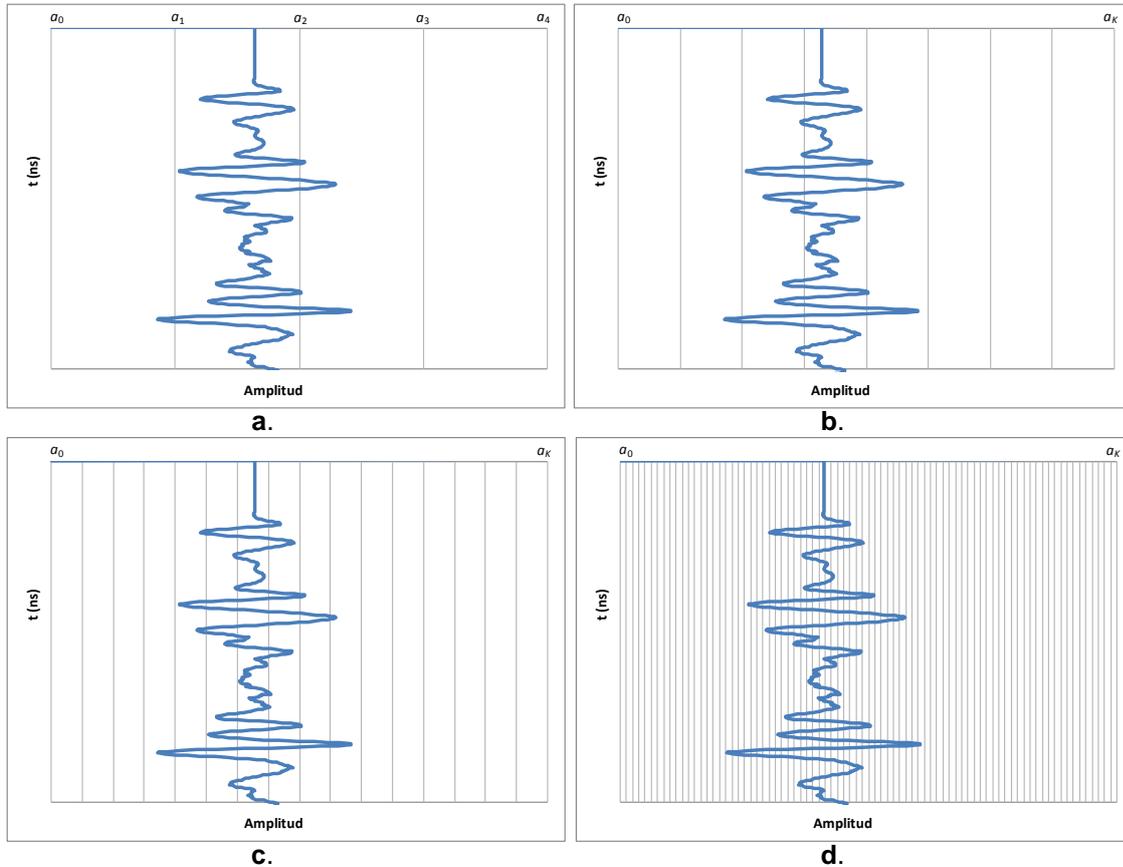


Figura 3.4. Clasificación de amplitudes de onda por rango de valores. a). $h=20000$. b). $h=10000$. c). $h=5000$. d). $h=1000$.

Cada una de estas imágenes presentadas, está conformada por la superposición de las matrices $B^{(k)}$ generadas. Tomando la matriz de menor discretización presentada en la Figura 3.4 (d), lo obtenido sería lo presentado en la Figura 3.5

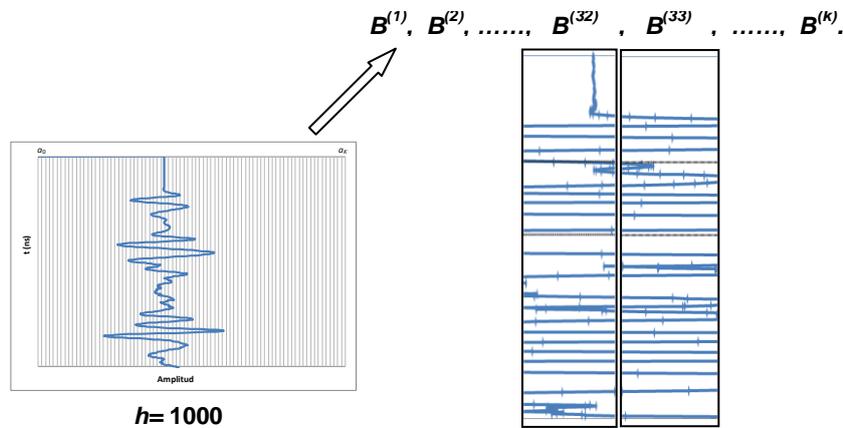


Figura 3.5. Matrices $B^{(k)}$; generación en una traza de la Matriz A , $h = 1000$.

Esta primera clasificación de los datos contenidos en la matriz de prospección, es la base del procedimiento planteado; se puede notar que una menor discretización permite obtener mayor manejo de los datos obtenidos; con grandes discretizaciones, la excesiva acumulación de datos en cada una de las matrices formada no permite desarrollar con solidez las formas de los objetos que han sido enterrados. Es por esta razón que para el procedimiento que se plantea a continuación se toma $h = 1000$, por ser la menor empleada en el estudio, sin decir que no se puede tomar una discretización menor.

3.3.2. Aplicación – Matriz A .

A continuación se presentan distintas disgregaciones de la matriz A conforme los procedimientos planteados en el apartado anterior, lo cual tiene como objetivo determinar las diferentes respuestas de la misma a tales procedimientos.

$h = 20000$.

La clasificación de amplitudes de onda para la matriz A , correspondiente a la norma $h=20000$, generó cuatro matrices B , las cuales se presentan a modo de imagen en la Figura 3.6.

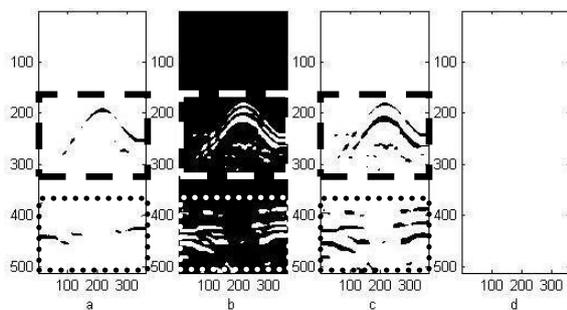


Figura 3.6. Clasificación de Matriz A en rangos de amplitud, $h=20000$. a). [0,20]. b). [20,40]. c). [40,60]. d). [60,80].*

* Los valores de los rangos se presentan en miles.

- ■ Sector 1.
- Sector 2.

La Figura 3.6, se podría clasificar por 2 sectores compuestos de anomalías, a los cuales denominamos, para este caso, sectores 1 y 2. Como se puede observar en la misma, para las partes (a) y (c) contienen únicamente datos en los sectores 1 y 2, entre tanto para (b), la mayoría de sus datos se encuentran por fuera de los límites de los sectores, representando valores de datos que pueden ser el contorno de subsuelo que rodea o contiene a la anomalía o anomalías que presentan sus valores en este rango de amplitud.

Estos sectores tienen como característica principal que se encuentran en valores máximos de amplitud de onda (crestas) y mínimos (valles), y que los mismos muestran una agrupación de datos inmersa en dos zonas limítrofes de la forma; se podría decir que la figura que se demarca en el sector 1 es de forma circular, cuyos componentes de la onda tienen un inicio en un máximo y su parte central está demarcada por un valor mínimo de amplitud. Con el objetivo de visualizar de mejor manera lo dicho, si sumamos elemento a elemento los datos del sector 1 de las matrices representadas en las partes (a) y (b) de la Figura 3.6 y presentando su resultado en forma gráfica, se obtiene la Figura 3.7 (a) y de igual manera con las partes (a), (b) y (c) de la Figura 3.6, se obtiene la Figura 3.7 (b).



Figura 3.7. Sector 1, agrupación de rangos. a). [0,20]+[40,60]. b). [0,20]+[20,40]+[40,60].*

* Los valores de los rangos se presentan en miles.

De la Figura 3.7, se puede observar una forma circular demarcada; la cual, tiene sus extremos delimitados por máximos (crestas), con valores de amplitudes de onda entre [40000,60000] y mínimos (valles) con valores de amplitud de onda entre [0,20000], los cuales demarcan su eje central. En la Figura 3.7 (b), se puede notar cómo algunos datos están contenidos entre los dos puntos de valores máximos diferentes a los mínimos, los cuales son los valores restantes que componen o reconstruyen la totalidad de la onda.

Agrupando el sector 2, de las Figura 3.6 (a) y (b), se obtiene la Figura 3.8.



Figura 3.8. Sector 2, agrupación de rangos. a). [0,20]+[40,60]. b). [0,20]+[20,40]+[40,60].*

* Los valores de los rangos se presentan en miles.

De la Figura 3.8, se puede observar que algunas perturbaciones presentan su eje central en valores máximos o mínimos de amplitud y sus límites se encuentran en la zona central. De estas figuras, también se puede observar cómo algunos grupos de datos contienen sus valores entre los rangos máximos o mínimos, sin presentarse ningún desarrollo hasta su

opuesto rango de amplitudes, lo cual puede indicar que la norma h empleada es grande para poder localizar su inicio, punto central y fin.

De estas gráficas podemos decir que los sectores 1 y 2 contienen datos de amplitud de onda comprendidos entre $[0,60000]$ y que la información restante se encuentra comprendida en valores entre $[20000,40000]$.

$h = 10000$.

La clasificación de amplitudes para la matriz A , correspondiente a los valores de $h = 10000$ generó seis matrices B que se presentan en la Figura 3.9. Se debe mencionar que los rangos superiores a 60000, no fueron analizados por no presentar componentes.

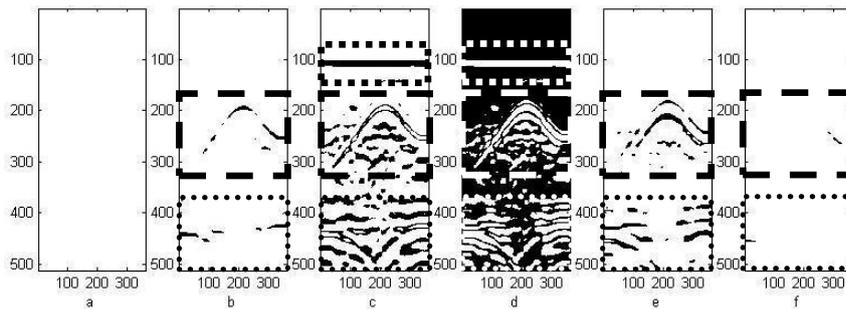


Figura 3.9. Clasificación de Matriz A en rango de amplitud de $h=10000$. a). $[0,10]$. b). $[10,20]$. c). $[20,30]$. d). $[30,40]$. e). $[40,50]$. f). $[50,60]$.*

* Los valores de los rangos se presentan en miles.

- — Sector 1.
- Sector 2.
- Sector 3.

Conservando los mismos sectores tomados en la clasificación con norma $h = 20000$, se puede observar en la Figura 3.9, para sus componentes (c) y (d), la aparición de otra nueva anomalía, a la cual se denominará sector 3. La aparición de este nuevo sector, nos indica que el tomar un h muy grande puede dejar de evidenciarse anomalías que presentan sus puntos extremos y su eje central con diferencias más pequeñas que el rango que los contiene. De igual manera se puede visualizar en su parte (a), correspondencia con la Figura 3.6 (a), lo cual delimitaría a los sectores 1 y 2 a contener datos desde el valor de amplitud de 10000 siendo este valor de amplitud el eje central de la figura conformada por los puntos para el sector 1.

Se puede notar que el sector 1 presenta datos hasta la Figura 3.9 (f); sin embargo, se puede notar también que los datos presentados en esta gráfica no presentan dos valores límites, lo cual podría representar que no forma parte de esta perturbación o no de manera directa como es el caso en las partes (b), (c), (d) y (e), lo cual se muestra de mejor manera en la Figura 3.10.

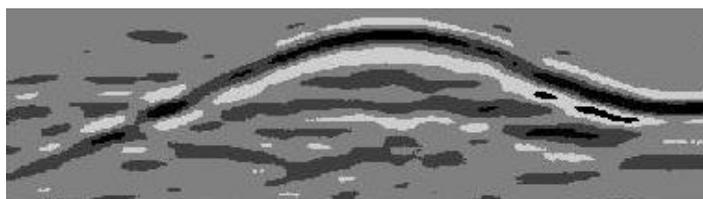


Figura 3.10. Sector 1, agrupación de rangos, $[10,20]+[20,30]+[30,40]+[40,50]$.*

* Los valores de los rangos se presentan en miles.

De lo visto en la Figura 3.10, se podría decir que el sector 1 contiene su eje central en el rango de valores de [10000,20000] y los límites de la figura con forma circular de [40000,50000]. Por lo cual, el rango del sector 1 estaría delimitado entre [10000, 60000] y la figura circular que contiene, en un rango entre [10000, 50000].

Para el sector 2, de igual manera, se puede decir que el rango en el cual se presenta la forma se encuentra con valores entre [10000, 60000], presentándose la mayoría de datos restantes en un rango entre [10000, 60000].

En el sector 3, se puede observar que los valores mínimos de sus datos se presentan en el rango 20000-30000 y que sus valores máximos podrían estar contenidos en los rangos 20000-30000 ó 30000-40000.

$h = 5000$.

La clasificación de amplitudes para la matriz A , correspondiente a los valores de $h = 5000$ generó diez matrices B que se presentan en la Figura 3.11. Se debe mencionar que rangos inferiores a 10000 y mayores a 60000, no fueron analizados por no presentar componentes.

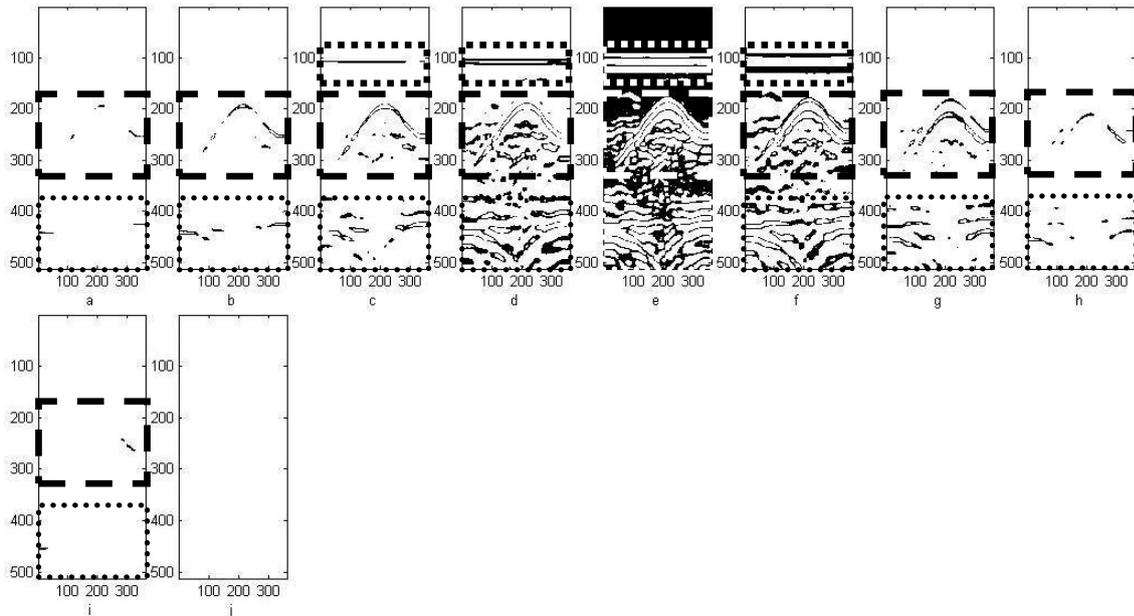


Figura 3.11. Clasificación de la Matriz A en rango de amplitud de $h = 5000$. a). [10,15]. b). [15,20]. c). [20,25]. d). [25,30]. e). [30,35]. f). [35,40]. g). [40,45]. h). [45,50]. i). [50,55]. j). [55,60].*

* Los valores de los rangos se presentan en miles.

- — Sector 1.
- Sector 2.
- Sector 3.

Para el análisis de la Figura 3.11, se han conservado los mismos sectores planteados en el análisis anterior. Se puede observar en esta figura en todas sus partes, cómo la discretización de datos en rangos de amplitud con norma h de menor valor favorece la visualización de crestas y valles de las ondas obtenidas, pudiéndose con esto intuir de mejor manera los rangos límites y central en los cuales se encuentran las figuras obtenidas en la prospección.

Para el sector 1, se puede observar que la figura de forma circular que contiene mantiene el mismo rango central establecido en valores de h anteriores y podemos ver cómo esta figura se va desarrollando hasta alcanzar una extensión máxima en la parte (g) de la figura. Para lo cual se podría decir que la forma contenida en el sector 1 presenta una extensión de amplitudes de onda entre [10000, 45000]. De igual manera, se puede observar cómo el sector 1 se ve demarcado en el rango de valores [10000, 55000].

En el sector 2 de esta gráfica se puede ver la insinuación y posterior desaparición de variadas reflexiones en los diferentes rangos. Esta zona queda demarcada en un rango entre [10000, 55000], con una mayor concentración de datos en el rango [15000, 50000].

Al unir los componentes de la Figura 3.11, en sus partes (c), (d), (e), (f), se puede obtener la Figura 3.12.



Figura 3.12. Sector 3, agrupación de rangos, [20,25]+[25,30]+[30,45]+[40,45].*

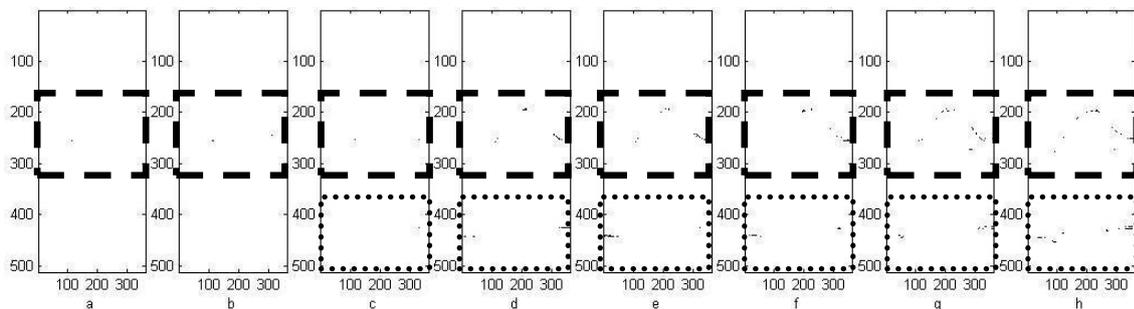
* Los valores de los rangos se presentan en miles.

En el sector 3 de la gráfica anterior se puede observar cómo se genera una forma de una línea la cual se va extendiendo desde un valor mínimo de amplitud en su eje central hasta unos valores límites con valores máximos de amplitud. Esta figura se encuentra demarcada en el rango de amplitud comprendido entre [20000, 40000].

Finalmente, podemos observar en las partes externas a los sectores que hemos demarcado que se ha ido quedando reducido a encontrarse en un rango entre [25000, 40000], con una mayor concentración de valores entre [30000, 35000].

$h = 1000$.

La clasificación de amplitudes para la matriz A , correspondiente a los valores de $h = 1000$ generó cuarenta y cinco matrices B que se presentan en la Figura 3.13. Se debe mencionar que rangos inferiores a 10000 y mayores de 55000, no fueron analizados por no presentar componentes.



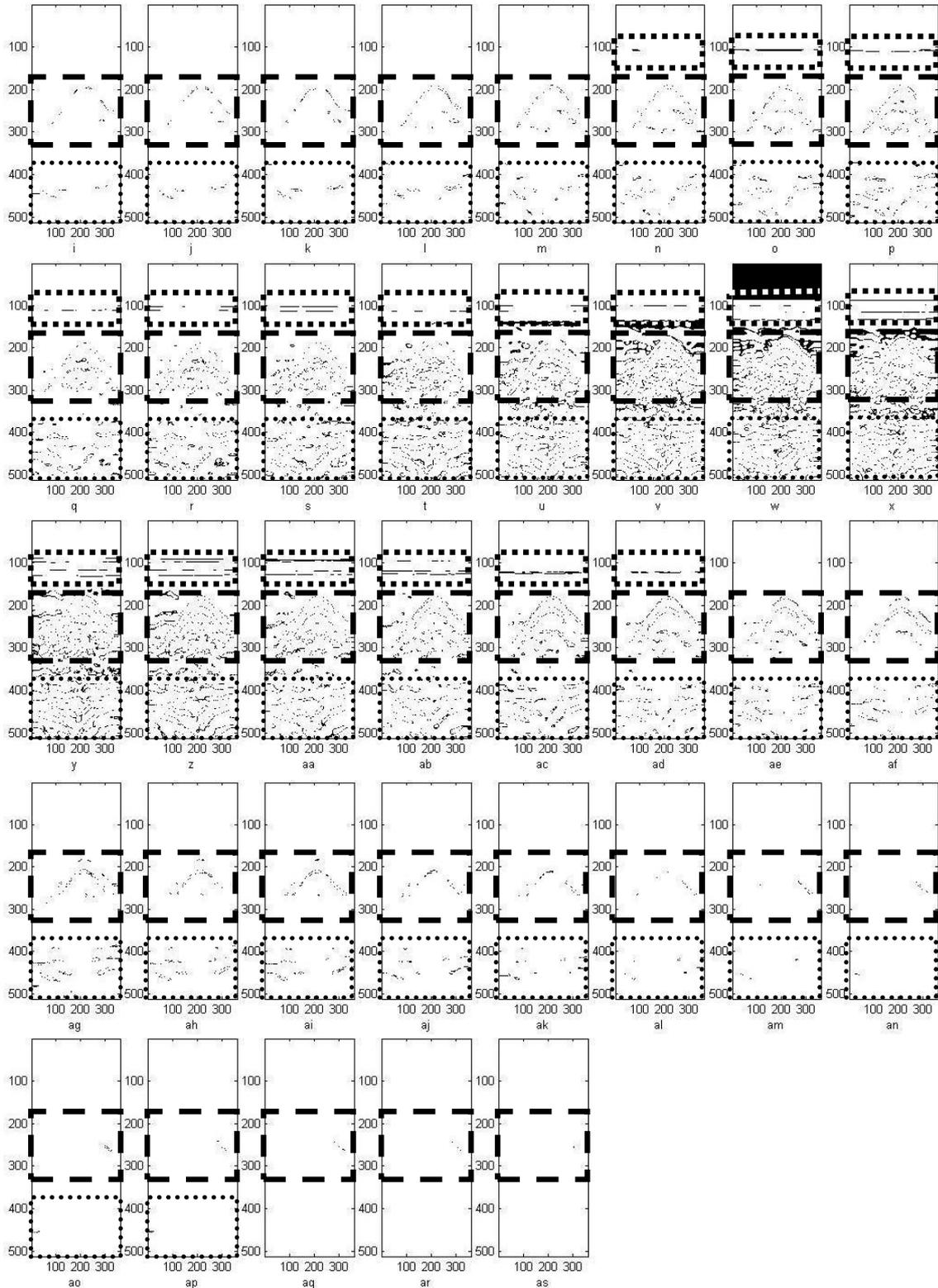


Figura 3.13. Clasificación de Matriz A en rango de amplitud de $h = 1000$. a). [10,11]. b). [11,12]. c). [12,13]. d). [13,14]. e). [14,15]. f). [15,16]. g). [16,17]. h). [17,18]. i). [18,19]. j). [19,20]. k). [20,21]. l). [21,22]. m). [22,23]. n). [23,24]. o). [24,25]. p). [25,26]. q). [26,27]. r). [27,28]. s). [28,29]. t). [29,30]. u). [30,31]. v). [31,32]. w). [32,33]. x). [33,34]. y). [34,35]. z). [35,36]. aa). [36,37]. ab). [37,38]. ac). [38,39]. ad). [39,40]. ae). [40,41]. af). [41,42]. ag). [42,43]. ah). [43,44]. ai). [44,45]. aj). [45,46]. ak). [46,47]. al). [47,48]. am). [48,49]. an). [49,50]. ao). [50,51]. ap). [51,52]. aq). [52,53]. ar). [53,54]. as). [54,55].*

* Los rangos se encuentran en Miles.

- ■ Sector 1.
- Sector 2.
- ■ ■ ■ Sector 3.

En el análisis de la Figura 3.13, se emplearan los sectores planteados anteriormente. De manera consecuente con los anteriores análisis realizados para normas h mayores, se puede observar cómo la discretización de rangos en h menores, favorece la identificación de los rangos de valores en los cuales se encuentran contenidos los límites y el punto central de las ondas que representan los objetos prospectados. Aunque la dispersión de puntos dificulta la visualización del objeto, que nos da una agrupación de datos mayor para reflexiones fuertes, también es verdad que permite identificar reflexiones débiles que con rangos de amplitud tan pequeños no serían fácilmente detectables; las cuales, por esta misma razón, podrían pasar inadvertidas, aún teniendo relevancia, ante los ojos de la persona que realice el análisis de las imágenes captadas en la prospección.

En el sector 1, se puede observar cómo este sector comienza a presentar datos desde el rango [10000,11000] (parte (a)), hasta ya no presentar más datos en figuras superiores al rango [54000,55000] (parte (as)), por lo cual se podría decir que este sector presenta, para una norma $h = 1000$, valores contenidos en un rango de amplitud entre [10000, 55000]. De igual manera para este mismo sector puede observarse cómo empieza a formarse con tres conjuntos de puntos una figura circular, partiendo desde el rango [12000, 13000] (parte (c)), hasta desaparecer la misma en el rango [47000, 48000]; sin embargo, desde el punto de partida se observa cómo esta forma circular, la cual presenta su eje central en un valor mínimo, se extiende hacia arriba y debajo de la misma, por lo cual, al no presentar esta misma propiedad en rangos superiores a [40000, 41000] (parte (ae)), se podría decir que la figura circular presenta una extensión de datos contenida entre [12000, 41000].

Para el sector 2, se ve cómo varía el rango en el cual comienza a presentar sus datos con respecto a la norma h anterior, teniendo su inicio de muestra de datos en el rango [12000, 13000] ahora, y extendiéndose hasta un rango máximo de amplitud de [51000, 52000], quedando contenida para esta nueva clasificación entre [12000, 52000].

Para el sector 3, podemos notar ahora que sus datos se encuentran contenidos entre [23000, 40000].

Conforme los resultados obtenidos en las diferentes discretizaciones a las cuales fue sometida la matriz A , en la Figura 3.14 que se presenta a continuación se puede observar la variación de los mismos.

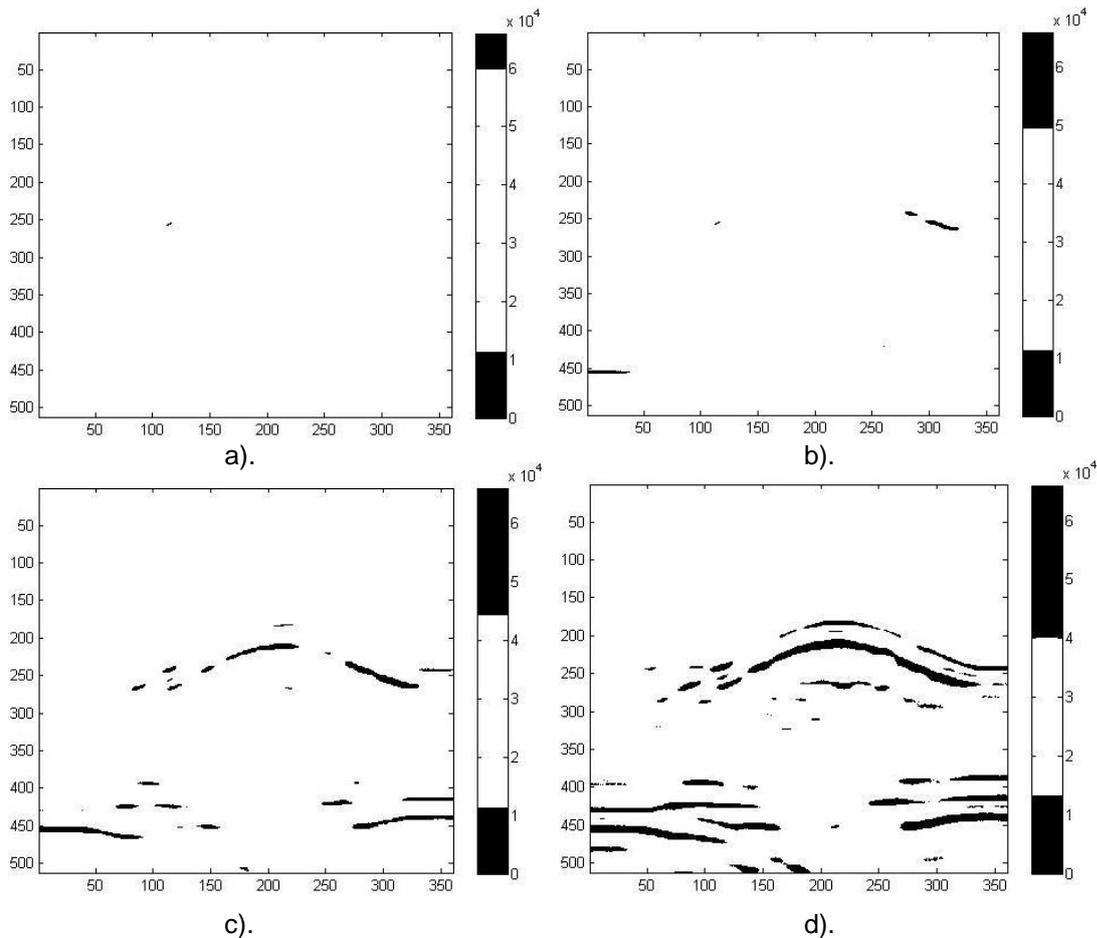


Figura 3.14. Clasificación de la Matriz A , basada en los rango de amplitud obtenidos de las diferentes Normas h , para la forma circular del sector 1. a). [10000,60000]. b). [10000,50000]. c). [10000, 45000]. d). [12000, 41000].

De lo visto en este apartado, se podría decir que:

- La clasificación de imágenes por un determinado rango de valores, genera la posibilidad de errores de interpretación de la imagen, debido a que, al tomar normas h muy espaciadas entre sus límites, se puede generar la pérdida de información, que podría ser relevante para el estudio.
- La clasificación de imágenes por rangos de amplitudes de onda nos permite extraer figuras y formas que nos facilitarán la interpretación de los medios sometidos a prospección.
- Se podría decir que al menos en una de las $B^{(h)}$ matrices se encuentran los bordes extremos o límites de la figura, resultante de la prospección.
- Al realizar una discretización más fina de los datos obtenidos en la matriz A , es posible determinar con mayor precisión los límites y zona central de las anomalías o perturbaciones que se obtienen de la prospección realizada.
- Las imágenes obtenidas por esta clasificación son dependientes de la h aplicada y no permite consistencia en los resultados obtenidos, con lo cual no se hace apta como medida de parametrización con miras a entrenamientos de sistemas inteligentes, dada su amplia variabilidad de resultados y su escasa repetitividad.

3.4. Extracción por Partes de la Onda

Las ondas obtenidas por el GPR, están determinadas por la sucesiva adición de máximos y mínimos valores de amplitud de onda (crestas y valles), y por presentar un carácter de cuasi-periodicidad, como resultado de la reflexión que se genera por el paso de los diferentes materiales que componen el suelo de la señal emitida; es así cómo en los procedimientos siguientes se tomará estos valores para reconstruir la onda a partir de ellos y extraerlos como nuevas matrices.

3.4.1. Extracción de Ondas Partiendo desde su Valor Mínimo de Amplitud hasta su Máximo.

3.4.1.1. Procedimiento.

En este caso se parte del mínimo valor de amplitud de las ondas obtenidas con la prospección; desde este punto, se puede observar dos caminos a seguir a través de la onda; uno determinado por la parte superior y otro por la parte inferior (ver Figura 3.15). Partiendo desde cada valor de amplitud mínimo y tomando como referencia las matrices $B^{(k)}$ con norma $h = 1000$, se construyen las matrices $C^{(l)}$ con $l = 1, \dots, K$, de la siguiente manera:

$$C^{(l)} = B^{(l)} + \sum_{k=l+1}^K \bar{B}^{(k)} \quad \text{(Ecuación 3.5)}$$

siendo

$$\bar{b}_{ij}^{(k)} = \begin{cases} b_{ij}^k, & b_{ij}^k \geq b_{i-1,j}^{(k-1)} \text{ y } b_{ij}^l \neq 0 \text{ ó } b_{ij}^k \geq b_{i-1,j}^k \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Tras realizar el procedimiento anterior, siguiendo el camino por la parte inferior de la onda y tomando como referencia las matrices $B^{(k)}$ con norma $h = 1000$, se construyen las matrices $E^{(l)}$ con $l = 1, \dots, K$, de la siguiente manera:

$$E^{(l)} = B^{(l)} + \sum_{k=l+1}^K \bar{B}^{(k)} \quad \text{(Ecuación 3.6)}$$

siendo

$$\bar{b}_{ij}^{(k)} = \begin{cases} b_{ij}^k, & b_{ij}^k \geq b_{i+1,j}^{(k-1)} \text{ y } b_{ij}^l \neq 0 \text{ ó } b_{ij}^k \geq b_{i+1,j}^k \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

De manera esquemática el procedimiento se representa en la Figura 3.15.

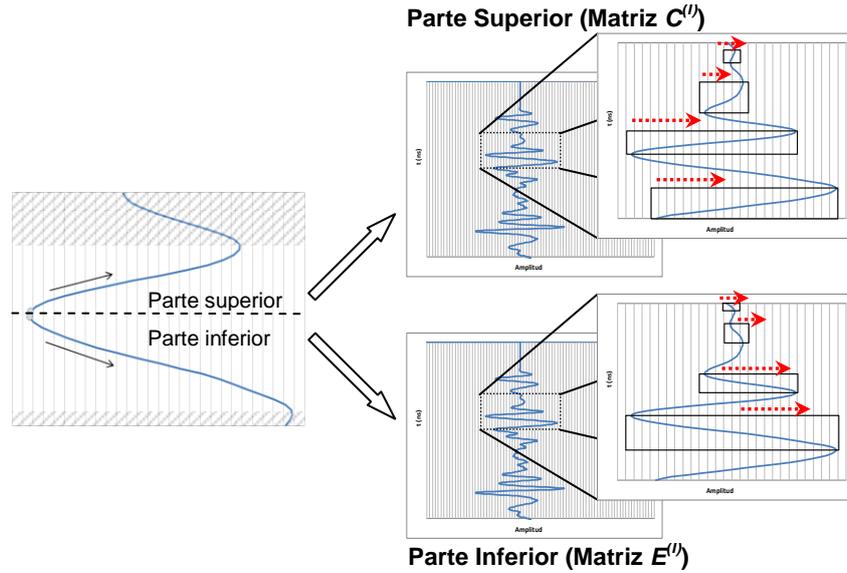
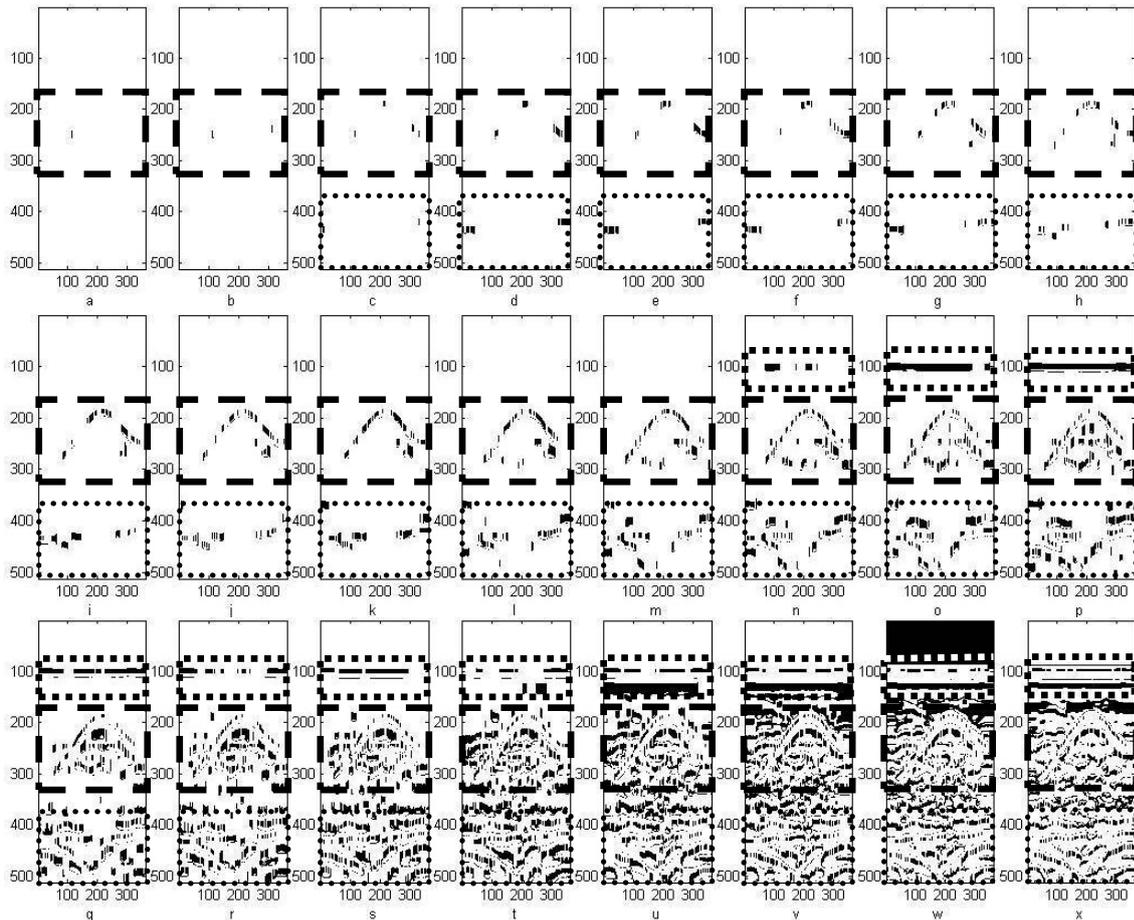


Figura 3.15. Extracción de las ondas en matrices. Punto de partida: mínimos valores de amplitud de cada onda. Clasificación en partes superior e inferior.

3.4.1.2. *Aplicación a la Matriz A. Extracción de la Parte Superior de la Onda con Punto de Inicio en Valores Mínimos de Amplitud.*

En la Figura 3.16, se presentan los resultados obtenidos para la matriz A , tras su paso por el procedimiento planteado en el apartado anterior.



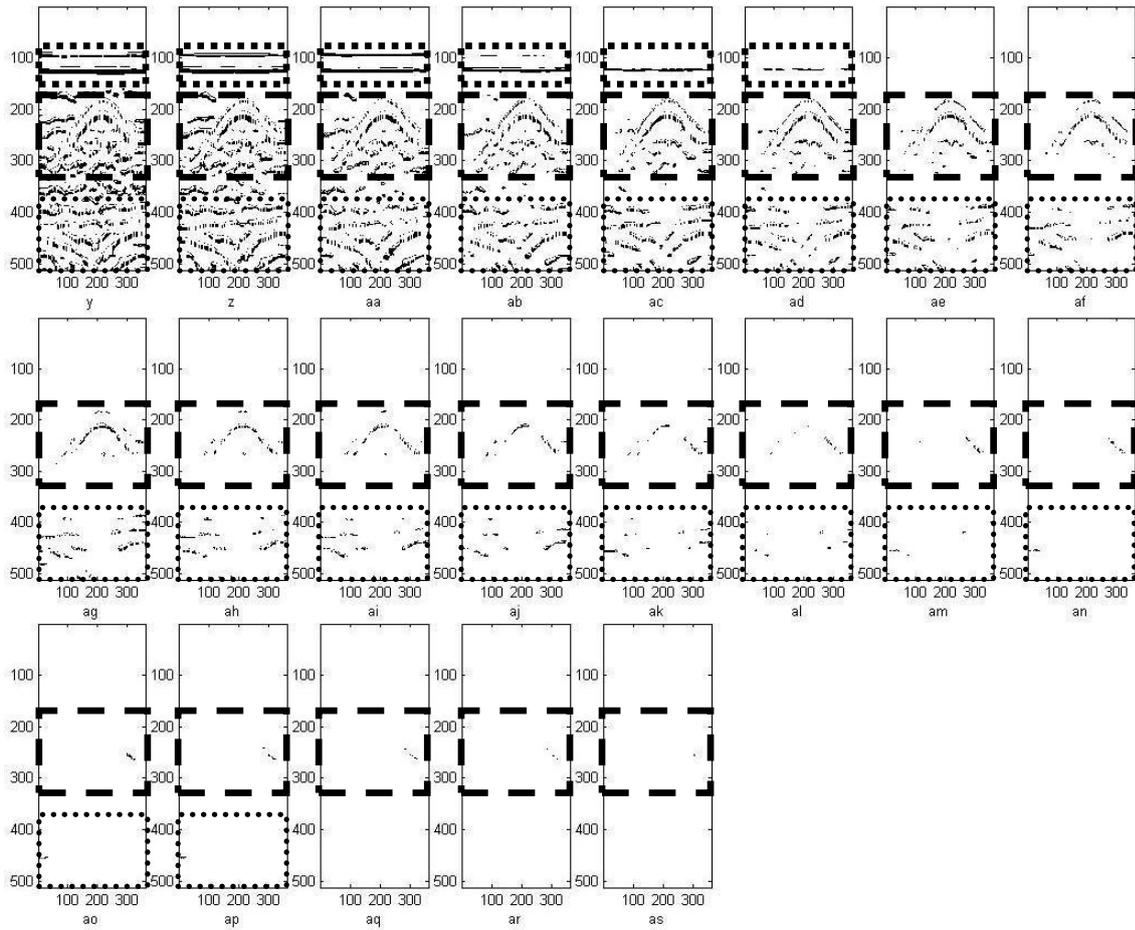


Figura 3.16. Extracción de la parte superior de la onda, Partiendo desde su mínimo valor de amplitud hasta su Valor Máximo. Mínimo entre: a). [10,11]. b). [11,12]. c). [12,13]. d). [13,14]. e). [14,15]. f). [15,16]. g). [16,17]. h). [17,18]. i). [18,19]. j). [19,20]. k). [20,21]. l). [21,22]. m). [22,23]. n). [23,24]. o). [24,25]. p). [25,26]. q). [26,27]. r). [27,28]. s). [28,29]. t). [29,30]. u). [30,31]. v). [31,32]. w). [32,33]. x). [33,34]. y). [34,35]. z). [35,36]. aa). [36,37]. ab). [37,38]. ac). [38,39]. ad). [39,40]. ae). [40,41]. af). [41,42]. ag). [42,43]. ah). [43,44]. ai). [44,45]. aj). [45,46]. ak). [46,47]. al). [47,48]. am). [48,49]. an). [49,50]. ao). [50,51]. ap). [51,52]. aq). [52,53]. ar). [53,54]. as). [54,55].*

* Los rangos se encuentran en Miles.

- — Sector 1.
- Sector 2.
- . - . - . Sector 3.

Se puede observar en la Figura 3.16 la conformación de la curvatura con todos sus componentes por la parte superior de la onda a la cual pertenecen, denotándose en (c) la marcación del inicio de una forma circular con tres partes que la componen, desarrollándose y alcanzando una forma con dos circunferencias formadas de iguales características en las partes (ac) y (ad).

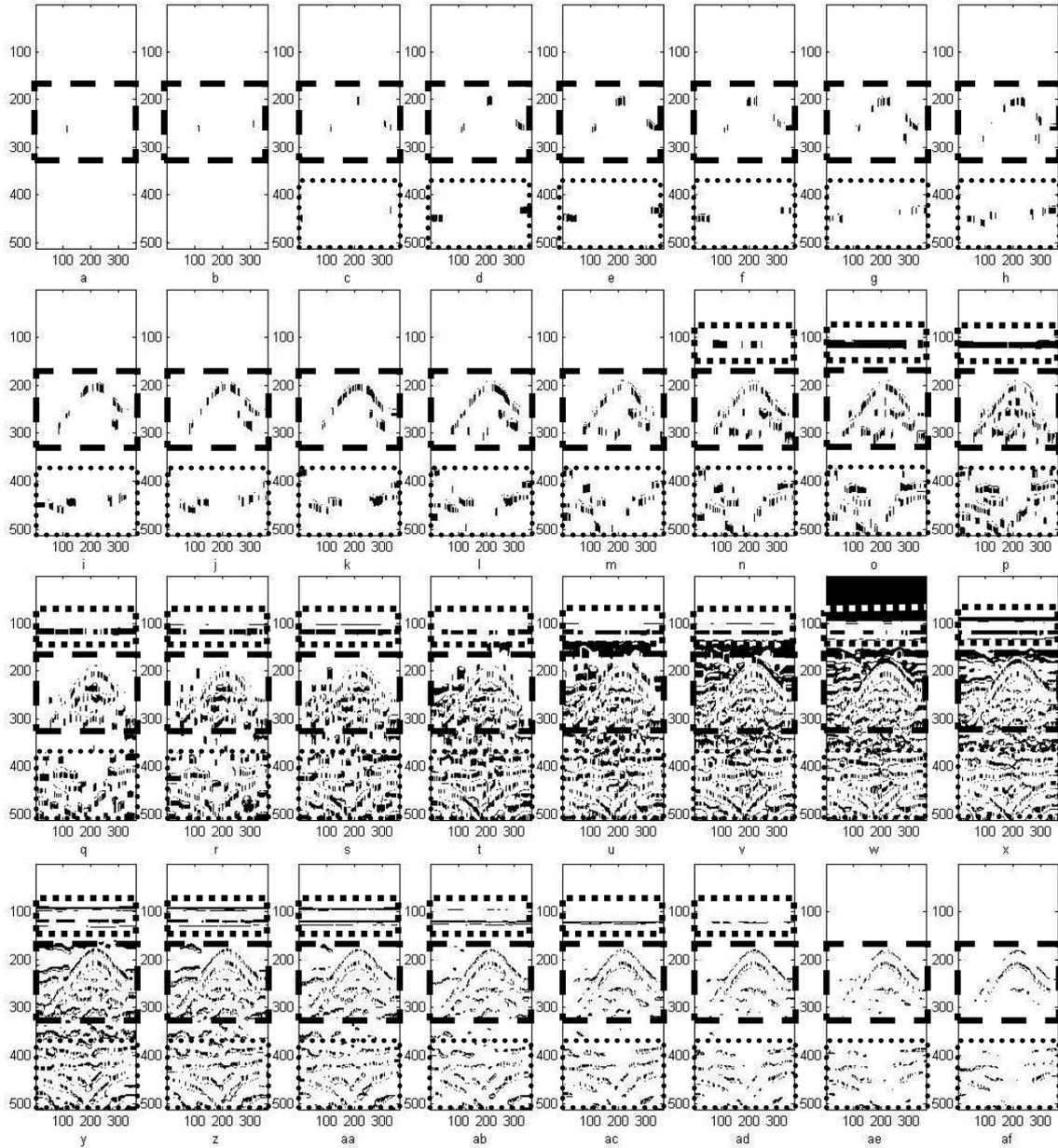
Desde la figura (ae) hasta la (ai), se puede observar cómo se generan dos formas circulares de diferentes componentes la una de la otra, diferenciándose entre sí, por la cantidad de datos agrupados. De igual manera para la parte (aj) se puede observar una sola circunferencia, la cual se desvanece progresivamente, perdiendo datos a la derecha de la misma, hasta llegar a desvanecerse casi por completo en la parte (as) de la figura.

Una de las causas de que la formación de las imágenes no se presente desde un mismo mínimo o máximo para los materiales iguales está determinada porque, a pesar de que los

datos, tomados para cada X_i , están en nano segundos y la distancia entre ellos es tan pequeña como para considerarla como continua, esta misma no deja de ser discontinua y algunos datos pueden pasar sin ser tomados en cada uno de los m datos captados por el paso de la señal a través de ellos.

3.4.1.3. Aplicación a la Matriz A. Extracción de la Parte Inferior de la Onda con Punto de Inicio en Valores Mínimos de Amplitud.

En la Figura 3.17, se presentan los resultados obtenidos para la matriz A, tras su paso por el procedimiento planteado en el anterior apartado.



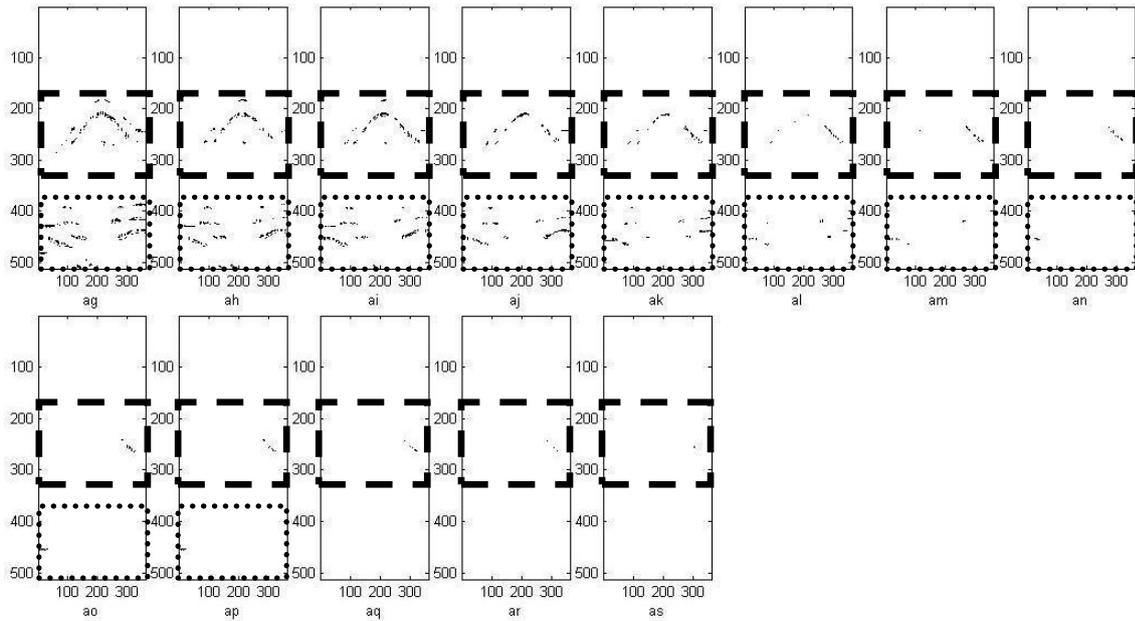


Figura 3.17. Extracción de la parte inferior de la onda, Partiendo desde su mínimo valor de amplitud hasta su valor máximo. mínimo entre: a). [10,11]. b). [11,12]. c). [12,13]. d). [13,14]. e). [14,15]. f). [15,16]. g). [16,17]. h). [17,18]. i). [18,19]. j). [19,20]. k). [20,21]. l). [21,22]. m). [22,23]. n). [23,24]. o). [24,25]. p). [25,26]. q). [26,27]. r). [27,28]. s). [28,29]. t). [29,30]. u). [30,31]. v). [31,32]. w). [32,33]. x). [33,34]. y). [34,35]. z). [35,36]. aa). [36,37]. ab). [37,38]. ac). [38,39]. ad). [39,40]. ae). [40,41]. af). [41,42]. ag). [42,43]. ah). [43,44]. ai). [44,45]. aj). [45,46]. ak). [46,47]. al). [47,48]. am). [48,49]. an). [49,50]. ao). [50,51]. ap). [51,52]. aq). [52,53]. ar). [53,54]. as). [54,55].*

* Los rangos se encuentran en Miles.

- — Sector 1.
- Sector 2.
- . - . - . Sector 3.

En la Figura 3.17 sector 1, se observa similar dinámica en la conformación de la forma circular, partiendo la agrupación de datos para la misma desde (c), con agrupación de puntos en la parte central de la forma circular, extendiéndose hacia el exterior, demarcándose en (af) dos circunferencias que acogen la parte inicial y las cuales se desvanecen gradualmente hasta (ah), con desaparición total en (as).

Para el sector 2, se puede ver la aparición de características en (c), con desarrollo variado de las mismas en las diferentes matrices y la desaparición de las mismas hasta (an).

Finalmente, en el sector 3 se puede observar la aparición de la línea horizontal que demarca la primera reflexión doble, mencionada en apartados anteriores, en la figura (n) con un desarrollo hasta (ad).

3.4.2. Extracción de Ondas Partiendo desde su Valor Mínimo de Amplitud hasta su Máximo.

3.4.2.1. Procedimiento.

Realizando el mismo proceso de acumulación planteado tomando como punto de partida cada uno de los máximos valores de amplitud de onda y adicionando las matrices $B^{(k)}$ con norma $h = 1000$, de menor valor a la misma, se obtienen las matrices $F^{(l)}$; parte superior de

la onda y $H^{(l)}$; parte inferior. La Figura 3.18, presenta de manera esquemática el procedimiento planteado.

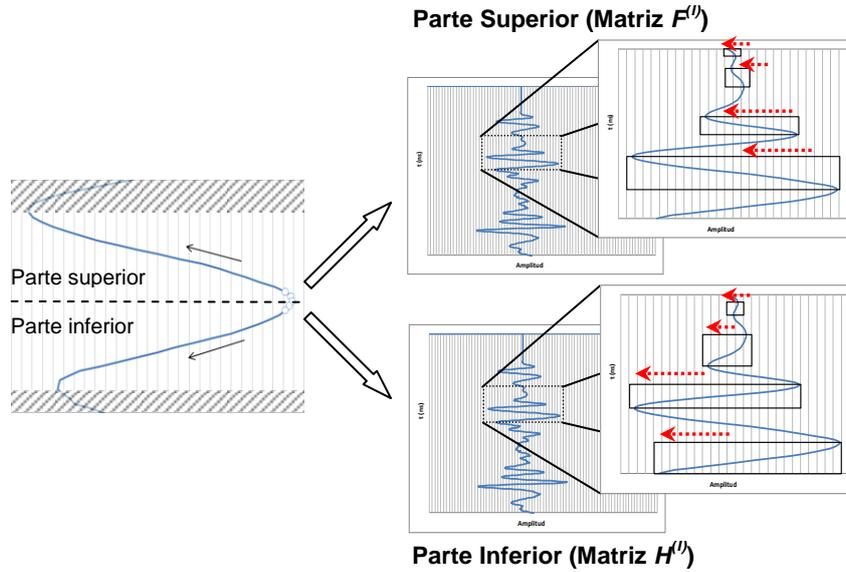


Figura 3.18. Extracción de las ondas en matrices. Punto de partida máximos valores de amplitud de cada onda. Clasificación en parte superior e inferior.

La construcción de las matrices $F^{(l)}$ con $l = 1, \dots, K$, se realiza de la siguiente manera:

$$F^{(l)} = B^{(l)} + \sum_{k=l+1}^K \bar{B}^{(k)} \quad \text{(Ecuación 3.7)}$$

siendo

$$\bar{b}_{ij}^{(k)} = \begin{cases} b_{ij}^k, & b_{ij}^k \leq b_{i+1,j}^{(k-1)} \text{ y } b_{ij}^l \neq 0 \text{ ó } b_{ij}^k \leq b_{i+1,j}^k \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Para la generación de las matrices $H^{(l)}$ con $l = 1, \dots, K$, se realiza el siguiente procedimiento:

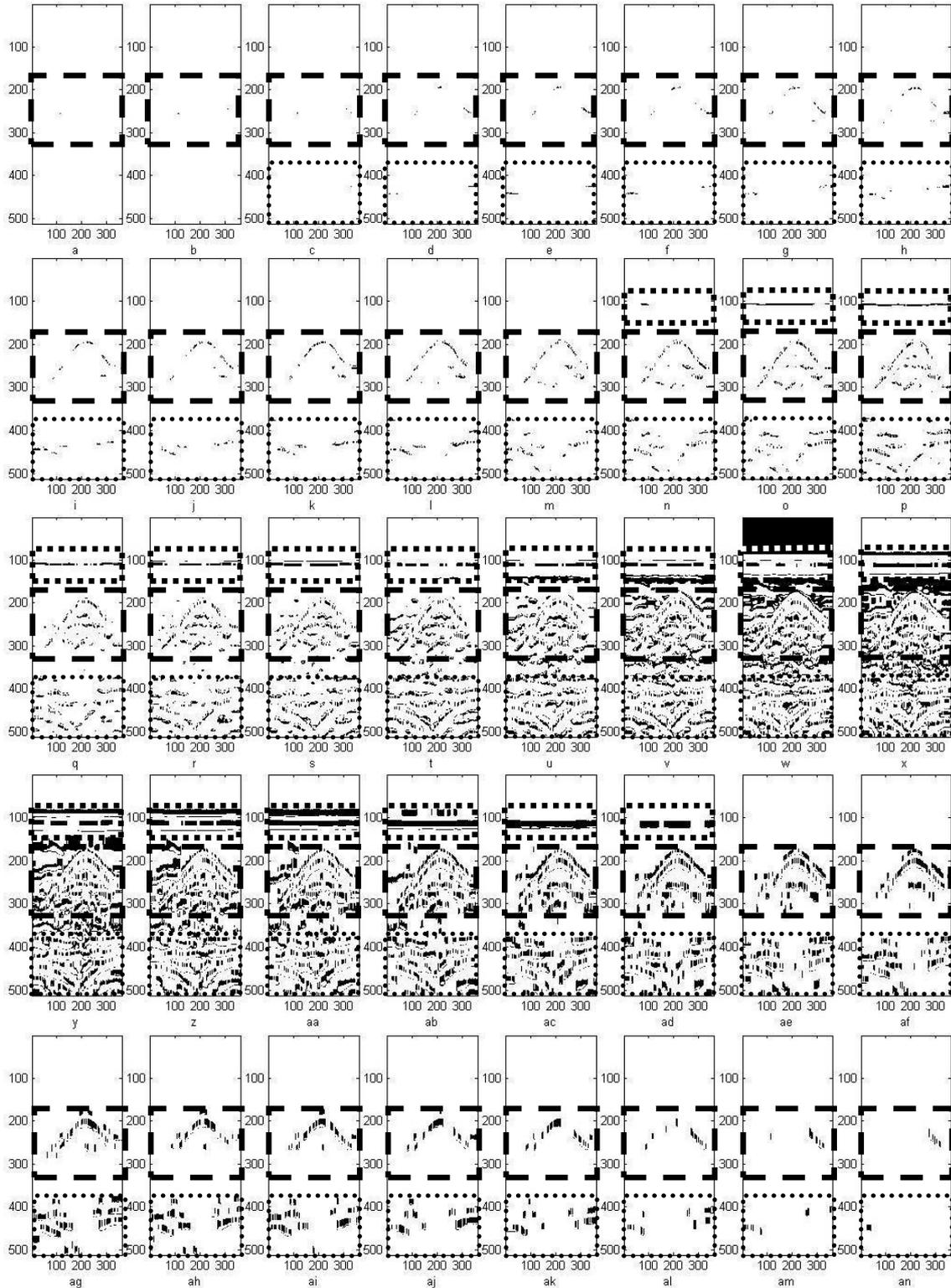
$$H^{(l)} = B^{(l)} + \sum_{k=l+1}^K \bar{B}^{(k)} \quad \text{(Ecuación 3.8)}$$

siendo

$$\bar{b}_{ij}^{(k)} = \begin{cases} b_{ij}^k, & b_{ij}^k \leq b_{i+1,j}^{(k-1)} \text{ y } b_{ij}^l \neq 0 \text{ ó } b_{ij}^k \leq b_{i+1,j}^k \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

3.4.2.2. *Aplicación a la Matriz A. Extracción de la Parte Superior de la Onda con Punto de Inicio en Valores Máximos de Amplitud.*

En la Figura 3.19, se presentan los resultados obtenidos para la Matriz A, tras el paso por el procedimiento planteado en el apartado anterior.



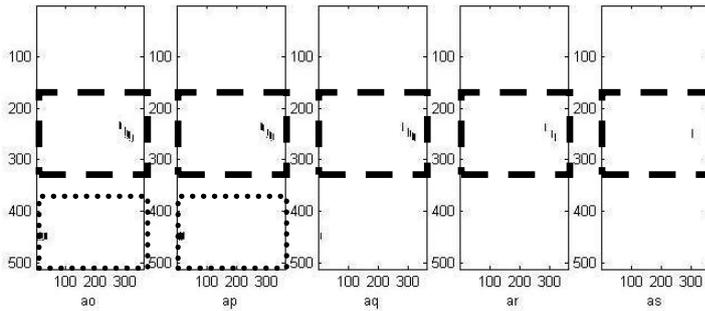


Figura 3.19. Extracción de la parte superior de la onda, Partiendo desde su máximo valor de amplitud hasta su valor mínimo. Máximo entre: a). [10,11]. b). [11,12]. c). [12,13]. d). [13,14]. e). [14,15]. f). [15,16]. g). [16,17]. h). [17,18]. i). [18,19]. j). [19,20]. k). [20,21]. l). [21,22]. m). [22,23]. n). [23,24]. o). [24,25]. p). [25,26]. q). [26,27]. r). [27,28]. s). [28,29]. t). [29,30]. u). [30,31]. v). [31,32]. w). [32,33]. x). [33,34]. y). [34,35]. z). [35,36]. aa). [36,37]. ab). [37,38]. ac). [38,39]. ad). [39,40]. ae). [40,41]. af). [41,42]. ag). [42,43]. ah). [43,44]. ai). [44,45]. aj). [45,46]. ak). [46,47]. al). [47,48]. am). [48,49]. an). [49,50]. ao). [50,51]. ap). [51,52]. aq). [52,53]. ar). [53,54]. as). [54,55].*

* Los rangos se encuentran en Mils.

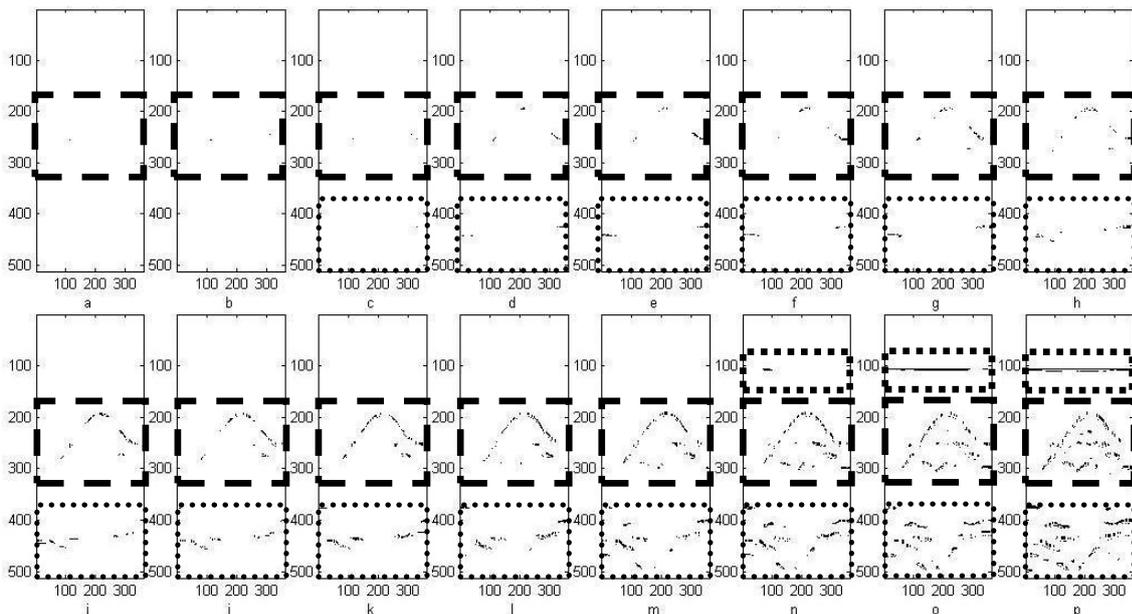
- — Sector 1.
- Sector 2.
- . - . Sector 3.

En la Figura 3.19 sector 1, se observa la aparición de la forma circular antes mencionada en (d), con consolidación hacia sus extremos hasta (ad), con posterior desaparición en (as).

Para los sectores 2 y 3, se puede ver la misma dinámica de aparición y disolución presentadas en las figuras correspondientes a los procedimientos de extracción que tienen punto de partida en valores mínimos de amplitud de onda.

3.4.2.3. Aplicación a la Matriz A. Extracción de la Parte Inferior de la Onda con Punto de Inicio en Valores Máximos de Amplitud.

En la Figura 3.20, se presentan los resultados obtenidos para la Matriz A, tras su paso por el procedimiento anterior.



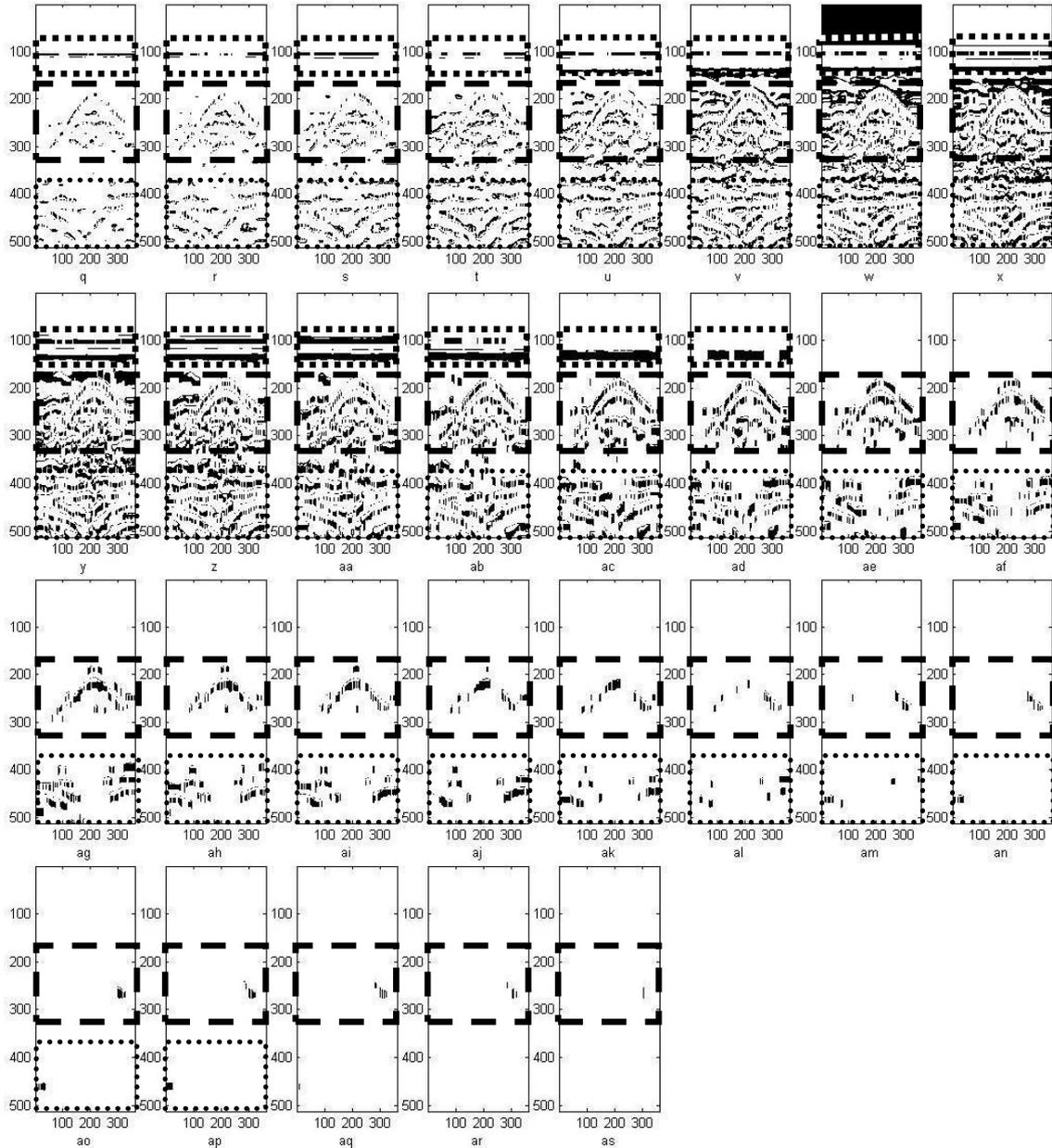


Figura 3.20. Extracción de la parte inferior de la onda, Partiendo desde su máximo valor de amplitud hasta su valor mínimo. Máximo entre: a). [10,11]. b). [11,12]. c). [12,13]. d). [13,14]. e). [14,15]. f). [15,16]. g). [16,17]. h). [17,18]. i). [18,19]. j). [19,20]. k). [20,21]. l). [21,22]. m). [22,23]. n). [23,24]. o). [24,25]. p). [25,26]. q). [26,27]. r). [27,28]. s). [28,29]. t). [29,30]. u). [30,31]. v). [31,32]. w). [32,33]. x). [33,34]. y). [34,35]. z). [35,36]. aa). [36,37]. ab). [37,38]. ac). [38,39]. ad). [39,40]. ae). [40,41]. af). [41,42]. ag). [42,43]. ah). [43,44]. ai). [44,45]. aj). [45,46]. ak). [46,47]. al). [47,48]. am). [48,49]. an). [49,50]. ao). [50,51]. ap). [51,52]. aq). [52,53]. ar). [53,54]. as). [54,55].*

* Los rangos se encuentran en Mils.

- — Sector 1.
- Sector 2.
- Sector 3.

Los sectores presentados en la Figura 3.20, denotan similitud de conformación con los sectores presentados en la Figura 3.19.

De lo visto en este apartado, se podría decir que:

- La extracción por parte de las ondas formadas por las reflexiones resultantes del paso de la señal a través de los materiales permite la visualización de características con mayor solidez, presentando el desarrollo de las mismas en las diferentes matrices obtenidas.
- Cada matriz, diferencia valores de acuerdo con las características que encuentra la señal tras su paso por los materiales.

3.5. Creación de las Matrices $T3$, $T5$, $T9$, $T12$, $T14$ y $T15$

Se ha obtenido el grupo de matrices de las diferentes partes de la onda extraídas por sus cuatro costados. Si sumamos las matrices $C^{(l)}$ generadas, se obtiene una nueva matriz de datos acumulados a la cual hemos llamado $T3$. En esta matriz se resalta la parte superior de las amplitudes de onda que conforman las figuras y que tienen un punto de partida en un valor de amplitud mínimo, como se puede observar en la Figura 3.21. De igual manera si sumamos entre sí mismas las matrices $E^{(l)}$, $F^{(l)}$ y $H^{(l)}$; se obtienen las matrices $T5$, $T9$ y $T12$, respectivamente.

$$T3 = \sum_{l=1}^L \bar{C}^{(l)} \quad \text{(Ecuación 3.9)}$$

$$T5 = \sum_{l=1}^L \bar{E}^{(l)} \quad \text{(Ecuación 3.10)}$$

$$T9 = \sum_{l=1}^L \bar{F}^{(l)} \quad \text{(Ecuación 3.11)}$$

$$T12 = \sum_{l=1}^L \bar{H}^{(l)} \quad \text{(Ecuación 3.12)}$$

La forma visual de estas matrices generadas tomando como ejemplo la Matriz A (Figura 3.3), se presenta en la Figura 3.21.

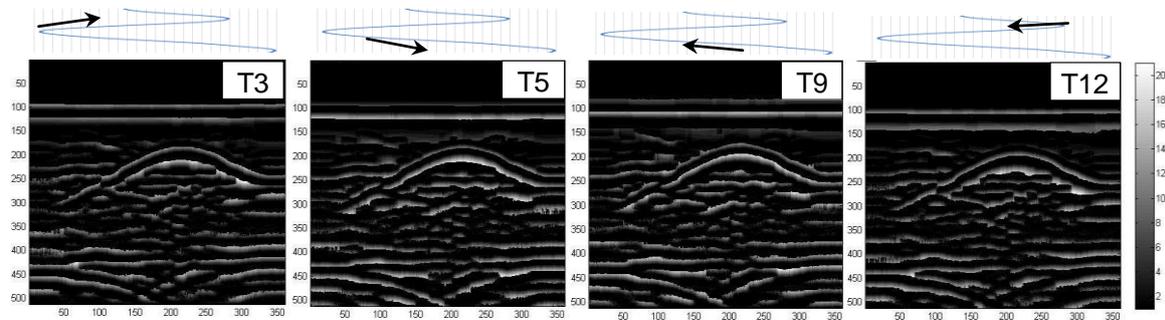


Figura 3.21. Matrices $T3$, $T5$, $T9$ y $T12$ de la Matriz A .

Como se puede observar en la Figura 3.21, las matrices obtenidas del paso por este procedimiento resaltan las formas de las anomalías que han chocado con la señal emitida a través de su recorrido por el suelo, y podemos observar en ellas cómo las matrices $T3$ y $T12$, así como la $T5$ y $T12$ corresponden a la misma parte de la onda, extraída desde diferentes puntos. Las matrices $T3$ y $T12$ corresponden a las ondas extraídas por la parte superior, así como las $T9$ y $T5$ corresponden a la onda por la parte inferior. Si realizamos una suma de estas matrices, conforme la parte a la cual corresponden, agrupándolas en superior e inferior; obtenemos las matrices $T14$ y $T15$, la cuales minimizan el efecto de la pérdida de datos por los tiempo diferentes y la acumulación en una misma capa de inicio de los datos obtenidos para cada prospección.

$$T14 = T3 + T12$$

(Ecuación 3.13)

$$T15 = T5 + T9$$

(Ecuación 3.14)

La Figura 3.22, presenta la aplicación del procedimiento a la Matriz A .

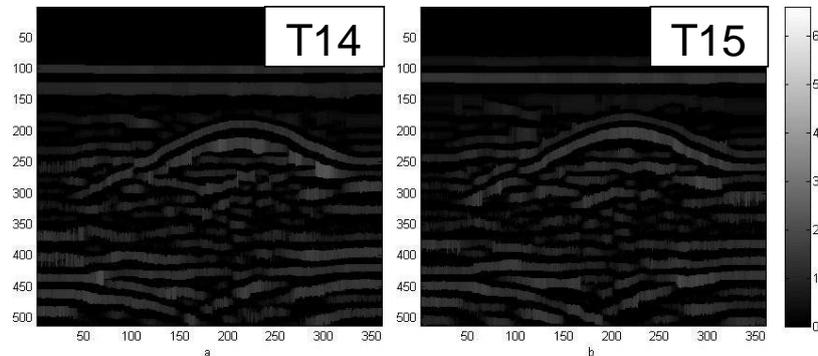


Figura 3.22. Matrices $T14$ y $T15$ de la Matriz A .

Estas matrices son el resultado de las acumulaciones de la onda y representan el rango de valores de amplitud en los cuales se presentan las reflexiones que se obtienen propias del paso de cada señal a través de los diferentes materiales sometidos a prospección, clasificando cada rango en una diferente capa, las cuales conforman a las dos matrices. En este capítulo no se amplía el análisis de las matrices $T3$, $T5$, $T9$, $T12$, $T14$ y $T15$, debido a que el mismo se realiza a modo más detallado en el capítulo 4.

3.6. Conclusiones

En este capítulo se ha planteado un desarrollo metodológico basado en la amplitud de onda generada por el paso de las señales emitidas por el GPR por los diferentes materiales que se encuentra a su paso en el medio prospectado. Para el procedimiento de clasificación por rangos de valores, se puede decir:

- La caracterización de las imágenes de GPR, por rangos de valores de la amplitud de onda resultantes de las prospecciones, los cuales son representados en imágenes de escalas de colores, deben ser manejados con especial cuidado, debido a que no es difícil que se genere la posibilidad de errores de interpretación de la imagen. Lo cual es consecuencia del análisis por normas h de límites muy espaciados entre sí, que ocasiona la pérdida de información que puede ser relevante para los estudios realizados.
- Por otra parte, aunque discretizaciones muy pequeñas de la información no permiten la visualización consolidada de las formas de los objetos en las imágenes de GPR, sí permiten extraer las características de conformación, siendo posible determinar con mayor precisión características tal como límites y zona central de los objetos prospectados. Así, esta clasificación se insinúa como un buen punto de partida para agrupaciones más robustas de los resultados.
- Al menos en una de las $B^{(k)}$ matrices se encuentran los bordes extremos o límites de la figura de interés resultante de la prospección.
- Las imágenes obtenidas por esta clasificación son dependientes de la h aplicada y no permite consistencia en los resultados obtenidos, no siendo apta de manera directa como medida de parametrización con miras a entrenamientos de sistemas inteligentes, dada su amplia variabilidad de resultados y su poca repetitividad.

Para los procedimientos planteados de extracción de matrices, partiendo de valores mínimos y máximos de amplitud de onda, que se presentan en las matrices extraídas, se puede decir que las mismas permiten la visualización de características con mayor solidez a las obtenidas en las imágenes de clasificación por rangos, mostrándose en ellas el desarrollo de los diferentes materiales encontrados tras la prospección realizada. Tales características son mostradas en las diferentes matrices acorde a sus características electromagnéticas.

Finalmente, tras el desarrollo planteado en los dos procedimientos anteriores, los cuales son conducentes a las matrices *T3*, *T5*, *T9*, *T12*, *T14* y *T15*, puede decir de estas últimas, que se insinúan como un buen punto de partida para la visualización consolidada de la información resultante de las prospecciones realizadas y pueden servir como parametrización; especialmente *T14* y *T15* por presentar mayor consolidación de las formas, con miras al entrenamiento de sistemas inteligentes para la clasificación.

Capítulo 4

Posprocesamiento de Imágenes de Georradar en Ensayos de Laboratorio en Tuberías Enterradas de Diferentes Materiales

4.1. Introducción

En este capítulo se pretende observar la respuesta en los radargramas obtenidos, tras la aplicación de los mismos parámetros de obtención de datos del equipo (GPR). Para ello se presentan los resultados de los ensayos de laboratorio realizados en un tanque, bajo la condición de total cobertura de suelo seco de tuberías de diferentes materiales para dos configuraciones diferentes. Con los datos obtenidos de estas prospecciones, se realizó el posprocesamiento descrito en el capítulo 3, obteniéndose las matrices *T3*, *T5*, *T9*, *T12*, *T14* y *T15*, que son la base del análisis realizado, al contrastarlas con los datos en bruto y observar sus características.

4.2. Metodología – Ensayos en Tuberías Enterradas

En este apartado se presenta la metodología aplicada para la obtención de imágenes de prospecciones con georadar sobre tuberías de diferentes materiales en suelo seco. De igual manera, se presentan dos tipos de configuraciones de tuberías enterradas en un tanque de laboratorio. En estos ensayos, se emplearon cinco tuberías de cuatro materiales diferentes, y sus características se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Características de las tuberías empleadas en el ensayo.

Material	Abreviatura	Diámetro Interno (mm)	Diámetro Externo (mm)
PVC	PVC	100	110
Polietileno	PE1	35	50
Fibro cemento ¹	Fib	80	96
Fundición	Fund	86	98
Polietileno	PE2	76	90

El equipo empleado corresponde a una unidad central SIR 3000 GSSI, con una antena de 1,5 GHz de frecuencia central (ver Figura 4.1).



Figura 4.1. Equipo empleado en los ensayos.

¹ Se debe mencionar, que esta tubería presentaba incrustación.

Los parámetros empleados en el equipo de GPR para estos ensayos se presentan a continuación en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Parámetros del equipo empleados en el ensayo.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Antena	1,5 GHz	GP2 (dB)	-20
Samples/Scan	2048	GP3 (dB)	10
Bits/Sample	16	GP4 (dB)	20
Scans/Second	32	GP5 (dB)	50
Scans/Meter	64	Filters	
DielConstant	9	LP_IIR	2500
Range (ns)	10	HP_IRR	200
Top (m)	-0,1	LP_FIR	0
Range Gain (dB)		HP_FIR	0
Points	5	STAKING	3
GP1 (dB)	-20	BGR_RMVL	0

Los ensayos realizados en este capítulo consistieron en el deslizamiento de la antena bajo los parámetros establecidos del equipo (ver Tabla 4.2), sobre una superficie de polipropileno demarcada como se presenta en la Figura 4.2.

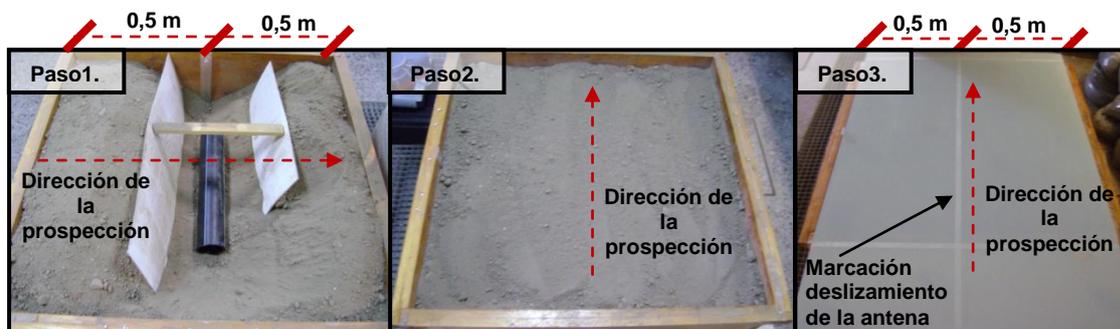


Figura 4.2. Procedimientos de los ensayos realizados.

Las mediciones fueron realizadas de manera transversal a la tubería, como puede observarse en la Figura 4.2. La superficie libre entre la placa de polipropileno y el suelo es 0,06 m.

4.2.1. Ensayos en Paralelo de Diferentes Materiales de Tubería Enterrados.

El procedimiento para esta configuración consistió en enterrar en suelo seco del tanque una a una las tuberías presentadas en la Tabla 4.1, realizando una prospección por cada tubería enterrada de manera separada, bajo los parámetros del equipo presentados en la Tabla 4.2, y siguiendo los pasos de obtención de imágenes de la Figura 4.2. En la Figura 4.3, se presenta de manera esquemática las configuraciones de las diferentes tuberías aplicadas para este ensayo.

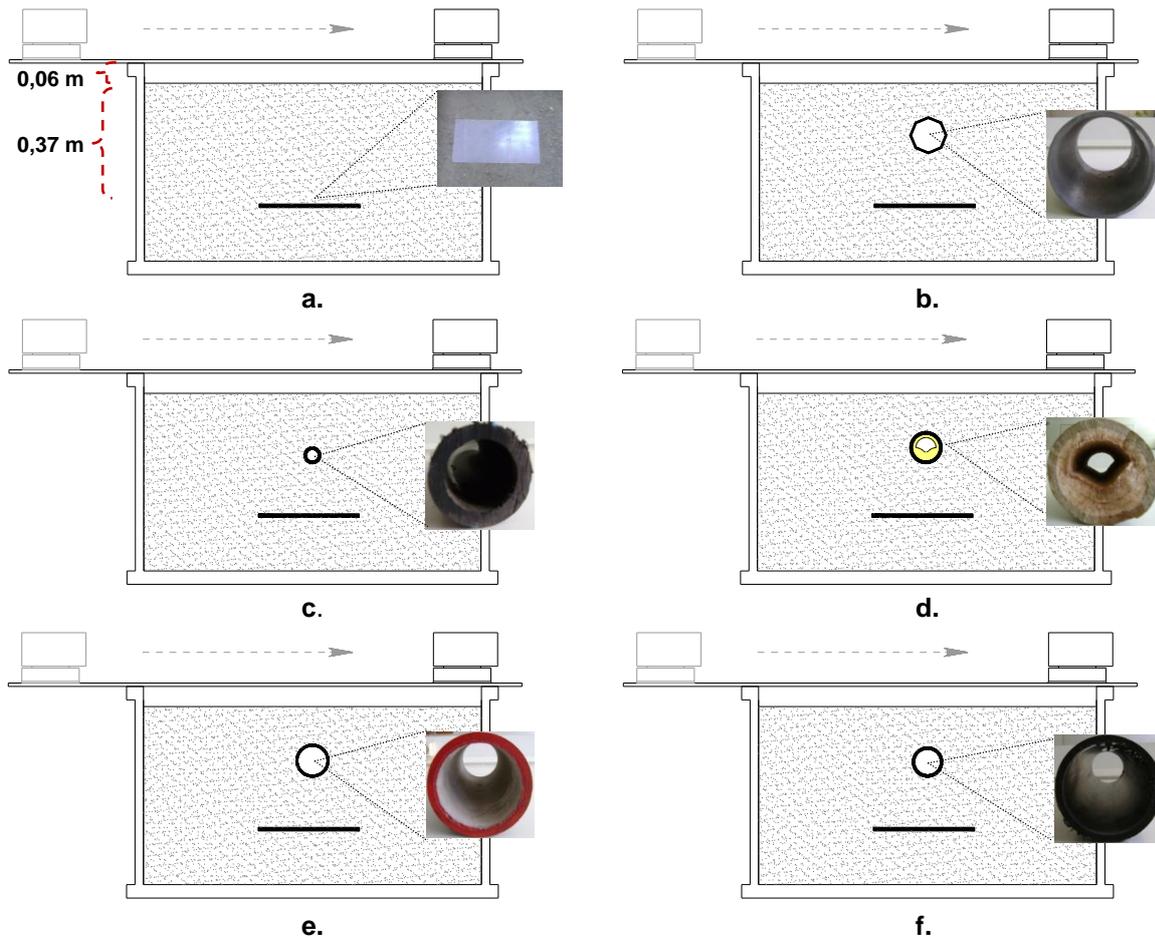


Figura 4.3. Ensayos en paralelo de diferentes tuberías enterradas – Configuraciones empleadas en laboratorio. a). Referencia. b). PVC. c). PE1. d). Fib. e). Fund. f). PE2.

4.2.2. Ensayos en Simultáneo de Diferentes Materiales de Tubería Enterrados.

Para este apartado, el procedimiento consistió en enterrar en suelo seco del tanque de laboratorio, las tuberías presentadas en la Tabla 4.1 de manera simultánea. La posición de estas tuberías en el interior del tanque se realizó de manera aleatoria. En la Figura 4.4, se presenta de manera esquemática la configuración del tanque aplicada para este ensayo.

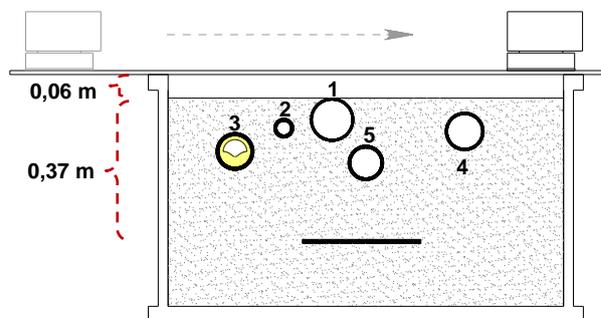


Figura 4.4. Ensayos en simultáneo de diferentes tuberías* enterradas – Configuración empleada.

* Los materiales fueron numerados de la siguiente manera: 1. PVC, 2. PE1, 3. Fib, 4. Fund, 5. PE2.

Este ensayo intenta representar de una manera más cercana las condiciones presentadas en las calles, donde se encuentran agrupaciones de tuberías, estando muy cercanas entre sí.

4.3. Imágenes en Bruto de las Prospecciones Realizadas en Laboratorio con Tuberías Enterradas de Diferentes Materiales.

En este apartado se presenta a modo de imágenes los resultados sin posprocesamiento (en bruto), de las prospecciones realizadas bajo los parámetros y configuraciones descritas en la metodología de este capítulo en el apartado anterior.

4.3.1. Imágenes en Bruto – Ensayos en Paralelo.

Los datos obtenidos de las prospecciones realizadas en laboratorio, a miras de observar características de tuberías de diferentes materiales enterradas y cuyas mediciones fueron realizadas en paralelo, se presentan en la Figura 4.5, a modo de imágenes en escala de gris.

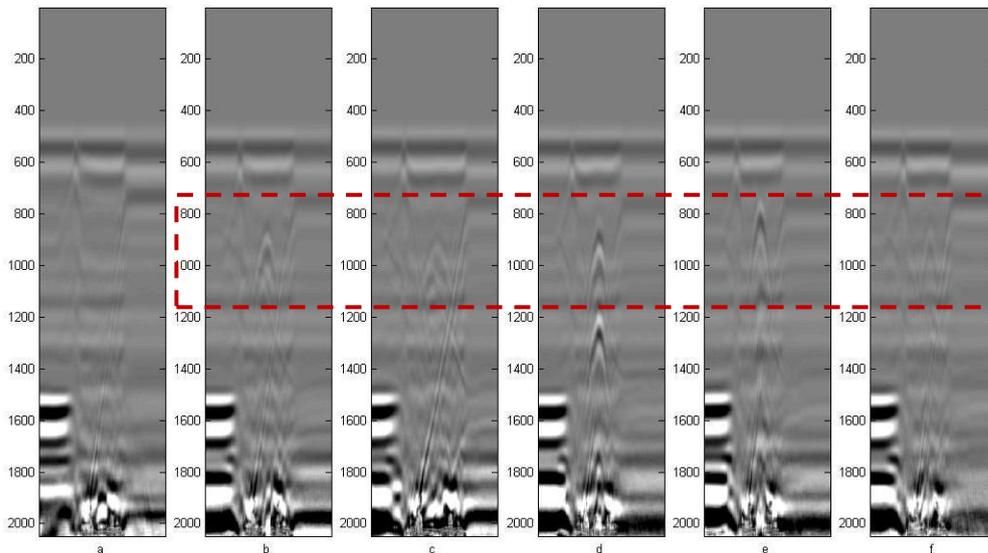


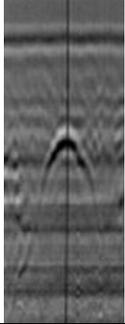
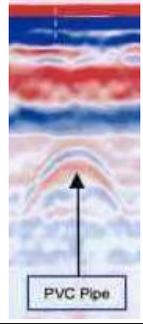
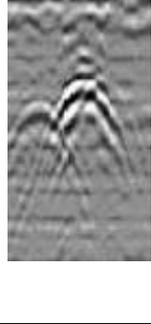
Figura 4.5. Imágenes en bruto – Ensayo en paralelo de tuberías enterradas. a). Referencia. b). PVC. c). PE1. d). Fib. e). Fund. f). PE2.

En la Figura 4.5 se puede observar cómo la intensidad del contraste del paso de material suelo-tubería-suelo, favorece la visualización de las tuberías no plásticas del ensayo, notándose la marcada intensidad *de color* que resaltan las imágenes de las tuberías de Fibrocemento y Fundición, en comparación con las de carácter plástico (PVC, PE1, PE2).

La variación en intensidad del *color*, que puede notarse en la Figura 4.5, que demarca con mayor intensidad las tuberías no plásticas del ensayo y que las diferencian de las que lo son, ha sido por mucho tiempo la primera clasificación rápida, que se realiza de manera visual, de las tuberías encontradas en las diferentes prospecciones. Esto se puede evidenciar en la Tabla 4.3, donde se han recopilado algunas imágenes de tuberías de materiales de contraste altos entre sí, clasificadas por diferentes autores y empresas que emplean las imágenes de GPR para la localización de tuberías empleando la intensidad del color para su clasificación. La intensidad de color junto con la asociación de formas, es uno de los factores predominantes empleados para la identificación. Puede emplearse como herramienta de clasificación válida pero subjetiva, condicionada a la experiencia del operario

y dependiente de la escala de color aplicada. Esto hace que la operación resulte bastante dispendiosa y tendente a la pérdida de información de las características de la reflexión.

Tabla 4.3. Imágenes de tuberías clasificadas por su intensidad de color.

				
Material de Tubería	Acero ²	PVC ³	Acero ⁴	Líneas de distribución de agua, material desconocido ⁵

En la Figura 4.6, se presentan las imágenes de la Figura 4.5, en sus mapas de contornos.

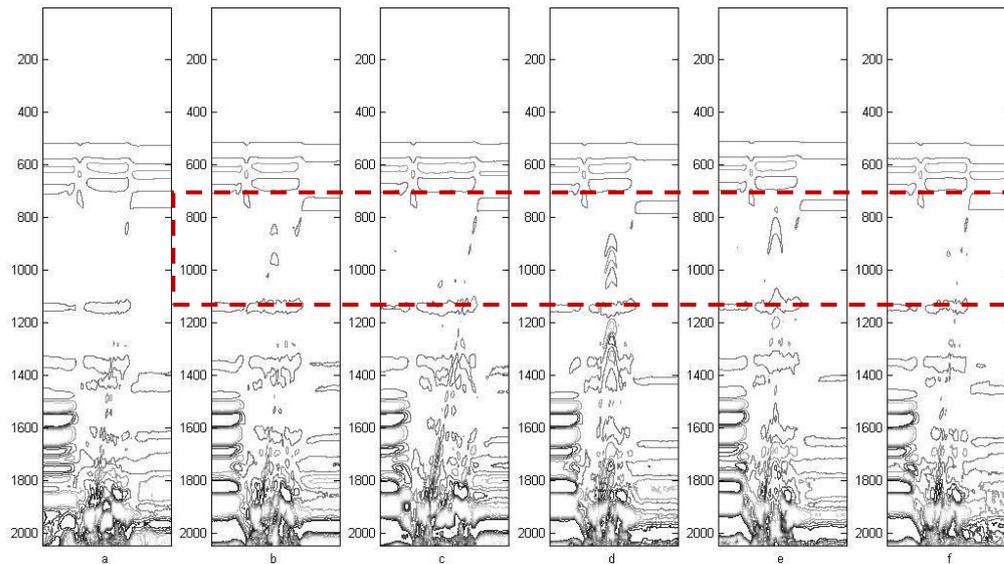


Figura 4.6. Imágenes en bruto – Ensayo en paralelo de tuberías enterradas. Mapas de contornos. a). Referencia. b). PVC. c). PE1. d). Fib. e). Fund. f). PE2.

La visualización por mapas de contornos, permite observar con mayor claridad los límites de las diferentes reflexiones. Es así como en la Figura 4.6, se puede visualizar de una manera más clara las tuberías adicionadas, debido a que los contornos están más contrastados. Sin embargo, aunque la tubería de PVC puede visualizarse rápidamente y las tuberías de PE son visibles en la Figura 4.5, observamos cómo para estas últimas, el contraste de sus contornos no es lo suficientemente intenso como para ser observadas a simple vista, ni demarcadas en los mapas de contornos. Esto es consecuencia de la baja intensidad de color, debido a una baja amplitud de onda, propia de este material, lo que no permite una

² (Olhoeft G. R., 1999)

³ <http://www.subsurfaceimaging.net/cable.asp>

⁴ <http://www.subsurfaceimaging.net/cable.asp>

⁵ (Cukavac, Klemčić, & Lazović, 2008)

demarcación fuerte en la tubería de PVC y deja prácticamente invisible a la tubería de PE en los mapas de contornos de las mismas. Por otra parte, se puede observar una imagen con menor cantidad de perturbaciones para las tuberías de fibrocemento y fundición, ya que no se arrastra tanta reflexión del suelo.

4.3.2. Imágenes en Bruto – Ensayo en Simultáneo.

A continuación en la Figura 4.7, se presentan los resultados en bruto de la prospección realizada, tras los ensayos realizados en simultáneo de las tuberías y configuraciones presentadas anteriormente, en escala de grises y mapa de contornos.

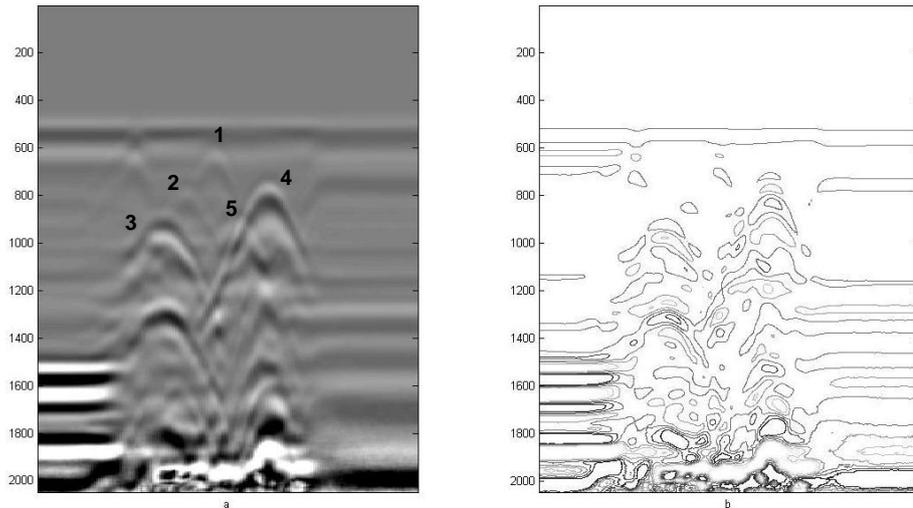


Figura 4.7. Imágenes en bruto – Ensayo en simultáneo de tuberías enterradas*. a). Escala de grises. b). Mapa de contornos.

* Los materiales fueron numerados de la siguiente manera: 1. PVC, 2. PE1, 3. Fib, 4. Fund, 5. PE2.

En la Figura 4.7, se puede observar las diferentes marcas que presentan las tuberías enterradas con el paso del GPR sobre ellas. En ésta se pueden ver rápidamente los contrastes que presentan las tuberías. Sin embargo, en su mapa de contornos, sólo se visualizan claramente los contornos de los materiales fibrocemento y fundición, y se puede notar cómo las tuberías plásticas no son fácilmente identificables, en el caso del PVC, llegando a ser invisibles las tuberías de PE, lo que ratifica los resultados obtenidos en los datos en bruto de las prospecciones individuales (en paralelo) de las mismas tuberías.

De la visualización de los datos en bruto con imágenes en escala de gris y mapas de contornos presentados, podemos concluir que:

- Se presenta dificultad para la visualización de las tuberías plásticas, llegando a no ser identificables las tuberías de PE.
- La marcada intensidad de color entre las tuberías plásticas y las que no lo son (poco reflexivas y reflexivas), permite la identificación visual rápida de las tuberías; sin embargo, la identificación está condicionada a la experiencia del intérprete, así como de la escala de colores aplicada, haciéndose un proceso subjetivo no apto para realizar parametrización conducente a la clasificación por sistemas inteligentes.

4.4. Posprocesamiento. Análisis Mediante las Matrices $T3$, $T5$, $T9$ y $T12$ - Ensayos en Tuberías Enterradas.

En este apartado, se presentan las imágenes de las matrices $T3$, $T5$, $T9$ y $T12$, resultantes de la aplicación del procedimiento planteado en el capítulo 3, en los datos brutos, resultado de las prospecciones realizadas en ensayos de laboratorio en tuberías enterradas en suelo seco, para las configuraciones planteadas.

4.4.1. Procesamiento por Matrices $T3$, $T5$, $T9$ y $T12$ – Ensayos en Paralelo.

Las imágenes presentadas en este apartado, corresponden a la adición de las cinco tuberías más una imagen de referencia. Los resultados obtenidos en la referencia, son presentados a manera de comparación y no serán analizados. A continuación en la Figura 4.8 se presenta la imagen de referencia.

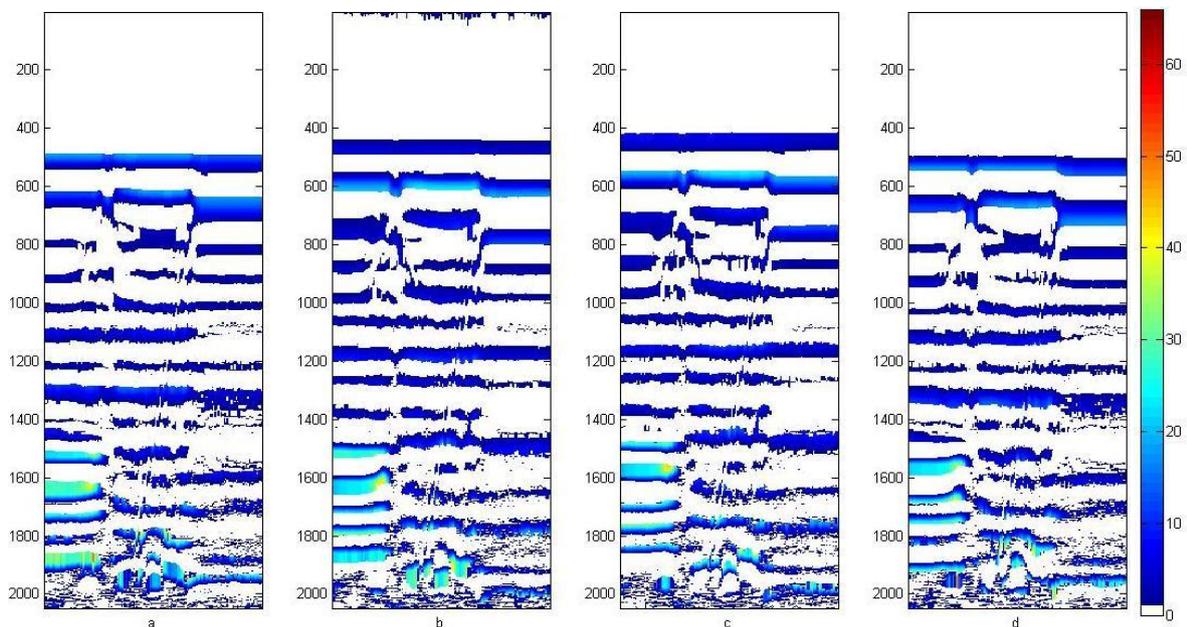


Figura 4.8. Posprocesamiento – Imagen de referencia – Ensayos en paralelo. a). $T3$. b). $T5$. c). $T9$. d). $T12$.

A continuación se presenta en la Figura 4.9 el mapa de contornos de la Figura 4.8.

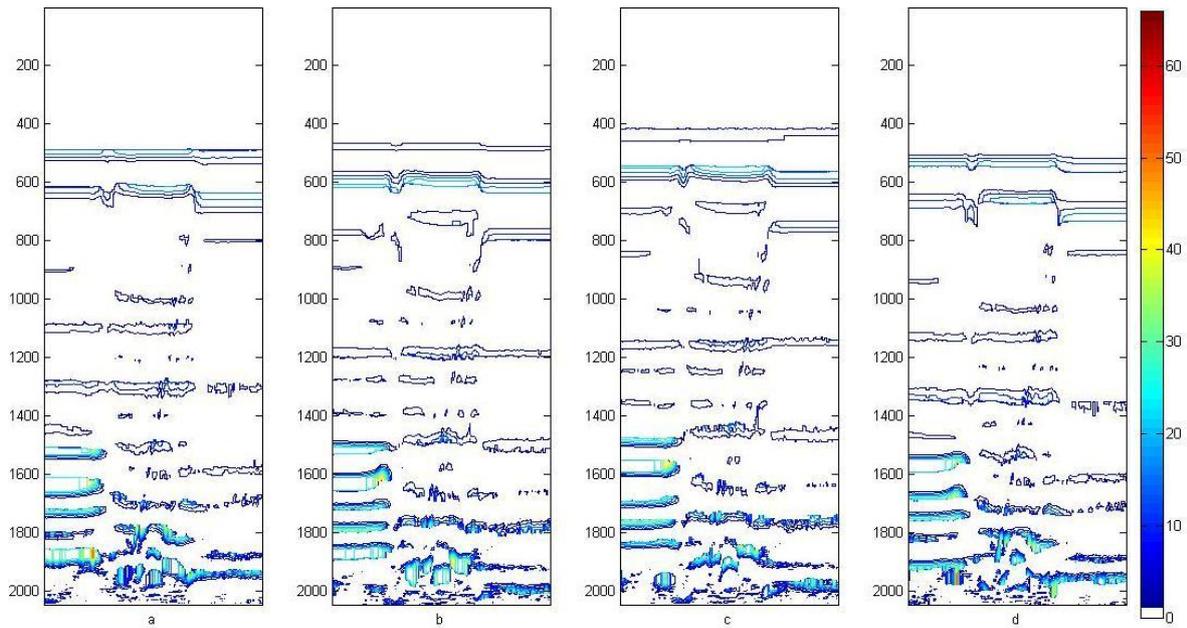


Figura 4.9. Posprocesamiento – Imagen de referencia. Mapas de contornos – Ensayos en paralelo. a). T3. b). T5. c). T9. d). T12.

Basándose en la comparación visual que se da al contrastar la imagen de referencia (Figura 4.8) con las figuras obtenidas con la adición de tuberías en el medio y posterior posprocesamiento, se realiza el siguiente análisis. En la Figura 4.10, se presentan las matrices resultantes del procedimiento aplicado para la adición en el medio de tubería de PVC.

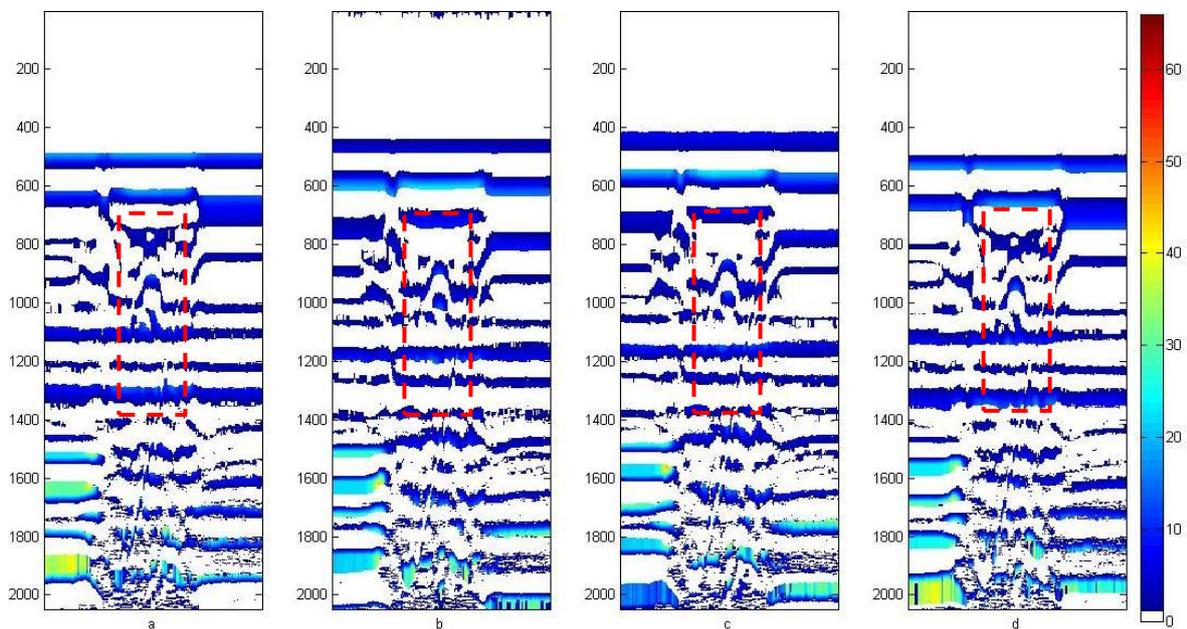


Figura 4.10. Posprocesamiento – Tubería PVC – Ensayos en paralelo. a). T3. b). T5. c). T9. d). T12.

En la Figura 4.10, se puede observar cómo la tubería de PVC se demarca en todas las imágenes de las matrices, visualizándose la misma de mejor manera al contrastar con las imágenes de la Figura 4.8 (referencia). En la figura se puede notar correspondencia de las formas presentadas en las parte (a)-(d) y (b)-(c). De igual manera, se puede notar cómo se demarca la formación de la “hipérbola” de características, resaltándose con mayor intensidad de color la parte central de la misma. También se puede notar cómo las partes (b)

y (c) de la figura presentan la parte superior de las características de la tubería, y en las partes (a) y (d) presentan la parte inferior de las características de la tubería, las cuales son acordes a los principios del procedimiento aplicado.

En la Figura 4.11, se presenta el mapa de contornos de la Figura 4.10.

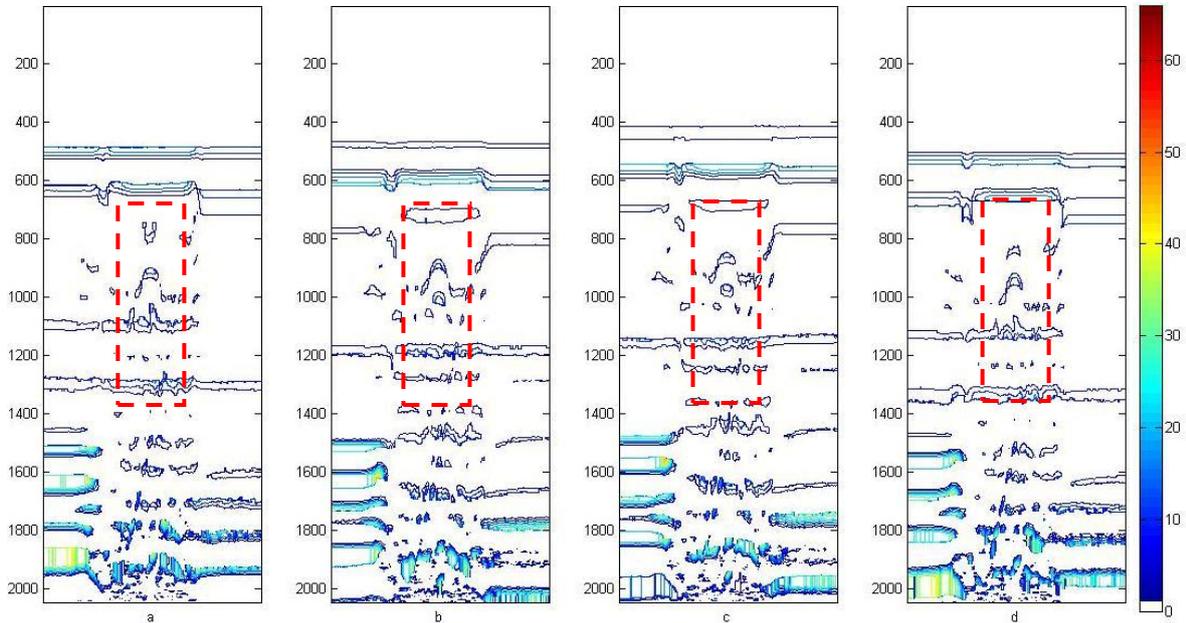


Figura 4.11. Posprocesamiento – Tubería de PVC. Mapas de contornos – Ensayos en paralelo. a). T3. b). T5. c). T9. d). T12.

En la Figura 4.11, puede observarse de mejor manera la tubería de PVC con respecto a la Figura 4.6 (b), en su mapa de contornos. Aquí puede ser visualizada con mayor claridad y menor ruido la imagen obtenida de la tubería enterrada. De igual manera, se puede observar el mejoramiento de la imagen, mostrándose mayor marcación de las características propias de la tubería adicionada.

En la Figura 4.12, se presentan las matrices resultantes del procedimiento aplicado para la adición en el medio de tubería de PE1.

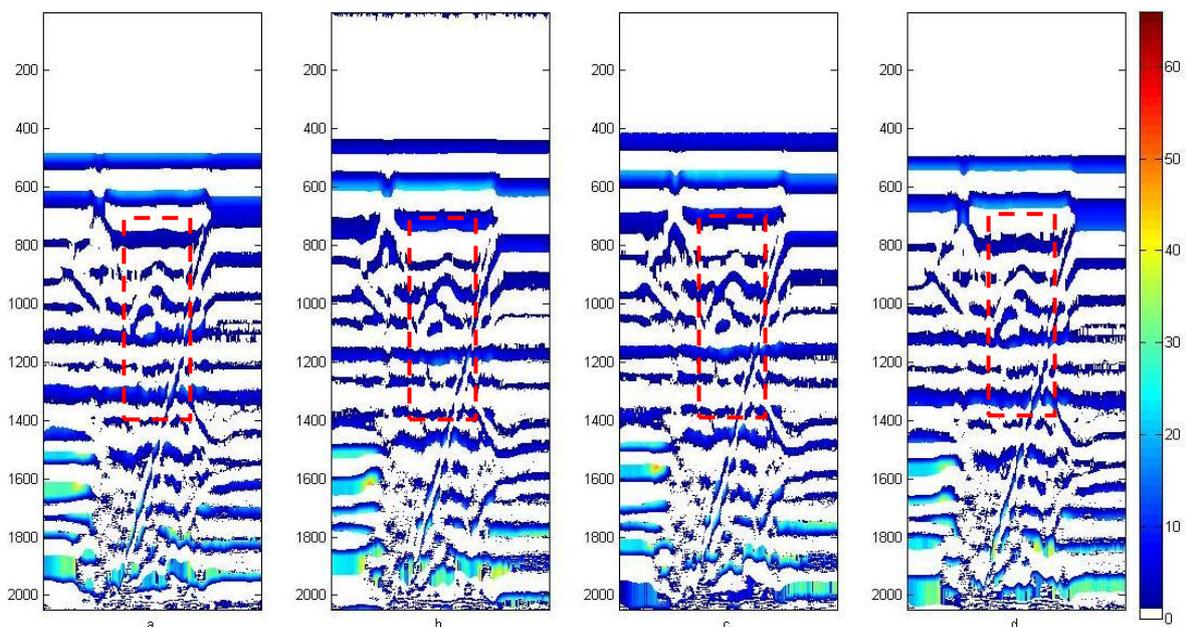


Figura 4.12. Posprocesamiento – Tubería PE1 – Ensayos en paralelo. a). T3. b). T5. c). T9. d). T12.

En la Figura 4.12, se observa menor intensidad en la marcación de la tubería, con respecto a lo observado para el material PVC (Figura 4.10), en esta figura se da una mayor dificultad de diferenciar la tubería de las reflexiones del contorno, debido a que la cantidad de veces que se repite en el acumulado la tubería presenta una alta similaridad a las reflexiones del entorno. Se puede notar de igual manera cómo la parte superior de la tubería se encuentra demarcada en (a)-(d) y la parte inferior se encuentra demarcada en (b)-(c), presentando una mayor cantidad de datos acumulados en (b)-(c) de la tubería, percibiendo cómo la amplitud de la onda es mucho menor a la obtenida en PVC.

En la Figura 4.13, se presenta el mapa de contornos de la Figura 4.12.

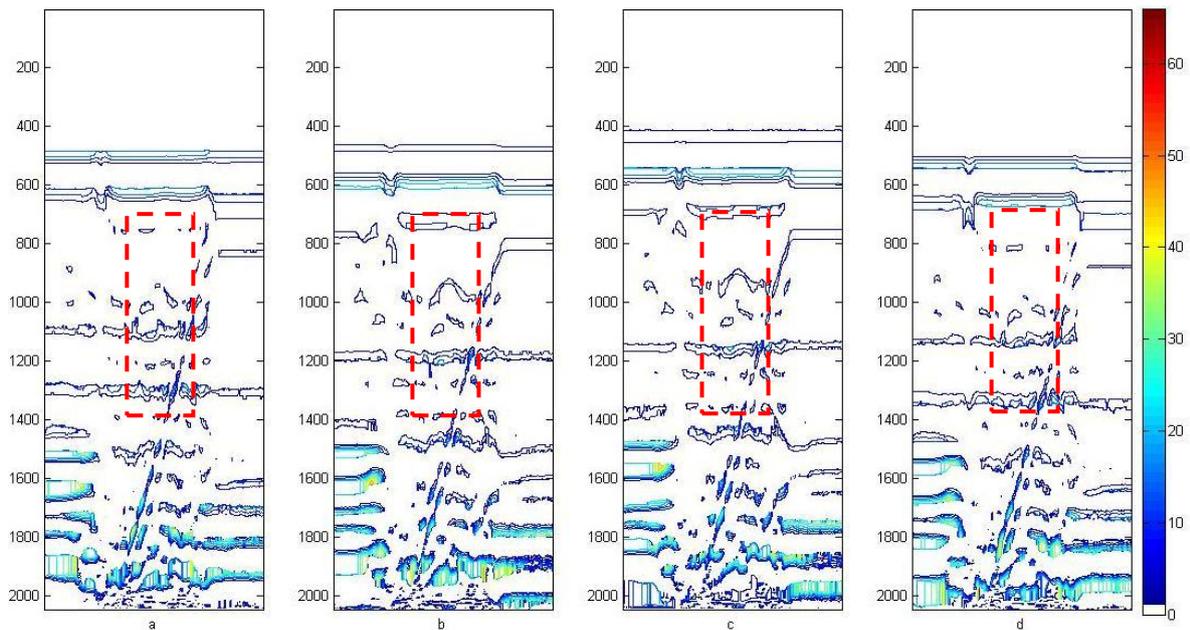


Figura 4.13. Posprocesamiento – Tubería PE1. Mapas de contornos – Ensayos en paralelo. a). T3. b). T5. c). T9. d). T12.

La aplicación del procedimiento permite observar en su mapa de contornos presentado en la Figura 4.13, la visualización de la tubería de PE1, demarcándose los límites de las características de las imágenes de la tubería, presentándose las mismas con mayor claridad en las partes (b) y (c) de esta figura, al compararlo con la Figura 4.6 (c).

En la Figura 4.14, se presentan las matrices resultantes del procedimiento aplicado para la adición en el medio de tubería de Fibrocemento.

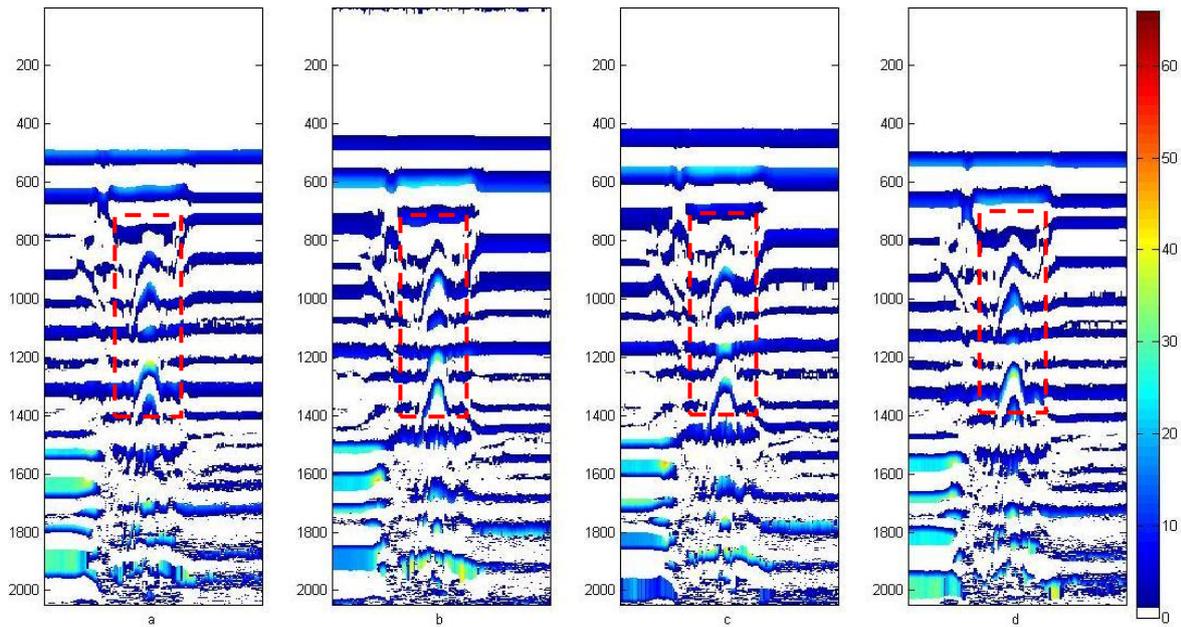


Figura 4.14. Posprocesamiento – Tubería Fib – Ensayos en paralelo. a). T3. b). T5. c). T9. d). T12.

En la Figura 4.14, se puede observar la tubería con dos marcaciones en cada una de las matrices. De igual manera se visualiza incremento en la intensidad del color con la amplitud de la onda y cómo la amplitud de la hipérbola es mucho mayor en comparación con lo observado para PVC y PE1 (Figura 4.10 y Figura 4.12).

En esta figura se evidencia de igual manera deformación en la parte inferior a la imagen obtenida de la tubería.

En la Figura 4.15, se presenta el mapa de contornos de la Figura 4.14.

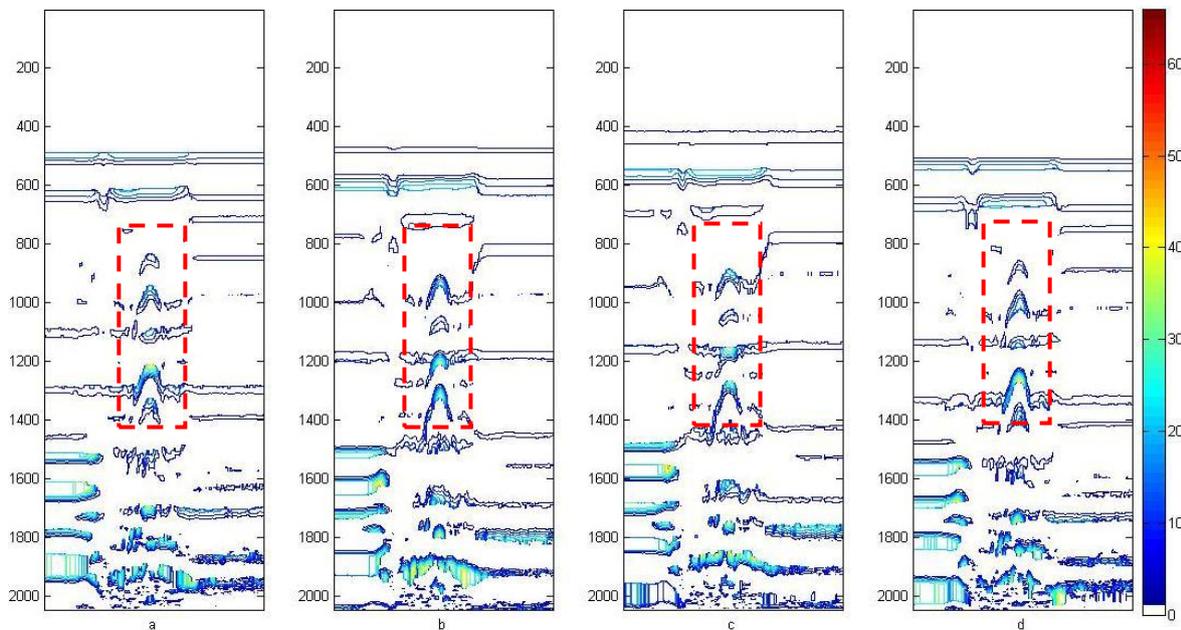


Figura 4.15. Posprocesamiento – Tubería Fib. Mapas de contornos – Ensayos en paralelo. a). T3. b). T5. c). T9. d). T12.

En la Figura 4.15 se puede observar la mejor marcación de las características de la tubería con respecto a la Figura 4.6 (d); no obstante ya en esta figura se demarcaba. Sin embargo, el paso de la matriz en bruto por las matrices $T3$, $T5$, $T9$ y $T12$, incrementa la visualización de esta tubería, lo cual se evidencia en una mayor solidez en la conformación de las características propias, tal como las asíntotas de la hipérbola de la tubería en la imagen obtenida.

En la Figura 4.16, se presentan las matrices resultantes del procedimiento aplicado para la adición en el medio de tubería de Fundición.

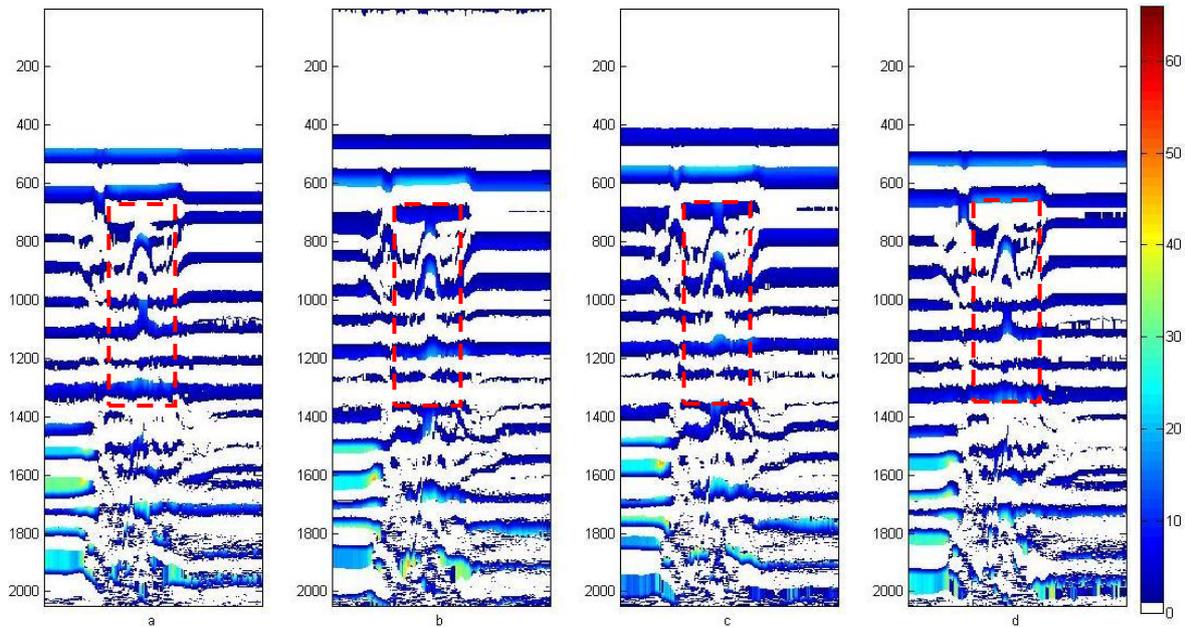


Figura 4.16. Posprocesamiento – Tubería Fund – Ensayos en Paralelo. a). $T3$. b). $T5$. c). $T9$. d). $T12$.

En la Figura 4.16, se puede observar marcación de dos características de la tubería en (b)-(c) y una sola en (a)-(d). De igual forma, se puede notar incremento de la intensidad del color con respecto a lo observado para PVC y PE (Figura 4.10 y Figura 4.12); la deformación en la parte superior de las características de la tubería es menor a la obtenida para el fibrocemento (Figura 4.14) y la amplitud de las hipérbolas mayor a las obtenidas en las imágenes anteriores.

En la Figura 4.17, se presenta el mapa de contornos de la Figura 4.16.

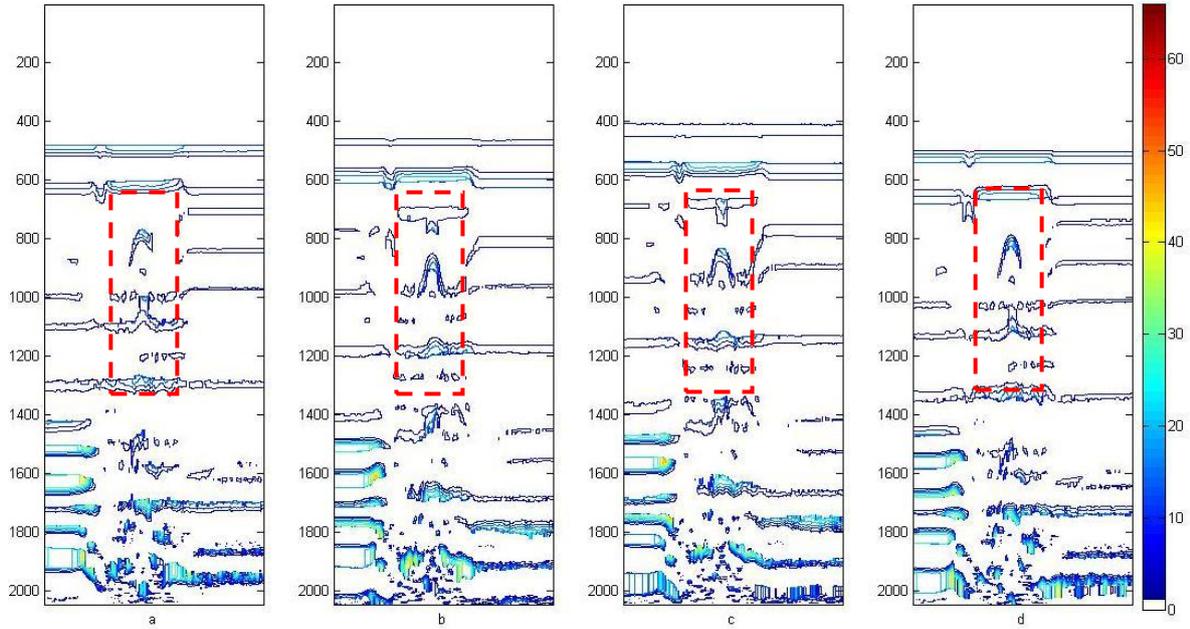


Figura 4.17. Posprocesamiento – Tubería Fund. Mapas de contornos – Ensayos en paralelo. a). T3. b). T5. c). T9. d). T12.

En la Figura 4.17, se observa mayor demarcación de las características de la tubería con respecto a lo observado en la Figura 4.6 (e).

En la Figura 4.18, se presentan las matrices resultantes del procedimiento aplicado para la adición en el medio de tubería de PE2.

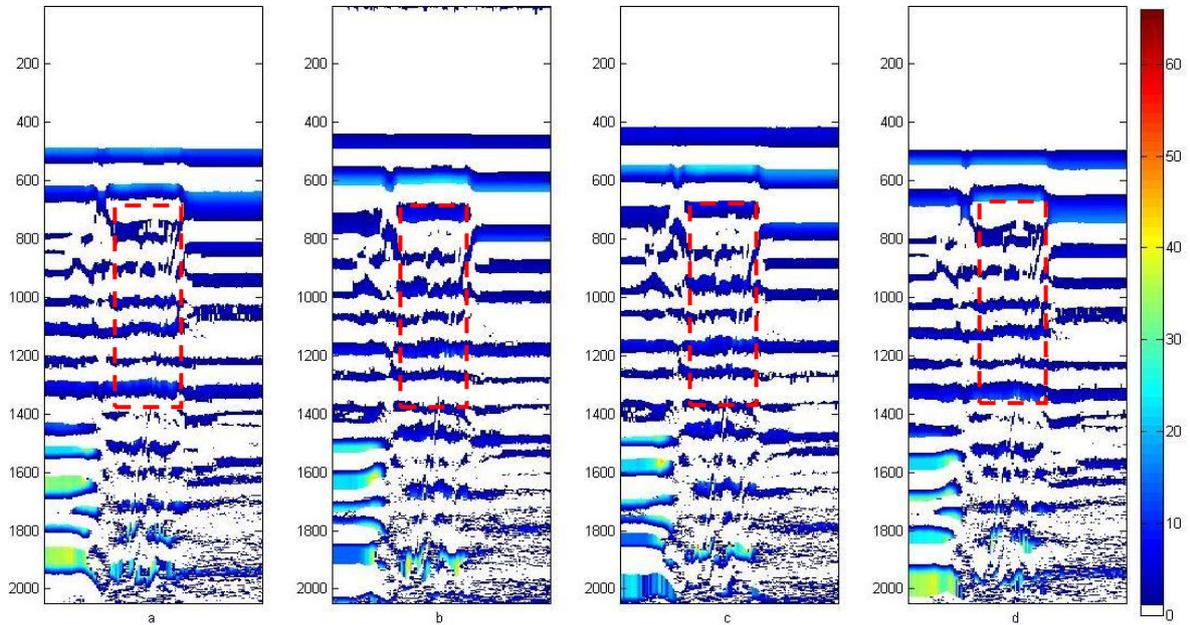


Figura 4.18. Posprocesamiento – Tubería PE2 – Ensayos en paralelo. a). T3. b). T5. c). T9. d). T12.

En la Figura 4.18, al igual que en la Figura 4.12, se observa dificultad en la diferenciación de la tubería adicionada en el medio. Sin embargo, se debe mencionar que las características son coincidentes al material y que al igual permite, tras el paso de la matriz en bruto por estas matrices, la visualización de la tubería de PE.

En la Figura 4.19, se presenta el mapa de contornos de la Figura 4.18.

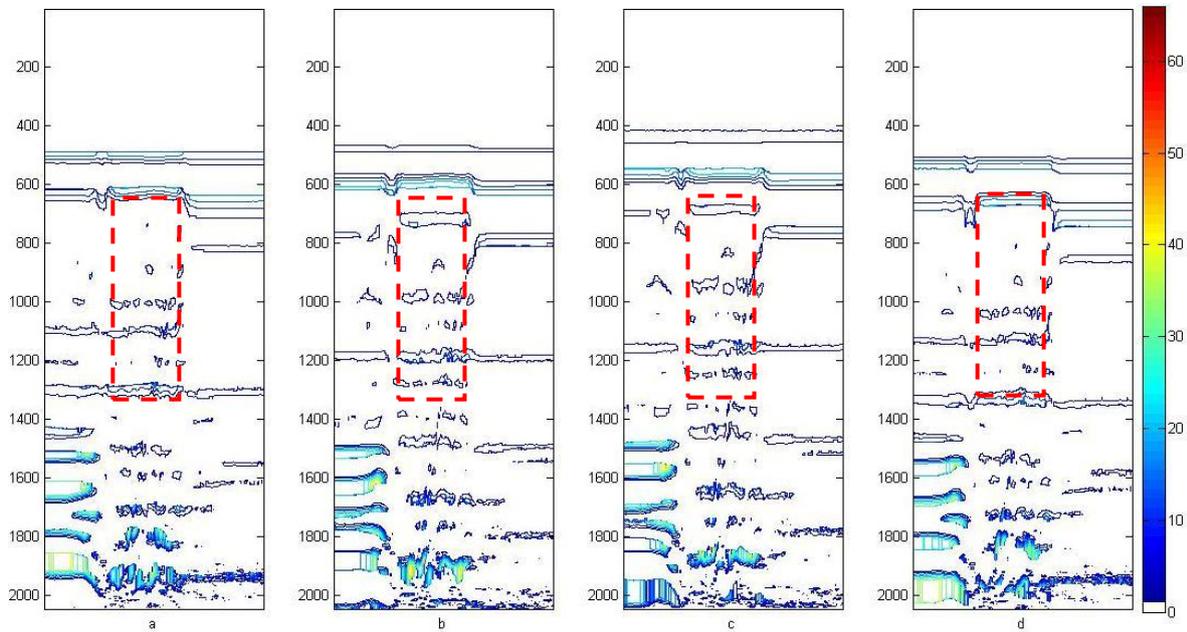


Figura 4.19. Posprocesamiento – Tuberías PE2. Mapas de Contornos – Ensayos en Paralelo. a). T3. b). T5. c). T9. d). T12.

En la Figura 4.19, al igual que en la Figura 4.13, se demarca el PE, diferenciándose de la Figura 4.6 (f), en la cual no se delimitaban sus contornos.

En la Figura 4.20, se presenta una primera clasificación de las tuberías enterradas sometidas a prospección en paralelo en este capítulo, la cual fue realizada tomando la máxima capa de las matrices T3, T5, T9 y T12, en donde se presentan características de cada una.

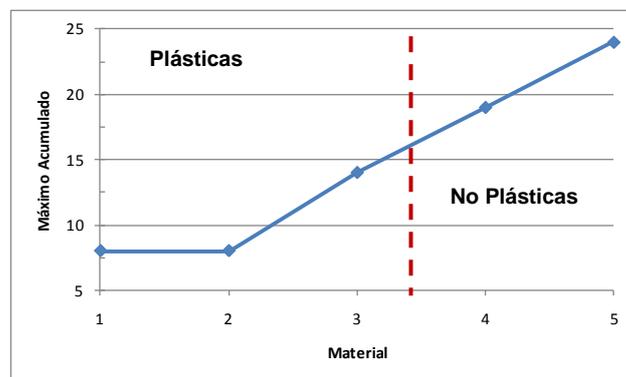


Figura 4.20. Clasificación por capa máxima presentada de las tuberías* - Ensayos en paralelo.

* Los materiales fueron numerados de la siguiente manera: 1.PE1, 2.PE2, 3.PVC, 4.Fund, 5.Fib.

En las figuras anteriores se puede observar de manera aproximada cómo la acumulación máxima (máxima capa) de datos varía dependiendo del material. Siendo el material que

presenta menor acumulación de datos el polietileno, avanzando de manera sustancial hasta el fibrocemento, con mayor cantidad de datos acumulados; se debe mencionar que la tubería de fibrocemento con su incrustación interior, puede influenciar la capa de presentación. Se observa también en esta figura cómo los diferentes materiales presentan marcadas separaciones entre sí, lo cual permite clasificarlos rápidamente.

4.4.2. Procesamiento por Matrices T3, T5, T9 y T12 – Ensayo en Simultáneo.

En este apartado se presentan y analizan los datos en forma de imágenes de los resultados de la prospección realizada, a su paso a través de las matrices T3, T5, T9 y T12. En la Figura 4.21, se presenta las matrices resultantes del procedimiento aplicado para la adición de todas las tuberías (PVC, PE1, Fib, Fund y PE2) en el medio de manera simultánea.

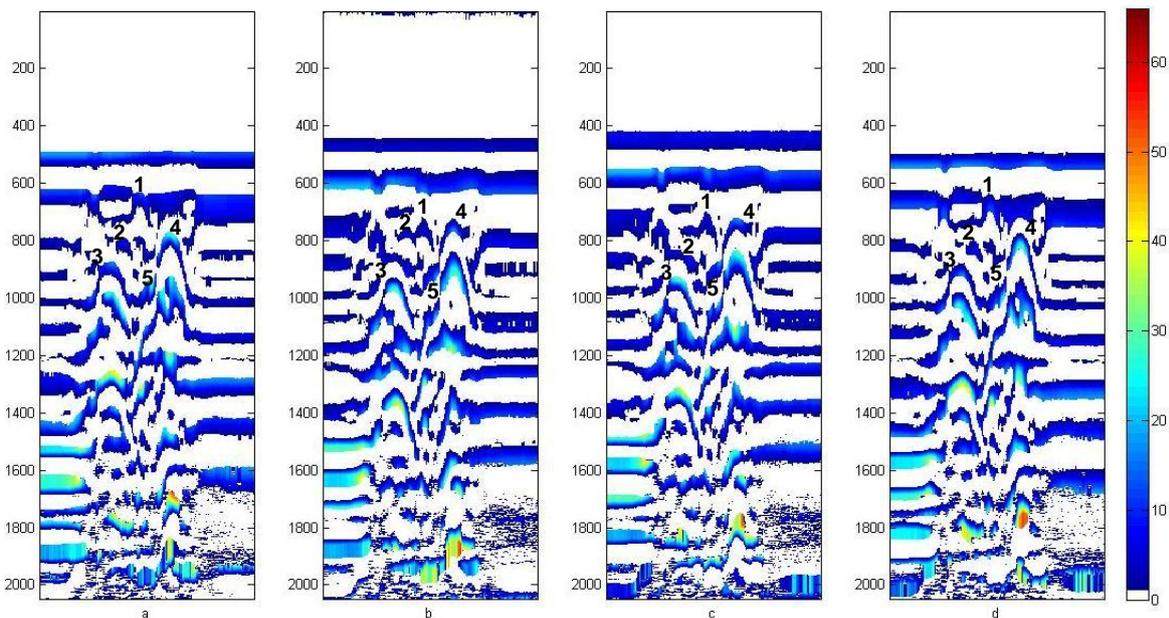


Figura 4.21. Posprocesamiento – Ensayos en simultáneo*. a). T3. b). T5. c). T9. d). T12.

* Los materiales fueron numerados de la siguiente manera: 1.PVC, 2.PE1, 3.Fib, 4.Fund, 5.PE2.

En la Figura 4.21, se puede observar la aparición de todas las tuberías adicionadas al medio, observándose entre las tuberías plásticas marcada diferenciación de la intensidad de color, siendo las mejor demarcadas las no plásticas. Se puede mencionar que para las tuberías plásticas se presenta dificultad para diferenciarlas del medio. De igual manera se visualiza mejor marcación de las tuberías plásticas, en comparación con las imágenes de los datos en bruto (Figura 4.7 (a)). Por otra parte, para las tuberías no plásticas se presenta mejor demarcación de las características, así como conformación de mayor solidez en comparación con lo observado en la Figura 4.7 (a).

En la Figura 4.22, se presenta los mapas de contornos de la Figura 4.21.

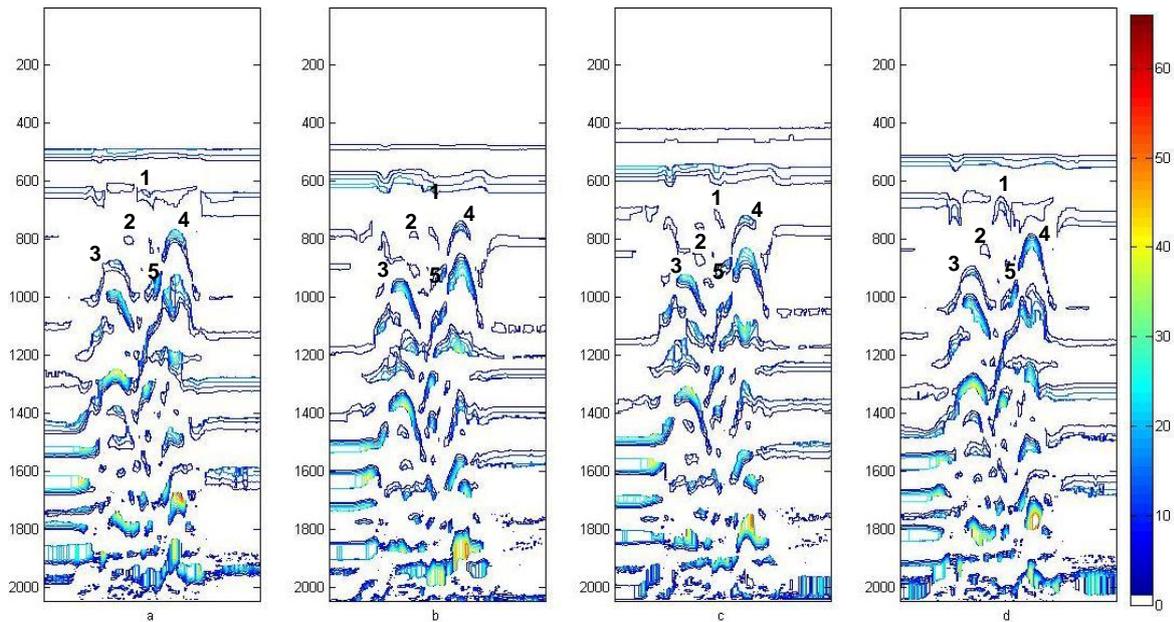


Figura 4.22. Posprocesamiento – Mapas de contornos – Ensayos en simultáneo. a). T3. b). T5. c). T9. d). T12.

* Los materiales fueron numerados de la siguiente manera: 1.PVC, 2.PE1, 3.Fib, 4.Fund, 5.PE2.

En la Figura 4.22 se puede observar en los contornos mejor marcación de los límites de las tuberías adicionadas en comparación con lo obtenido para los datos en bruto (Figura 4.7 (b)). De igual manera, aunque se presenta mejora en la visualización de PE, su visualización no es inmediata.

En la Figura 4.23 se presenta una primera clasificación de las tuberías enterradas sometidas a prospección en simultáneo en este capítulo, la cual fue realizada tomando la máxima capa de las matrices T3, T5, T9 y T12, en donde se presentan características de cada una.

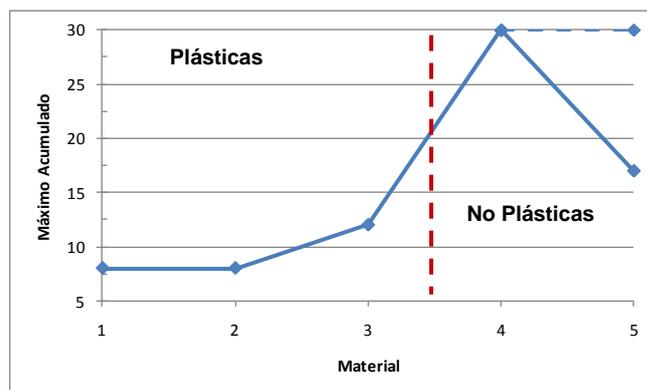


Figura 4.23. Clasificación por capa máxima presentada de las tuberías* - Ensayo en simultáneo.

* Los materiales fueron numerados de la siguiente manera: 1.PE1, 2.PE2, 3.PVC, 4.Fund, 5.Fib.

En la Figura 4.23, se puede observar cómo las tuberías plásticas adicionadas (PVC, PE1, PE2), en contraste con las que no lo son (Fib y Fund), presentan diferencia marcada entre sí en la aparición máxima de capas acumuladas. Se puede observar de igual manera en esta figura cómo hemos demarcado para la tubería de fibrocemento dos puntos; esta diferenciación se ha realizado debido a la marcada separación que la misma presenta en la aparición de sus hipérbolas; se asume que esta diferencia se presenta debido al material

adicional que presenta esta tubería en su interior (incrustación), debido a que la primera hipérbola que presenta el valor de acumulación de capas menor, se encuentra por encima (en posición), de la hipérbola de mayor valor de capas acumuladas.

Al comparar la Figura 4.23 con la Figura 4.20, se observa cómo las tuberías plásticas (PVC, PE1, PE2), presentan una semejante aparición en la acumulación de capas (para cada material), a pesar de variarse las alturas a las cuales fueron introducidas y para el material de tubería Fundición.

Después del paso de los datos resultantes de las prospecciones realizadas de tuberías enterradas en las configuraciones planteadas a través de las matrices *T3*, *T5*, *T9* y *T12*, se puede decir que:

- **PVC.** Presenta mejoramiento en la visualización de la imagen y una mayor cantidad de las características propias del paso de la señal a través de la misma, al compararlo con los datos en bruto.
- **PE1 y PE2.** Permite la visualización de este tipo de material, presentando mejor demarcación de la misma al compararlos con los datos en bruto.
- **Fib. y Fund.** Mejora la visualización de las características propias de la imagen, tal como las asíntotas, y presenta mayor solidez en la imagen de la tubería.

A modo de conclusión del apartado, se puede decir que:

- Al aplicar este procedimiento aparece una mejora significativa en la presentación visual de las reflexiones de las tuberías, resultado del paso de la señal a través de las mismas, siendo demarcadas sus características en estas matrices, las cuales contienen todos los datos obtenidos de la prospección sin alteración.
- Se puede denotar también aquí la diferencia marcada en tuberías plásticas (PVC, PE1 y PE2) y las que no lo son (Fibro cemento y Fundición), resaltándose estas últimas con mayor intensidad, lo cual se ve reflejado en las capas máximas donde son presentadas.
- Esta metodología permite generar una primera clasificación de los datos de manera visual, separando las tuberías muy reflexivas de las que lo son débilmente.
- Se puede decir de la tubería de Fibro cemento que la incrustación que presenta en su interior altera de manera significativa las características presentadas de la misma, lo cual abre la posibilidad a la exploración de materiales al interior de las tuberías.

4.5. Posprocesamiento. Análisis Mediante Matrices T14 y T15 – Ensayos en Tuberías Enterradas

En el presente apartado se presentan los resultados del posprocesamiento, por medio de los procedimientos presentados en capítulo 3, de las imágenes en bruto resultado de las prospecciones realizadas, empleando las matrices *T14* y *T15*.

4.5.1. Procesamiento por Matrices T14 y T15 – Ensayos en Paralelo.

Después de emplear el procedimiento explicado anteriormente, a continuación se presentan las imágenes resultados con sus respectivos mapas de contornos; las imágenes presentadas, corresponden a: imagen de referencia, PVC, PE1, Fib, Fund y PE2. Los resultados obtenidos en la referencia, son presentados a manera de comparación y no serán analizados. A continuación en la Figura 4.24 se presenta la imagen de referencia.

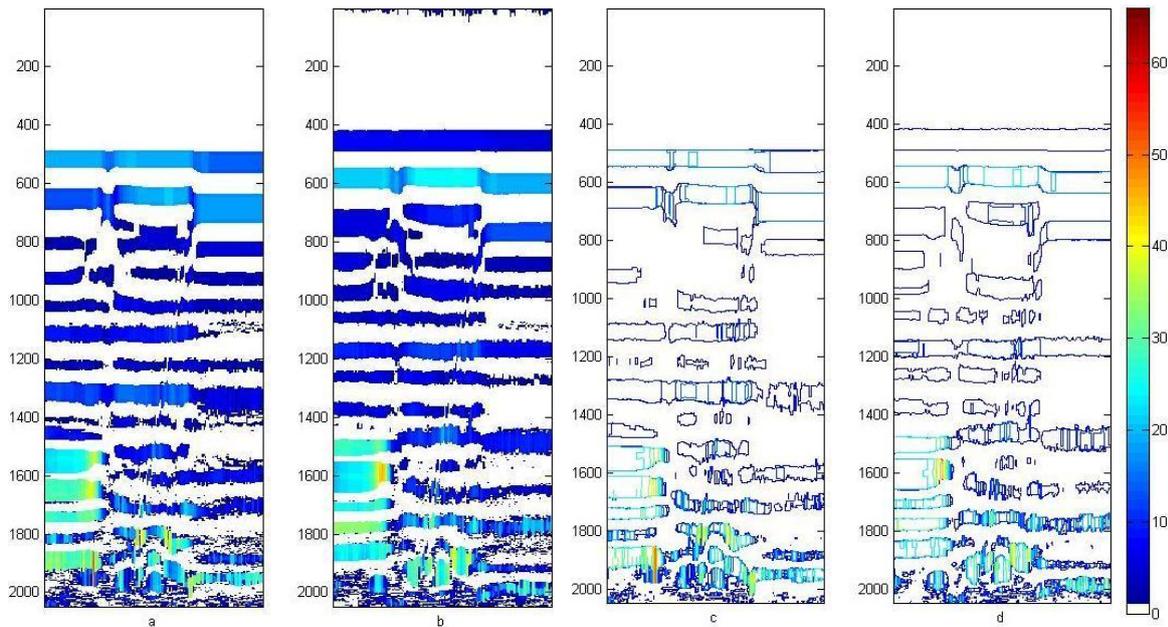


Figura 4.24. Posprocesamiento – Imagen de referencia – Ensayos en paralelo. a). T14. b). T15. c). T14 Mapa de contornos. d). T15 Mapa de contornos.

En la Figura 4.25 se presentan las matrices resultantes del procedimiento aplicado para la adición en el medio de tubería de PVC.

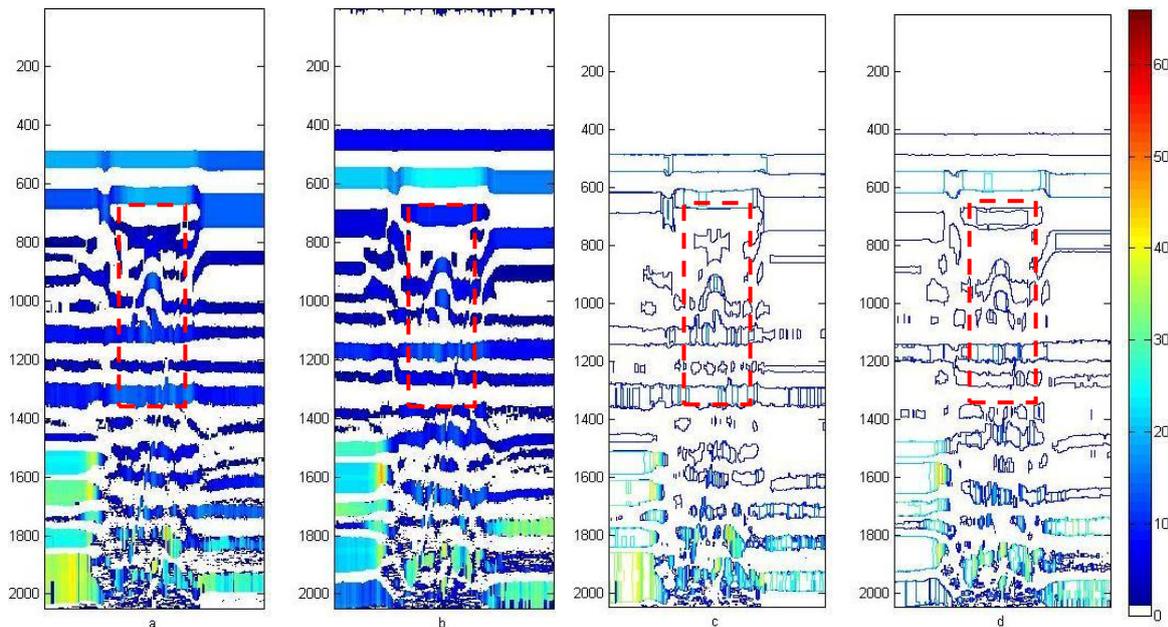


Figura 4.25. Posprocesamiento – Tubería PVC – Ensayos en paralelo. a). T14. b). T15. c). T14 Mapa de contorno. d). T15 Mapas de contorno.

En la Figura 4.25, se marca con mayor claridad la tubería de PVC adicionada al medio. En su mapa de contornos, al compararlo con la Figura 4.11, se obtiene una mayor consolidación de las características de la tubería. Se puede observar de igual manera mayor intensidad del color en la parte central, lo cual es resultado de mayor acumulación de datos en esta parte, debido a la amplitud de onda determinada por el material de la tubería. Se puede notar también cómo la figura en la parte (b) presenta las características de la parte superior de la tubería, en tanto que la parte (a) las características de la parte inferior.

En la Figura 4.26, se presentan las matrices resultantes del procedimiento aplicado para la adición en el medio de tubería de PE1.

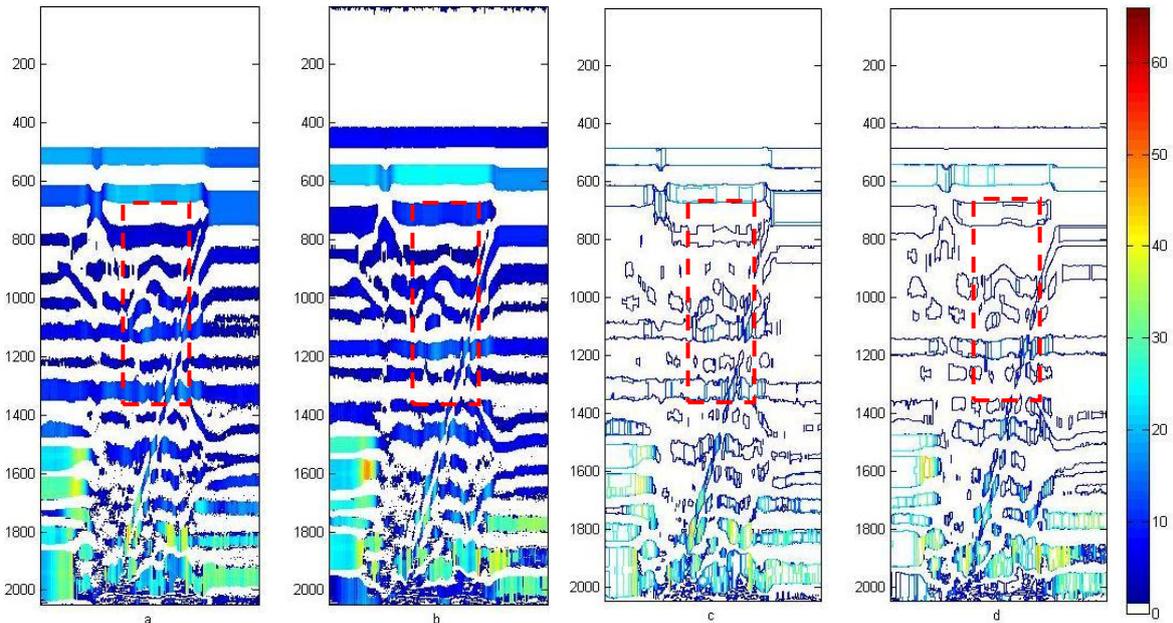


Figura 4.26. Posprocesamiento – Tubería PE1 – Ensayos en Paralelo. a). T14. b). T15. c). T14 Mapa de Contornos. d). T15 Mapas de Contornos.

En la Figura 4.26, se puede observar la adición de la tubería de PE con mayor claridad, demarcándose con mayor claridad los límites de las características de la tubería. También se puede observar mejoras sustanciales en la visualización de las características de la tubería. Se puede visualizar también que la intensidad del color ha incrementado, extendiéndose y formando una figura mucho más sólida que la obtenida en la Figura 4.12. Finalmente, se nota que la tubería se encuentra demarcada principalmente en las parte (b) y (d) de la figura.

En la Figura 4.27, se presentan las matrices resultantes del procedimiento aplicado para la adición en el medio de tubería de Fibrocemento.

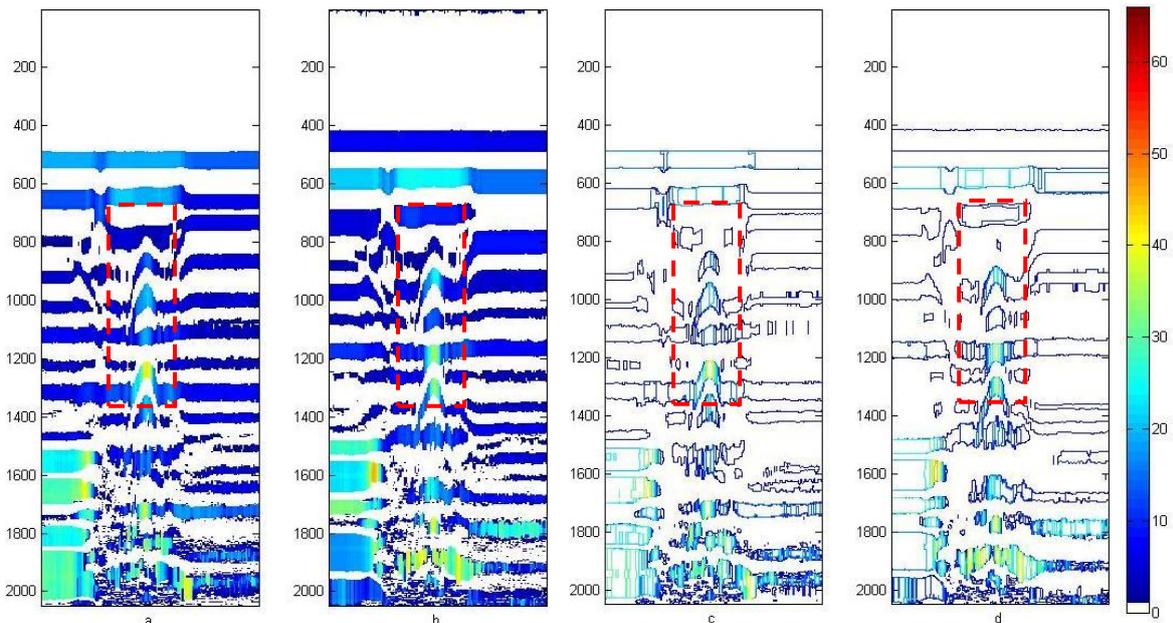


Figura 4.27. Posprocesamiento – Tubería Fib – Ensayos en paralelo. a). T14. b). T15. c). T14 Mapas de contornos. d). T15 Mapas de contornos.

En la Figura 4.27, se encuentra demarcada claramente la tubería adicionada. De igual manera a la tubería de PVC, se observa mayor acumulación de datos de las características de la tubería en la parte central de la misma. Puede observarse que dos partes de las características de la tubería se encuentran situadas en las partes (a) y (c) de la figura, y la parte central de las características se presentan en (b) y (d).

En la Figura 4.28, se presentan las matrices resultantes del procedimiento aplicado para la adición en el medio de tubería de Fundición.

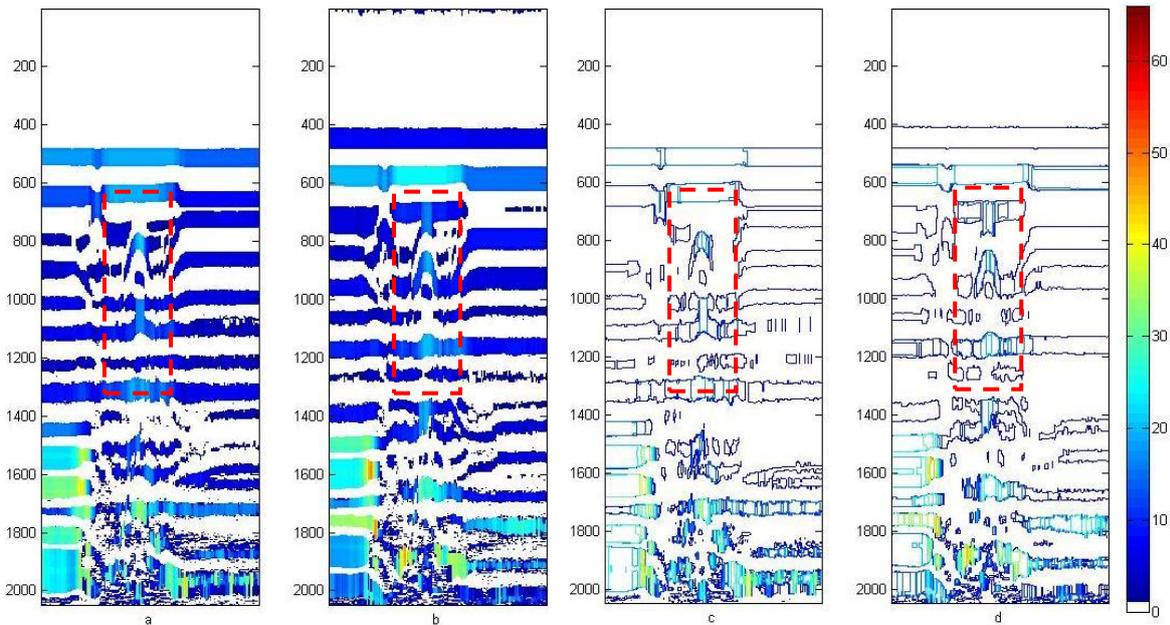


Figura 4.28. Posprocesamiento – Tubería Fund – Ensayos en paralelo. a). T14. b). T15. c). T14 Mapas de contornos. d). T15 Mapas de contornos.

En la Figura 4.28, se demarca con mayor intensidad la imagen observándose dos partes con características de la tubería en las partes (b) y (d) de la figura, y la parte central de las características de la tubería en la parte (a) de la figura. Aquí se visualiza cómo la extensión de las asíntotas de la parábola se hace mucho mayor a la presentada en las gráficas anteriores de este procedimiento.

En la Figura 4.29, se presentan las matrices resultantes del procedimiento aplicado para la adición en el medio de tubería de PE2.

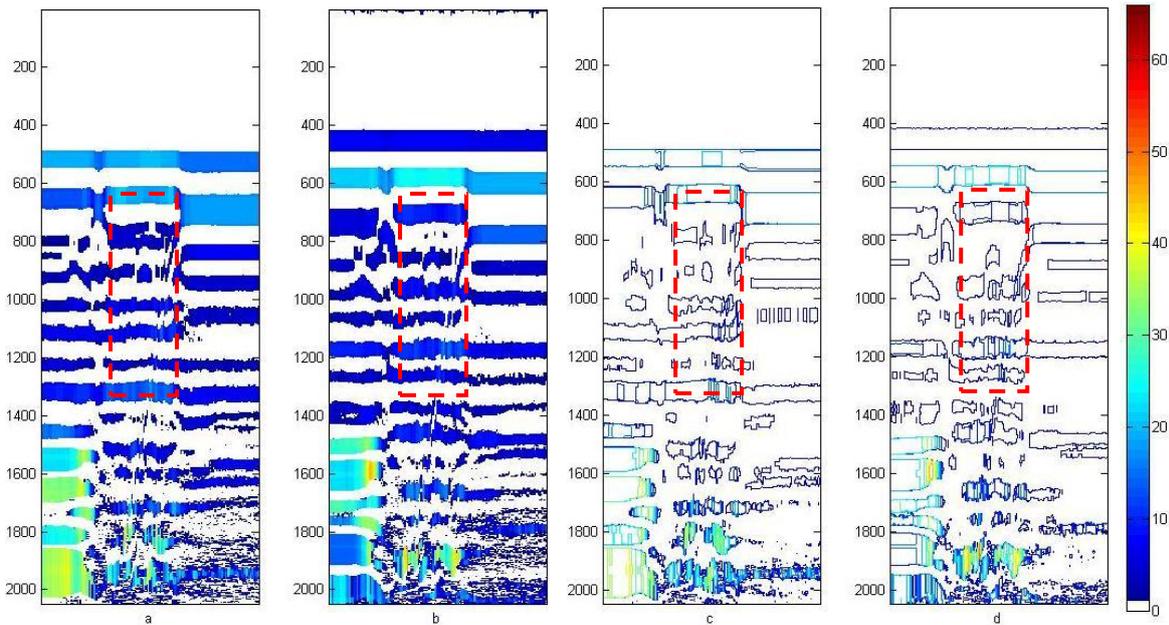


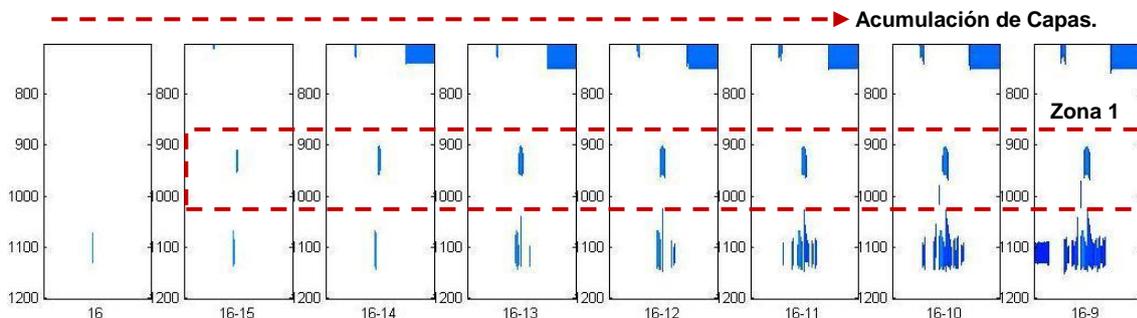
Figura 4.29. Posprocesamiento – Tubería PE2 – Ensayos en Paralelo. a). $T14$. b). $T15$. c). $T14$ Mapa de Contornos. d). $T15$ Mapa de Contornos.

En la Figura 4.29, al igual que en la Figura 4.26, se observa la mejora sustancial de la visualización de las características del PE, siendo coincidentes entre sí.

A continuación se presenta cada una de las imágenes anteriores en un análisis capa por capa, tratando de observar de mejor manera las características de cada una de las tuberías en material de propagación suelo, tras la aplicación del procedimiento planteado. Para este análisis, se tomó solo la parte de la tubería comprendida entre los datos 700 y 1200, por notarse que en este punto se exhiben las características de las tuberías adicionales. La acumulación de las capas comenzó a realizarse a partir de la capa en la cual se observaron características y fueron siendo acumuladas una a una las capas menores hasta conformar por completo de nuevo las matrices $T14$ y $T15$, lo cual se presenta a continuación para cada uno de los materiales enterrados de manera paralela.

PVC

En la Figura 4.30, se presenta la separación por capas de la matriz $T14$ y su respectiva acumulación para la tubería enterrada de PVC.



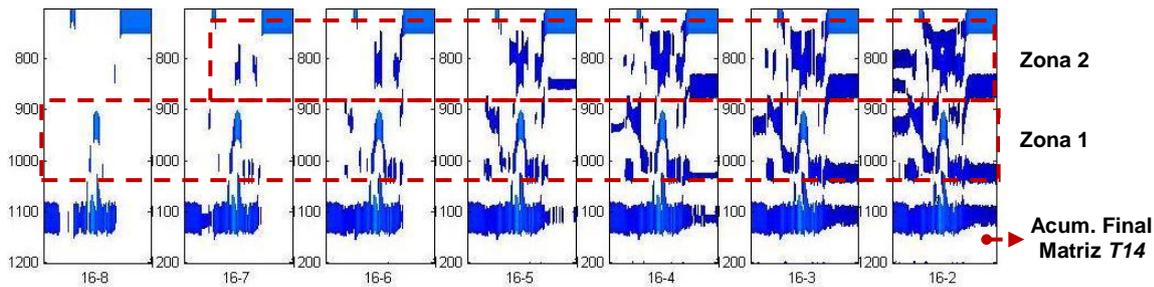


Figura 4.30. Acumulación de capas para T_{14} en PVC, entre los datos 700 y 1200 – Ensayos en paralelo.

En la Figura 4.30, se puede observar en la zona 1, cómo la hipérbola de características de la tubería de PVC comienza a mostrarse en la capa 15, iniciando por la parte central de la hipérbola de características de la tubería y expandiéndose a sus extremos, siendo casi formada en su totalidad esta parte central hasta la capa 9. A partir de la capa 8, se puede observar la demarcación de las asíntotas de la parábola, las cuales se desarrollan a plenitud hasta la capa 3. A partir de la capa 7, para esta misma figura en la zona 2, se puede observar la formación de la hipérbola que se encuentra posicionada en la parte superior; esta forma presenta su desarrollo hasta la capa 2.

En la Figura 4.31, se presenta la separación por capas de la matriz T_{15} y su respectiva acumulación para la tubería de PVC enterrada.

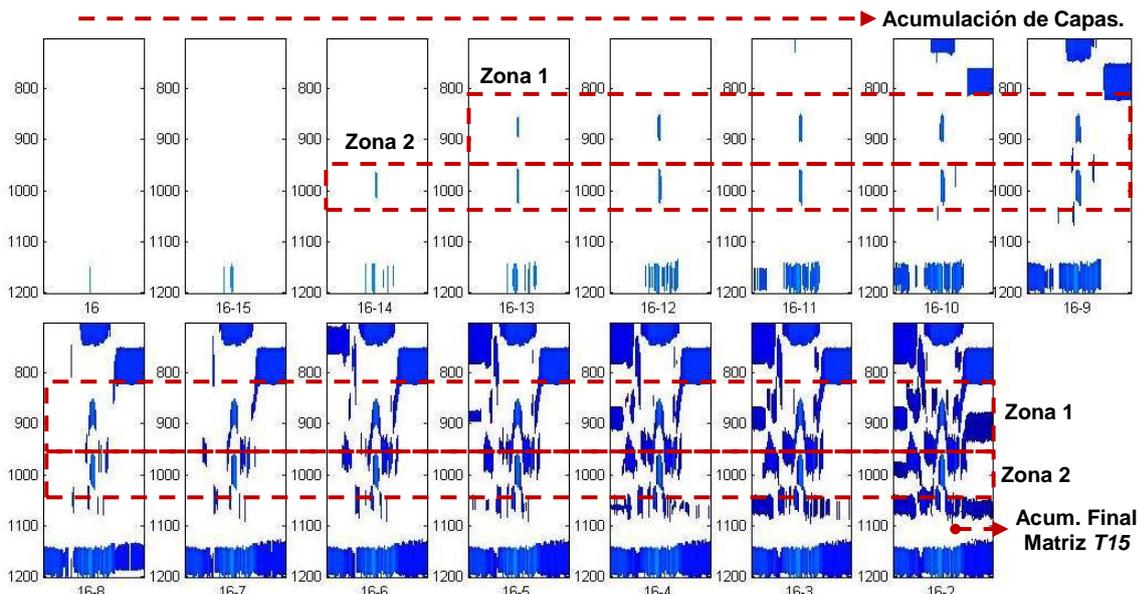


Figura 4.31. Acumulación de capas para T_{15} en PVC, entre los datos 700 y 1200 – Ensayos en paralelo.

En la Figura 4.31 zona 1, se puede observar el desarrollo de la otra parte de la hipérbola de características de la tubería adicionada, comprendida entre las zonas 1 y 2 de la Figura 4.30, observándose cómo la misma comienza a formarse en su parte central a partir de la capa 13, completando su desarrollo en la capa 9. Se observa además, cómo a partir de la capa 8 comienza la formación de asíntotas de la hipérbola, hasta presentarse un completo desarrollo en la capa 5. En la zona 2 de esta figura, se puede observar de igual manera la formación de una hipérbola, cogida por la parte inferior de la imagen generada en la zona 1 de la Figura 4.30. Esta forma presenta su inicio en la capa 14 con formación casi completa hasta la capa 9; se puede observar de igual manera cómo para esta figura no se presenta la formación de asíntotas, ya que los lados de la misma son contenidos en su totalidad por las asíntotas formadas en la zona 1 en la capa 8 de la Figura 4.30.

PE1

En la Figura 4.32, se presenta la separación por capas de la matriz $T14$ y su respectiva acumulación para la tubería PE1 enterrada.

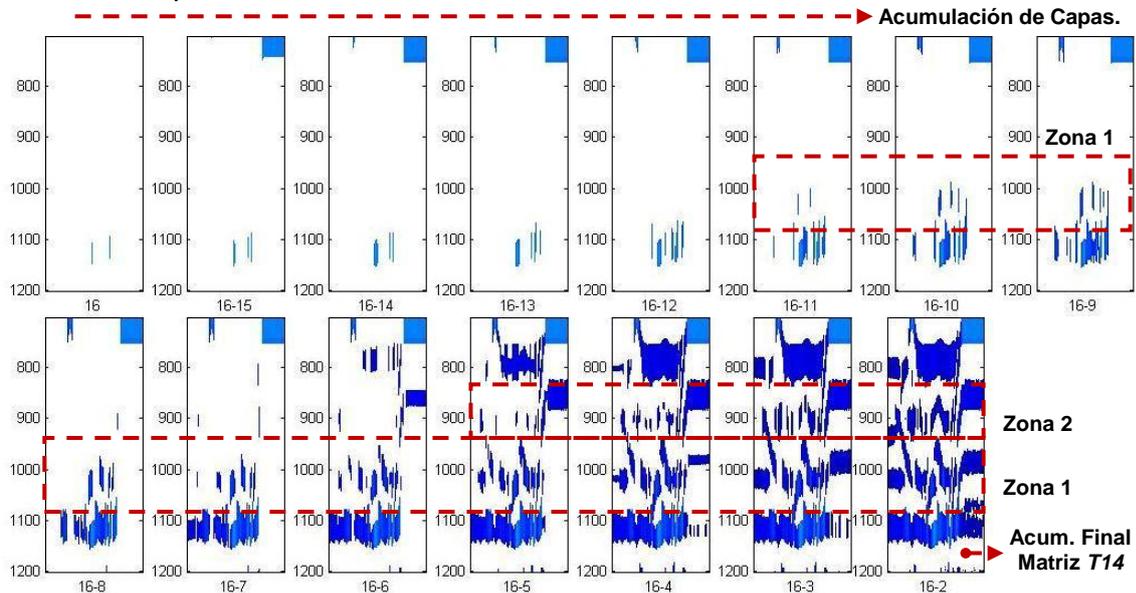


Figura 4.32. Acumulación de capas para $T14$ en PE1, entre los datos 700 y 1200 – Ensayos en paralelo.

En la Figura 4.32 en la zona 1, se puede observar el inicio de las características de la tubería adicionada en la capa 6, con un desarrollo hasta la capa 5, la cual presenta la misma forma, sin asíntotas, presentada en la Figura 4.31 zona 2. Esta forma presenta la misma dinámica de formación, analizado anteriormente, partiendo del punto central hacia sus extremos.

En la zona 2 de la Figura 4.32, se observa la formación del eje central de la hipérbola de características de la tubería, con un punto de inicio en la capa 4, la cual presenta un desarrollo muy rápido, formándose hasta la capa 3, se observa la aparición de las asíntotas en la capa 2, que se empalman inmediatamente con las formaciones exteriores demarcadas desde la capa 5.

En la Figura 4.33, se presenta la separación por capas de la matriz $T15$ y su respectiva acumulación para la tubería enterrada PE1.

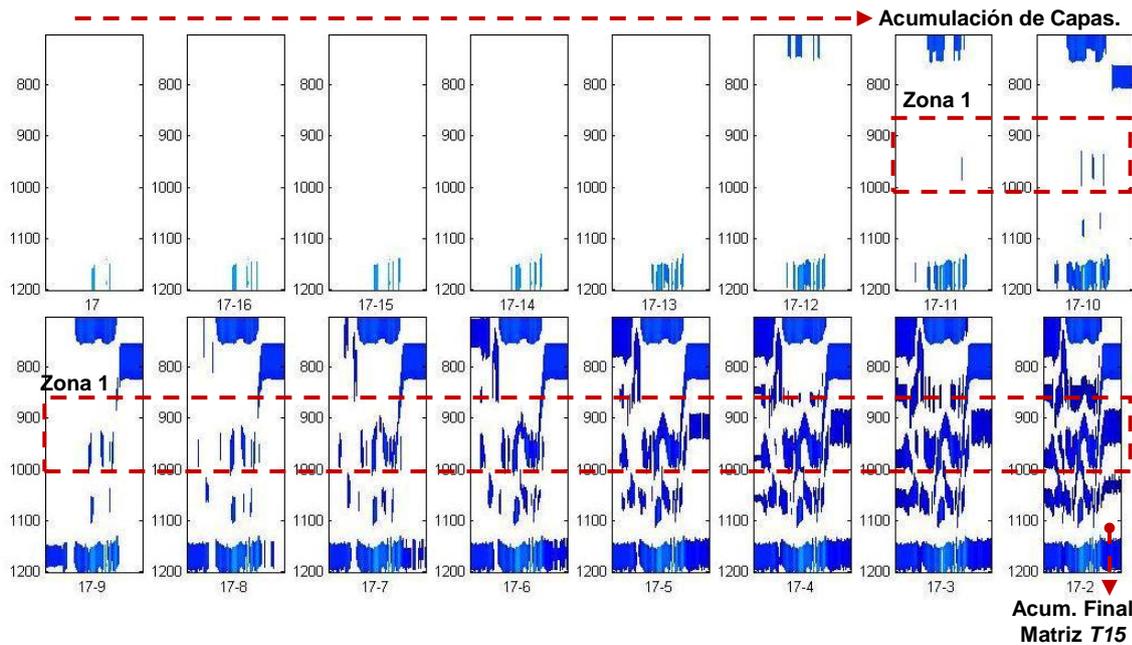


Figura 4.33. Acumulación de capas para *T15* en PE1, entre los datos 700 y 1200 – Ensayos en paralelo.

En la zona 1 de la Figura 4.33, se puede observar el inicio de la parte central mencionado en las figuras anteriores, la cual comienza su demarcación en la capa 7 con un desarrollo hasta 6. De igual manera, puede percibirse la formación de las asíntotas entre las capas 6 y 5, las cuales se unen con la formación que se da del entorno desde la capa 11; se observa también, cómo esta forma presentada es acogida por la parte inferior de la forma demarcada en la zona 2 de la Figura 4.32 y por la forma en su parte superior observada en la zona 1 de esta misma figura.

En este material se puede corroborar, como ya se venía asumiendo desde figuras anteriores, que la reflexión o respuesta en amplitud que demarca el material de esta tubería es tan pequeña en comparación con los otros materiales de tubería adicionales, que su análisis se hace un poco complejo. Se puede notar que los desarrollos de la tubería en las diferentes capas conservan los mismos principios presentados en las figuras para el material PVC (Figura 4.30 y Figura 4.31), partiendo desde su parte central hasta desarrollarse completamente, y una posterior formación de asíntotas. Sin embargo, el desarrollo para esta figura es muy rápido, lo cual refleja una baja amplitud o unas bajas características de propagación de las ondas en este tipo de material, de lo cual posiblemente deberían discretizarse de manera más exhaustiva las capas a fin de visualizar mejor las características propias de este material de tubería.

Fib

En la Figura 4.34, se presenta la separación por capas de la matriz *T14* y su respectiva acumulación para la tubería de fibrocemento enterrada.

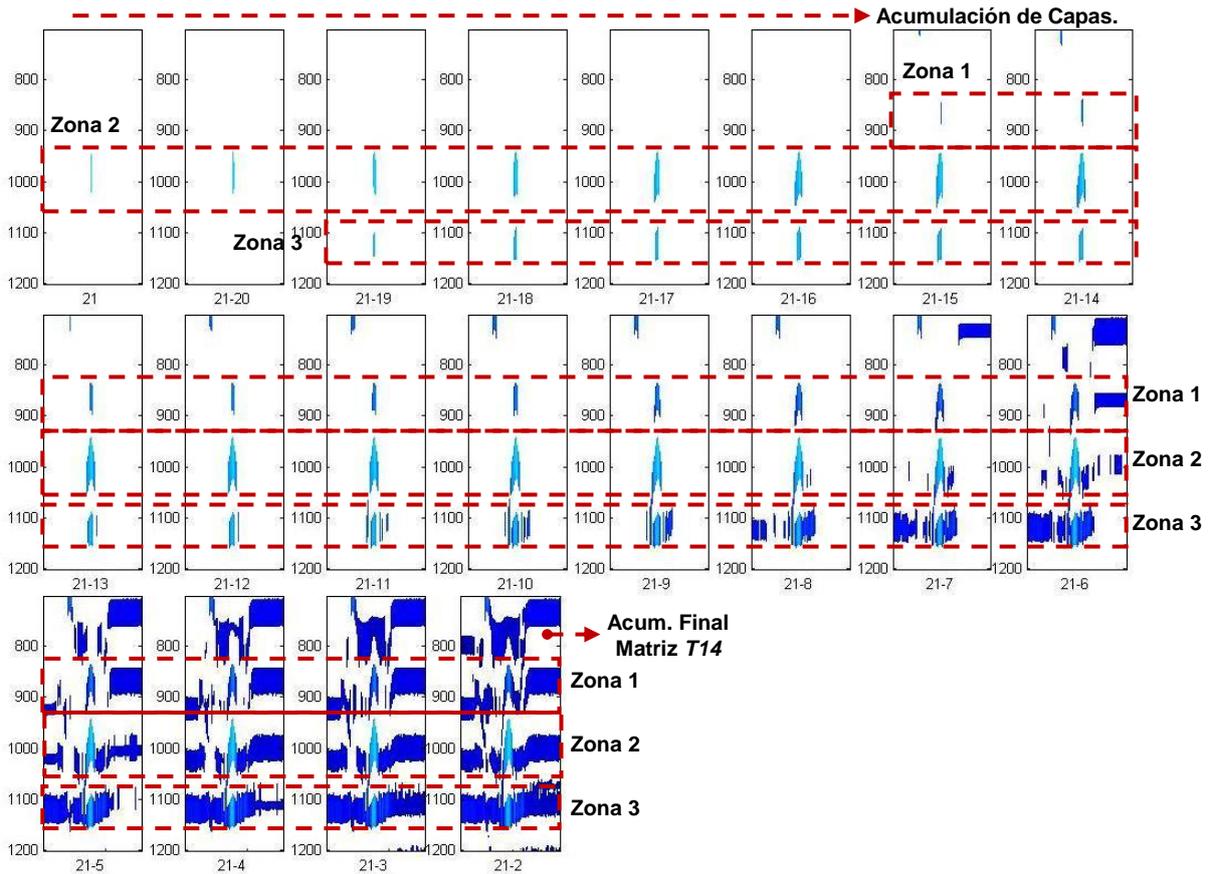


Figura 4.34. Acumulación de capas para *T14* en Fib, entre los Datos 700 y 1200 – Ensayos en paralelo.

En la Figura 4.34 zona 1, se observa las mismas características de formación de las hipérbolas que los otros materiales empleados. Observándose formación de su parte central hacia sus extremos, esta parte central en este caso tiene su punto de inicio en la capa 15, con acumulación hasta la capa 10, con un inicio de formación de las asíntotas de la hipérbola entre las capas 9 y 3.

Para la zona 2 de esta misma figura, se observa una formación igual que la forma presentada en la Figura 4.31 en su zona 2. Debido a la no presencia de una marcada formación de asíntotas, el inicio de esta formación tiene su inicio en la capa 21, desarrollándose completamente hasta la capa 13.

En la zona 3, se observa el inicio de una forma en la capa 19, la cual presenta su desarrollo hasta la capa 14; se observa de igual manera a la zona 2, la cual no presenta desarrollo de las asíntotas.

En la Figura 4.35, se presenta la separación por capas de la matriz *T15* y su respectiva acumulación para la tubería enterrada de Fibrocemento.

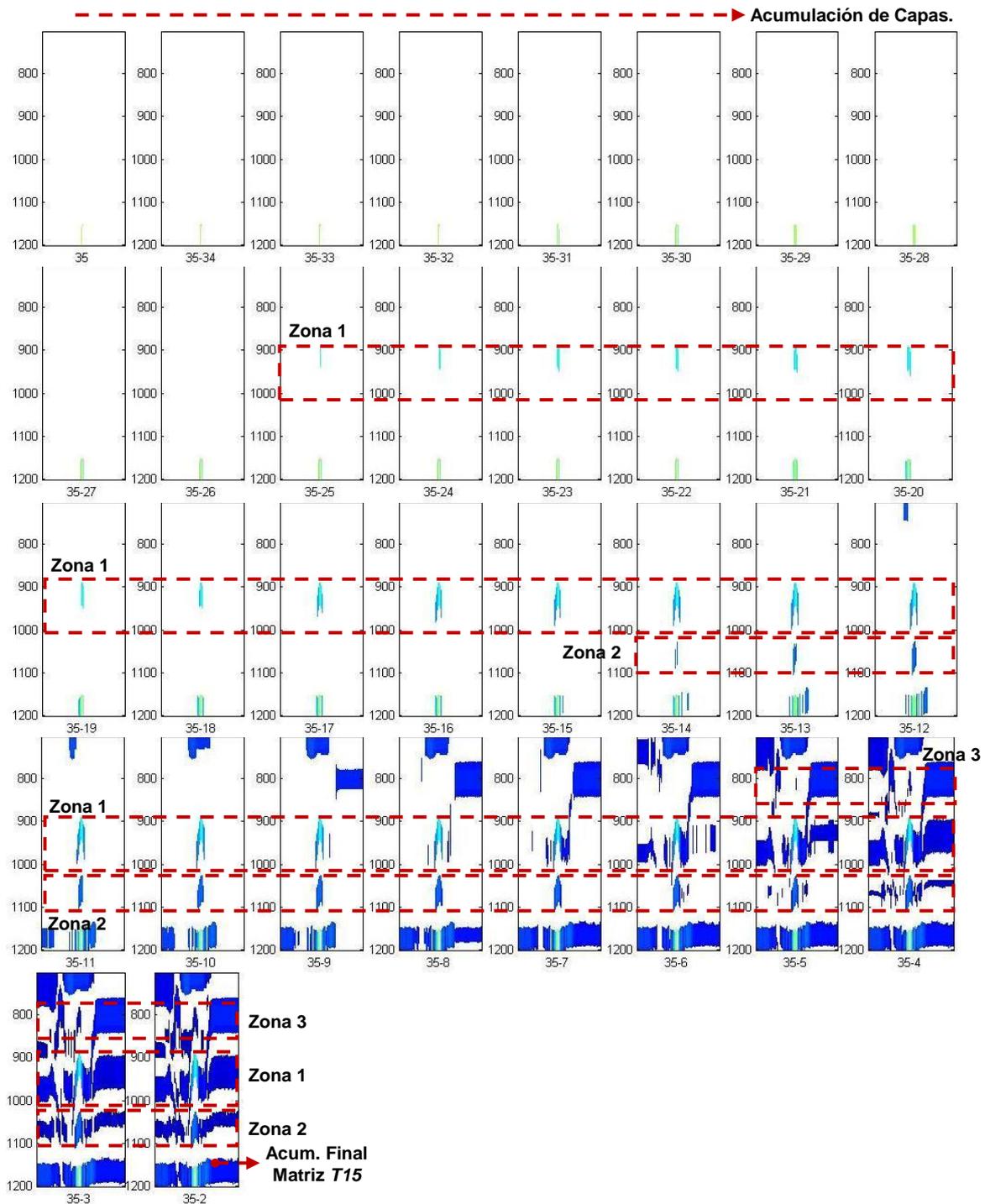


Figura 4.35. Acumulación de capas para $T15$ en Fib, entre los datos 700 y 1200 – Ensayos en paralelo.

En la Figura 4.35, se puede observar en la zona 1 el inicio de una formación de la hipérbola de características de la tubería adicionada, la cual presenta el inicio de la parte central en la capa 25 y cuyo fin del desarrollo de la misma se presenta en la capa 19. Se puede notar también el inicio del desarrollo de asíntotas en la capa 18 hasta desarrollarse en su totalidad en la capa 9. Esta forma se encuentra contenida entre la parte inferior de la forma presentada en la Figura 4.34 zona 1 y la parte superior de la zona 2 de esta misma figura.

En la zona 2 de esta figura, puede observarse la demarcación de otra parte de esta tubería, la cual no presenta formación de asíntotas, tiene su inicio en la capa 14 y se desarrolla de

manera completa hasta la capa 9. Esta forma se encuentra acogida por la parte inferior de la forma presentada en la zona 2 de la Figura 4.34.

En la zona 3 de esta figura, se observa la formación de otra de las características de la tubería adicionada, la cual presenta inicio en la capa 5 con un desarrollo hasta la capa 3; esta figura acoge la forma presentada en la Figura 4.34 en la zona 1.

Para esta tubería en particular se debe mencionar que la misma presenta la particularidad de obtener incrustación, lo cual la diferencia de los otros materiales de tubería adicionados, debido a que en las otras tuberías se presentan las interfaces suelo-tubería-aire y en esta se presenta una fase adicional, siendo para la misma suelo-tubería-incrustación-aire, lo cual se ve demarcado en las diferentes características adicionales que se presentan, tal es el caso de la cantidad de hipérbolas que se presentan, esto debido a que el material de la incrustación presenta otras propiedades diferentes a las del material de la tubería, lo cual posibilita la detección de materiales diferentes a la tubería, contenidos en la misma, tal como el agua, para la clasificación de imágenes de GPR, para sistemas de abastecimiento.

Fund

En la Figura 4.36, se presenta la separación por capas de la matriz *T14* y su respectiva acumulación para la tubería de fundición enterrada.

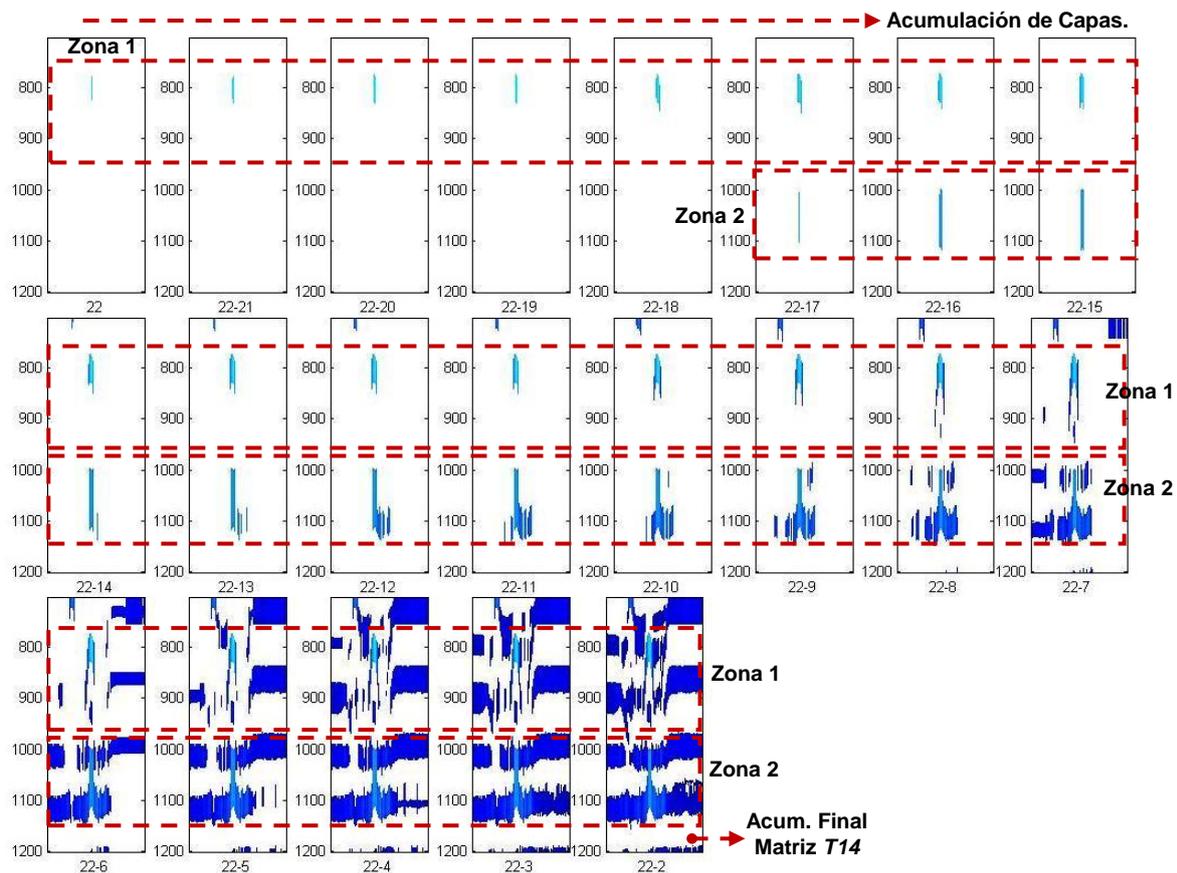


Figura 4.36. Acumulación de capas para *T14* en Fund, entre los datos 700 y 1200 – Ensayos en paralelo.

En la Figura 4.36 en la zona 1, se puede observar las mismas características en las cuales se ha insistido en las figuras anteriores de la formación de las características de la tubería desde su parte central hacia sus extremos; esta tubería adicionada presenta el inicio de su parte central en la capa 22, con un desarrollo hasta la capa 15; se nota también que la misma presenta formación de asíntotas demarcadas, en este caso en la capa 14 con un desarrollo hasta la capa 7. Se puede observar también en la zona 1, una formación sin asíntotas que tiene su formación entre las capas 8 y 5.

En esta figura, a diferencia de las anteriores, se observa para la zona 2 una formación de carácter vertical, la cual presenta su inicio en la capa 17 y un desarrollo completo hasta la capa 14.

En la Figura 4.37, se presenta la separación por capas de la matriz $T15$ y su respectiva acumulación para la tubería de fundición enterrada.

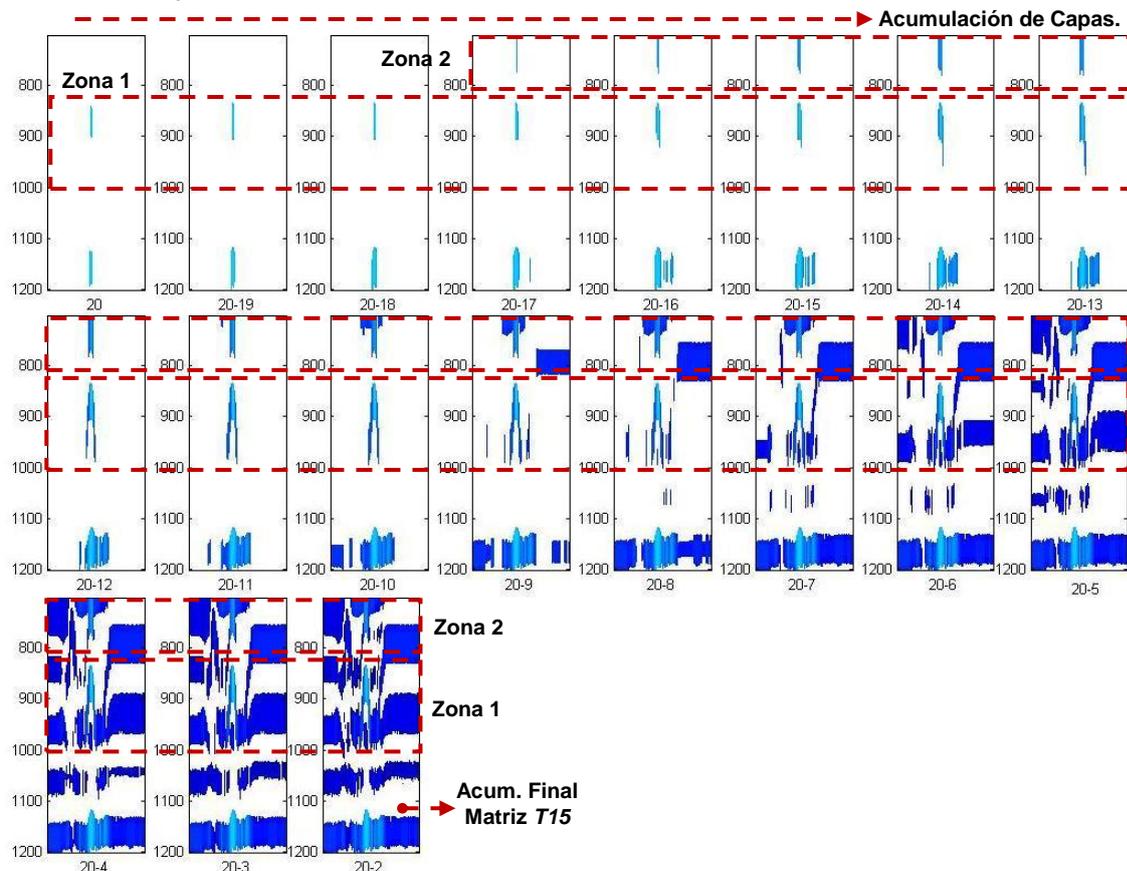


Figura 4.37. Acumulación de capas para $T15$ en Fund con material de propagación suelo entre los datos 700 y 1200.

La Figura 4.37 en su zona 1, presenta dos particularidades; en primera instancia, presenta una primera figura inicial que muestra las mismas características de inicio de la parte central de la hipérbola de características de la tubería adicionada, la cual se demarca en la capa 20 y tiene su desarrollo hasta la capa 16, con un formación de asíntotas a sus costados con un desarrollo desde la capa 15 hasta la capa 9. Se puede notar que esta figura está comprendida entre la parte inferior de la zona 1 (forma con asíntotas) y la parte superior de la segunda figura de la misma zona (forma sin asíntotas) de la Figura 4.36. La segunda particularidad que se encuentra en esta misma zona, es la formación de una figura sin asíntotas, la cual se desarrolla entre las capas 8 hasta la capa 5. Esta figura se encuentra contenida por la forma sin asíntotas mostrada en la zona1 en su parte inferior y la forma vertical presentada en la zona 2, ambas de la Figura 4.36.

En la Figura 4.37, en su zona 2, se puede notar una formación de carácter vertical y cuya forma en su parte inferior acoge la Figura 4.36 en la parte superior de la zona 1; se puede notar de igual manera que la misma presenta desarrollo entre las capas 17 y 12.

PE2

En la Figura 4.38, se presenta la separación por capas de la matriz $T14$ y su respectiva acumulación para la tubería PE2 enterrada.

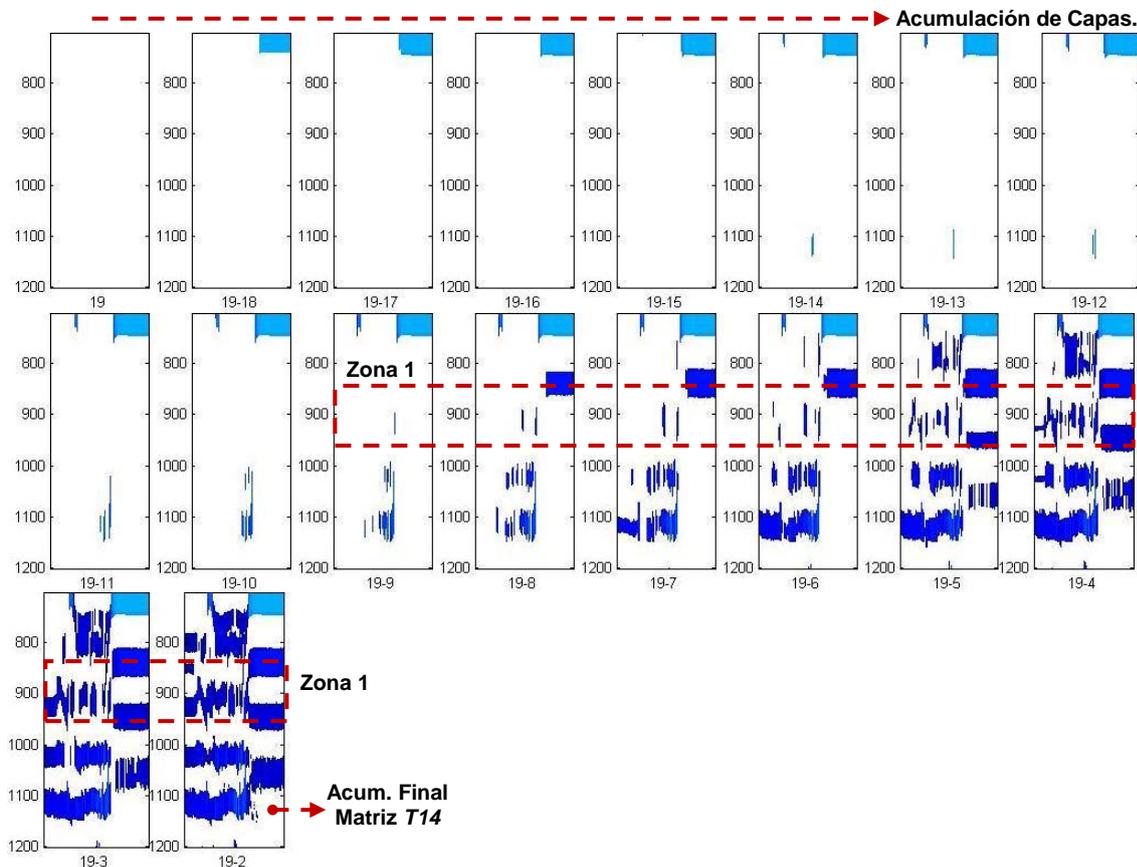


Figura 4.38. Acumulación de capas para $T14$ en PE2, entre los datos 700 y 1200 – Ensayos en paralelo.

En la zona 1 de la Figura 4.38, se puede observar una formación de la parte central de la hipérbola de características de la tubería adicionada en la capa 8, desarrollándose completamente hasta la capa 6; en esta forma no se observa la presencia de asíntotas. En la Figura 4.39 se presenta la separación por capas de la matriz $T15$ y su respectiva acumulación para la tubería PE2 enterrada.

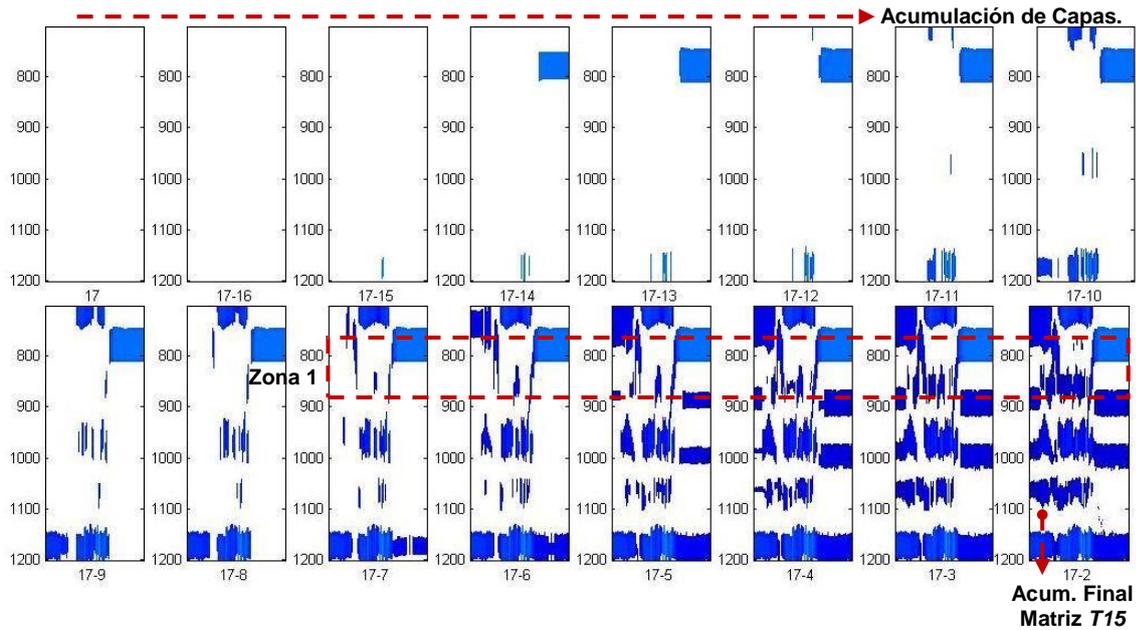


Figura 4.39. Acumulación de capas para $T15$ en PE2, entre los datos 700 y 1200 – Ensayos en paralelo.

En la zona 1 de la Figura 4.39, se puede observar la formación de la parte central en la capa 7, con un desarrollo hasta la capa 5.

4.5.2. Procesamiento por Matrices $T14$ y $T15$ – Ensayo en Simultáneo.

En este apartado, se presentan y analizan los datos resultados de la prospección realizada, posterior a su paso por las matrices $T14$ y $T15$. En la Figura 4.40, se presentan las matrices resultantes del procedimiento aplicado para la adición de todas las tuberías (PVC, PE1, Fib, Fund, PE2) en el medio de manera simultánea.

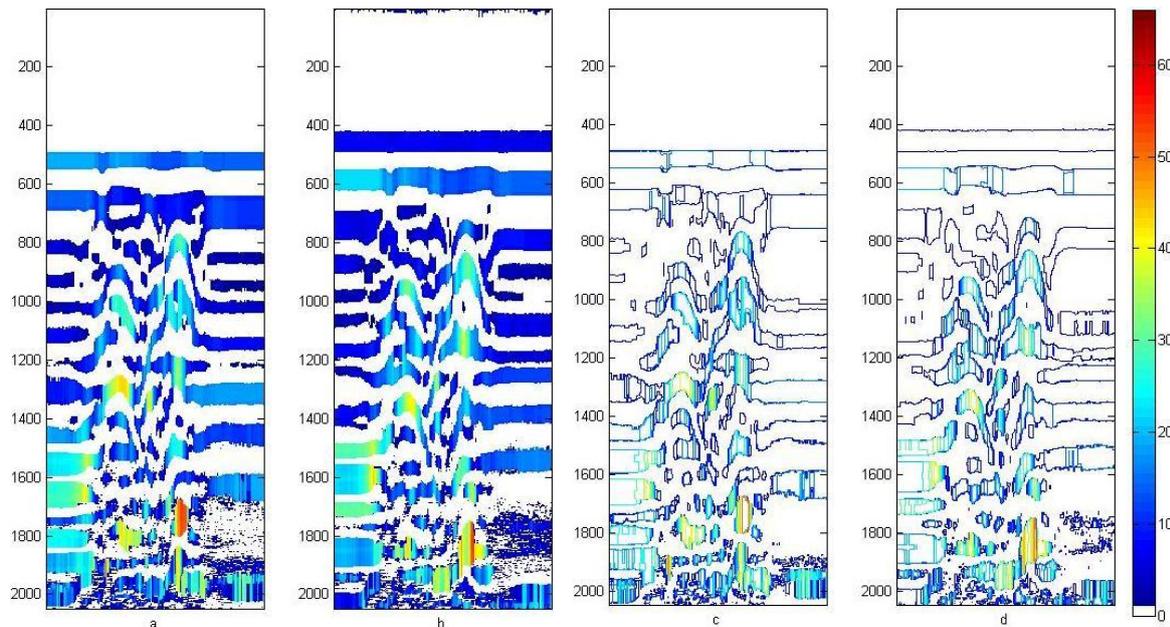


Figura 4.40. Posprocesamiento – Ensayos en simultáneo. a). $T14$. b). $T15$. c). $T14$ Mapa de contornos. d). $T15$ Mapa de contornos.

Del paso de los datos por las matrices $T14$ y $T15$, se puede observar en la Figura 4.40 una mejora considerable en la visualización de las características de las hipérbolas formadas para cada una de las tuberías sometidas a prospección, en comparación con las matrices obtenidas en la Figura 4.21; esta mejora específicamente favorece la visualización de las tuberías plásticas (PVC, PE1, PE2).

A continuación se realiza el mismo procedimiento desarrollado en el apartado anterior; los datos para esta parte son presentados entre 400 y 1200. En la Figura 4.41, se presenta la separación por capas de la matriz $T14$ y sus respectivos acumulados.

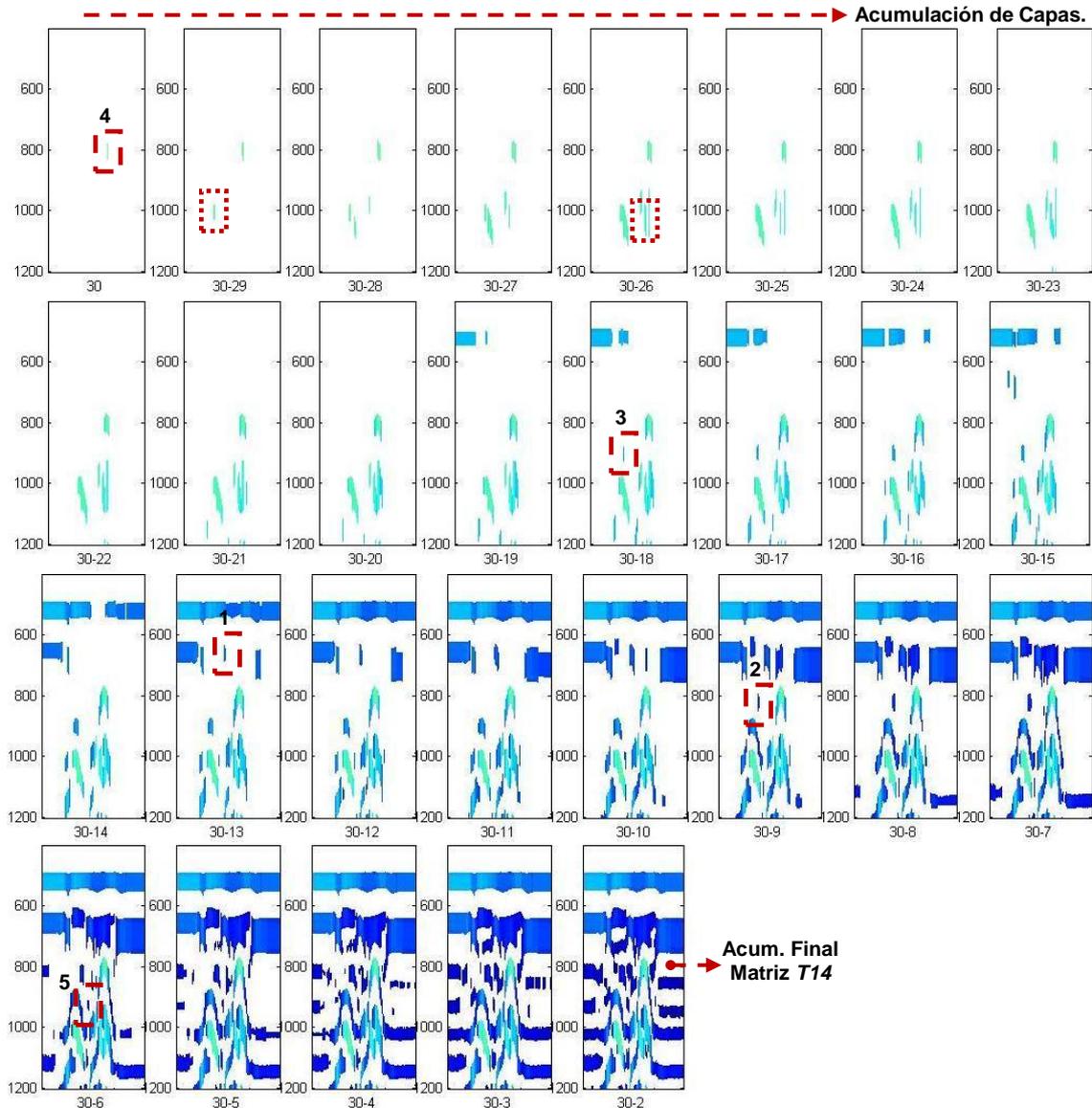


Figura 4.41. Acumulación de capas para $T14$, entre los datos 400 y 1200 – Ensayos en simultáneo*.

*los materiales son numerados de la siguiente manera: 1.PVC, 2.PE1, 3.Fib, 4.Fund, 5.PE2.

En la Figura 4.41, se puede observar la formación de las diferentes tuberías adicionadas al medio, estas se visualizan en las diferentes capas. A continuación se realiza una observación material por material para la discretización por capas de la matriz $T14$.

PVC

En la Figura 4.41, se puede observar la formación de la parte central de la tubería de PVC adicionada al medio, la cual se presenta en la capa 13 con un desarrollo hasta la capa 9. De igual manera se puede observar la formación de asíntotas entre las capas 8 y 5, la cual se acopla con el medio dificultando su visualización.

PE1

En el polietileno de menor diámetro adicionado en el medio, demarcado en el recuadro 2, se puede observar un desarrollo de la parte central a partir de la capa 9 hasta la capa 6, sin una posterior formación de asíntotas.

Fib

Se puede observar en la Figura 4.41, para el material de tubería adicionado de fibrocemento, la aparición de la parte central de las características de la tubería en la capa 18, con formación en dirección a sus extremos, con un desarrollo completo hasta la capa 11. Se puede observar de igual manera el inicio de la formación de las asíntotas en la capa 10 con un desarrollo hasta la capa 6, las cuales se unen con las externalidades que tienen su punto de formación en la capa 16. En el recuadro que se ha demarcado en la parte inferior a la tubería, se puede observar que esta figura presenta forma diagonal presentando la misma un desarrollo entre las capas 29 y 11.

Fund

Se puede observar en la Figura 4.41, para el material de fundición adicionado al medio su inicio en la capa 30, esta formación corresponde a la parte central de las características de la tubería con una posterior formación en dirección a sus extremos formándose por completo hasta la capa 18. Se puede observar cómo las asíntotas comienzan a formarse en la capa 17 con un desarrollo hasta la capa 7.

En el recuadro que se ha demarcado en la parte inferior a la tubería de fundición se puede observar una formación que presenta forma diagonal, cuyo desarrollo se encuentra entre las capas 26 y 15.

PE2

Se puede observar para este material la aparición de la formación de las características en la capa 6, con su desarrollo completo hasta la capa 2.

En la Figura 4.42, se presenta la separación por capas de la matriz T15 y su respectiva acumulación.

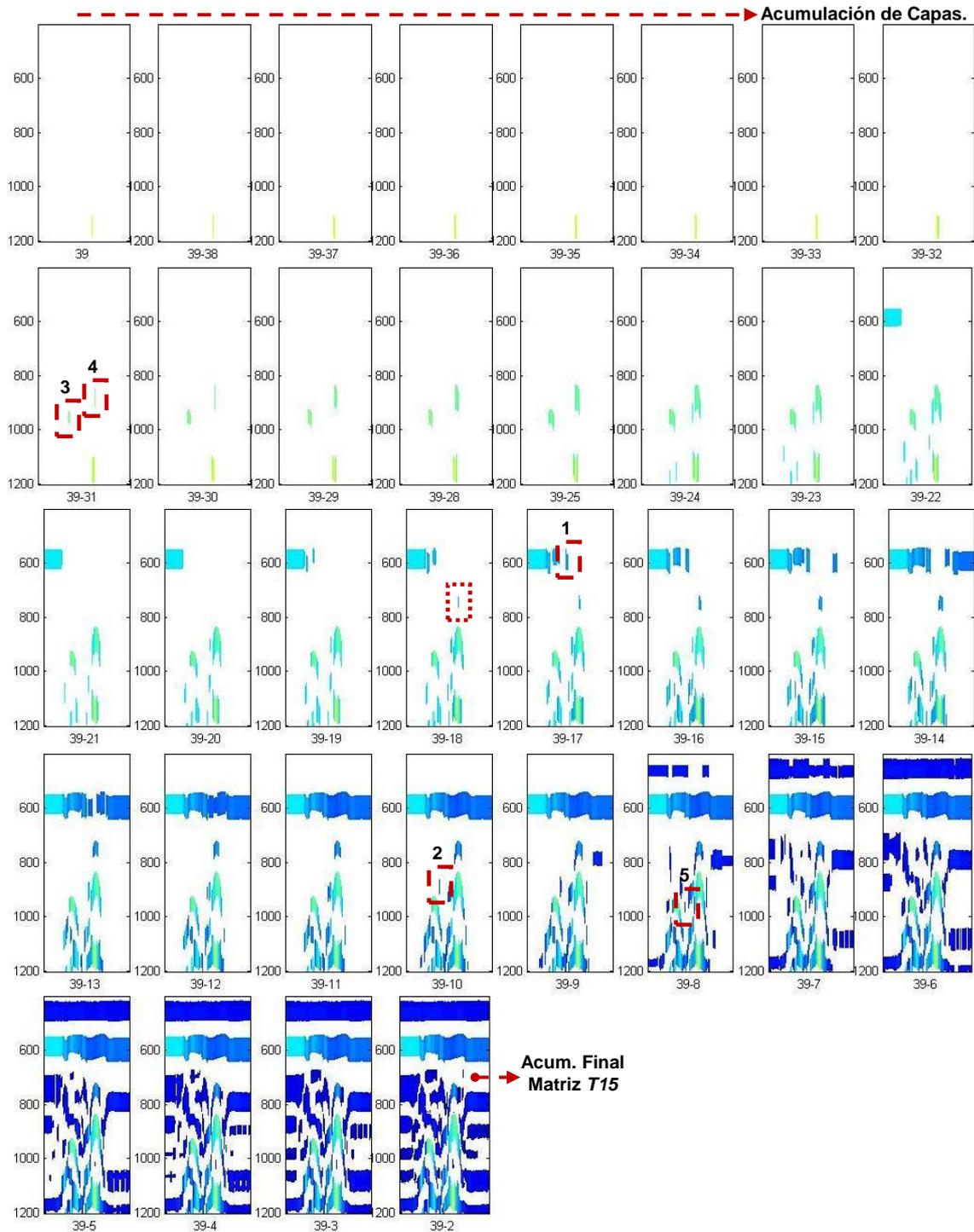


Figura 4.42. Acumulación de capas para T15, entre los datos 400 y 1200 – Ensayos en simultáneo*.

*los materiales son numerados de la siguiente manera: 1.PVC, 2.PE1, 3.Fib, 4.Fund, 5.PE2.

En la Figura 4.42, se puede observar la formación de las diferentes tuberías adicionadas al medio; estas se visualizan en las diferentes capas; a continuación se realiza una observación material por material para la discretización por capas de la matriz T15.

PVC

En la Figura 4.42, para el material de PVC adicionado se puede observar en la zona demarcada una forma de carácter vertical que acoge por su parte inferior a la forma presentada en la Figura 4.41 en el recuadro 1, la misma presenta su inicio en la capa 17 y su final en la capa 14.

PE1

Para este material se puede observar en la Figura 4.42, la aparición de la parte central de la hipérbola de características de la tubería en la capa 10 con un posterior desarrollo hasta la capa 5.

Fib

Se puede observar en el recuadro 3, la formación de una de las características de la tubería adicionada de fibrocemento, la cual presenta una formación de la parte central en la capa 31 hasta la capa 22, se observa una siguiente formación de las asíntotas en la capa 21 con un desarrollo hasta la capa 14; esta forma es acogida por la parte inferior de la forma presentada en la Figura 4.41 en el recuadro 3. Se debe mencionar que esta forma posiblemente se debe a la incrustación que presenta esta tubería.

Fund

Se puede observar en la figura anterior la aparición de esta tubería con formación en la parte central desde la capa 31, con formación hasta la capa 21 y una posterior formación de las asíntotas desde la capa 21 hasta la capa 8. Esta forma acoge por su parte superior a la forma presentada en la Figura 4.41 en el recuadro 4. Se puede observar en la parte superior que ha sido demarcada para esta tubería, el inicio de una formación en la capa 18 hasta la capa 13, con una posterior formación de asíntotas en la capa 12 hasta la capa 7. Esta forma acoge por su parte inferior a la forma presentada en la Figura 4.41 en el recuadro 4.

PE2

En la Figura 4.42, se puede observar la formación de la tubería de PE entre las capas 8 y 5, sin formación de asíntotas; debe mencionarse la dificultad de determinación de la forma debido al leve contraste que presenta con el medio. Se puede observar que la figura presentada en el recuadro 5 en la Figura 4.41 acoge por su parte inferior a la parte superior de la figura mostrada en la figura actual.

De los dos ensayos realizados (paralelo y simultáneo), con la adición de tubería a terreno seco en un tanque de laboratorio, tras la aplicación de los procedimientos conducentes a las matrices *T14* y *T15*, y tras observar las características que cada una de las imágenes presenta, se puede decir que tras la aplicación de este procedimiento, se observa mejora considerable en la visualización de las características de las tuberías plásticas y no plásticas, siendo más representativa la evolución de las plásticas, para el caso en particular de las tuberías de PE.

Después de la separación por capas realizada para las matrices *T14* y *T15* de los dos ensayos realizados y consolidando la información se puede obtener los siguientes resultados.

Ubicando el consolidado de la información que fue obtenido de las imágenes de los ensayos realizados en paralelo, para tuberías enterradas en suelo seco en un tanque de laboratorio, de la manera en la cual fueron obtenidos (de la parte superior del tanque a la inferior) y contrastándolos con las capas en las cuales fueron obtenidas cada una de las hipérbolas de

características, a continuación se presentan los resultados de las máximas y mínimas capas y la diferencia entre ellas, de cada hipérbola obtenida para cada material, conservando la división observada en las figuras anteriores de la parte central y asíntotas.

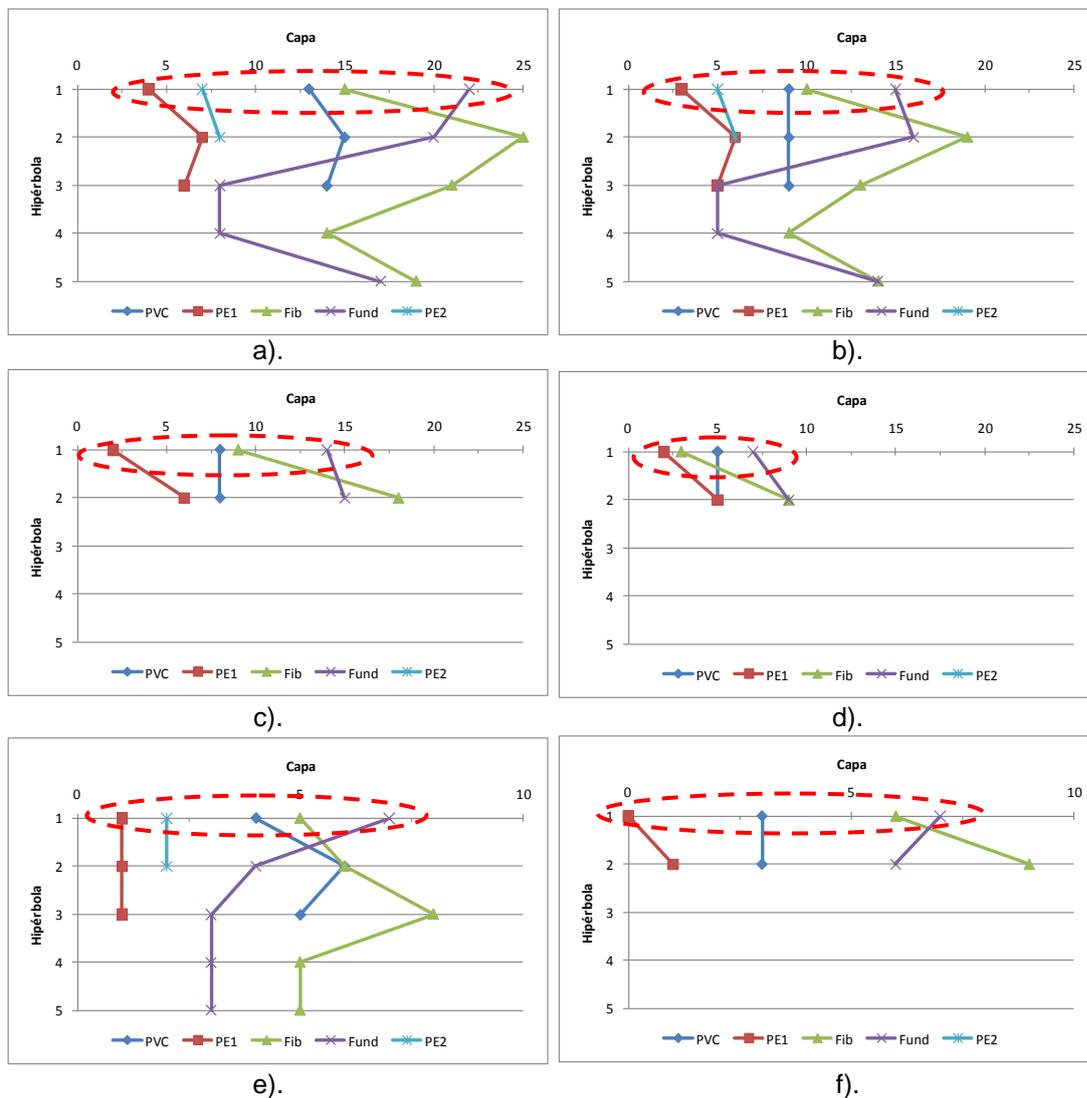


Figura 4.43. Acumulación Consolidado de la información de capas observada, en ensayos en paralelo de tuberías enterradas – Hipérbolas de características, matrices $T14$ y $T15$. a). Parte central, Max. capa b). Parte central, Mín. capa. c). Asíntotas, Máx capa. d). Asíntotas, Mín capa. e). Parte Central, Máx. – Min. f).Asíntotas, Máx. – Min.

De la anterior figura, se puede decir que, en las matrices cada material presenta su desarrollo con diferentes características, las cuales los diferencian entre sí. De igual manera se puede decir que para la mayoría de ellos (exceptuando, Figura 4.43 (d), para fibrocemento), la primera hipérbola de características tanto en la parte central como para el desarrollo de sus asíntotas, se observa el orden $PE \rightarrow PVC \rightarrow Fib \rightarrow Fund$, el cual localiza a los materiales plásticos enterrados en este ensayo en capas de valores menores a los de los no plásticos.

Para el ensayo en Simultáneo, se presenta la Figura 4.44.

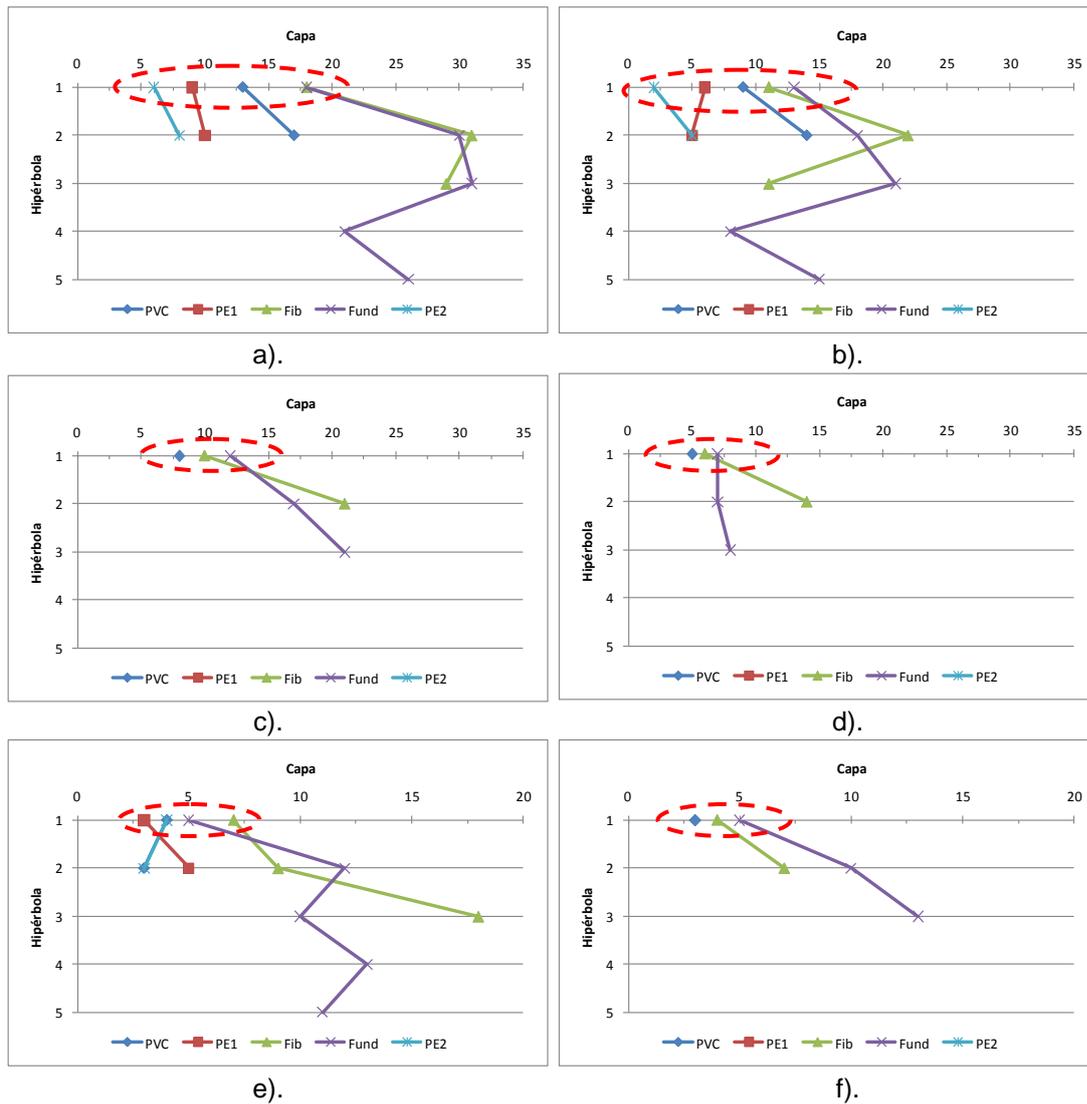


Figura 4.44. Consolidado de la información de capas observada, en ensayos en simultaneo de tuberías enterradas – Hipérbolas de características, matrices $T14$ y $T15$. a). Parte Central, Max. Capa b). Parte Central, Mín. Capa. c). Asíntotas, Máx. Capa. d). Asíntotas, Mín. Capa. e). Parte Central, Máx. – Mín. f). Asíntotas, Máx. – Mín.

En la Figura 4.44, se puede observar una semejante localización de la primera hipérbola de características de las tuberías enterradas, a la presentada en la Figura 4.43. Se podría decir que las diferencias entre la presentación de cada punto puede ser la consecuencia de la influencia de múltiples factores, los cuales ameritan un estudio más detallado y se escapan de los objetivos de este trabajo.

De igual manera, se puede decir, tras lo observado en la Figura 4.44, que con la inclusión de múltiples tuberías enterradas, se dificulta la determinación visual de todas las características en comparación con lo observado, por lo cual tras la parametrización realizada a través de las matrices $T14$ y $T15$, sería conveniente, explorar metodologías de clasificación de datos, a fin de extraer al máximo las características presentadas en las matrices $T14$ y $T15$.

4.6. Conclusiones

Se han enterrado cinco tuberías de diferentes materiales, que comúnmente hacen parte de las redes de abastecimiento, en un tanque de laboratorio en suelo seco y someterlos a prospección mediante GPR. De la visualización de sus datos en bruto, en escala de gris y mapas de contornos, se puede decir:

- Las tuberías de materiales débilmente reflexivos, presentan gran dificultad de visualización; para el caso en estudio, son los materiales de PVC y PE, presentándose, para este último, valores de reflexiones tan débiles, que no se delimitan sus contornos.
- La identificación visual de formas, que permite el marcado contraste de intensidad de color de materiales reflexivos y los que lo son de manera débil, ha permitido la identificación rápida de las tuberías, en radargramas, resultantes de prospecciones con GPR. Sin embargo, esta metodología de identificación, es basada en parámetros subjetivos, que no permiten repetitividad del proceso, no brindando la posibilidad de posible parametrización conducente a la clasificación por medio de sistemas inteligentes.

Tras el procesamiento de los datos en bruto resultantes de las prospecciones realizadas con GPR, bajo las configuraciones y parámetros establecidos en este capítulo y su posterior posprocesamiento mediante las matrices *T3*, *T5*, *T9*, *T12*, *T14* y *T15*, se puede decir para cada material de tubería adicionado, que:

- **PVC.** Presenta mejoramiento en la visualización de la imagen, obteniéndose mayor cantidad de las características visibles propias del paso de la señal a través de la misma, al compararlo con los datos en bruto.
- **PE1 y PE2.** Permite la visualización de este tipo de material, presentando mejor demarcación de la misma al compararlos con los datos en bruto.
- **Fib. y Fund.** Mejora la visualización de las características propias de la imagen, tal como las asíntotas, y presenta mayor solidez en la imagen de la tubería.

Finalmente a la vista de los resultados obtenidos para tuberías enterradas en suelo seco, en este capítulo se puede concluir que:

- En general, se observó mejora considerable en la aparición de características, en primera instancia con la aplicación de las matrices *T3*, *T5*, *T9* y *T12*, con una susceptible mejora, tanto en consolidación de las imágenes como en la visualización de las mismas tras su paso posterior por las matrices *T14* y *T15*.
- Se alcanza una mejora sustancial de la visualización de las características en conjunto de las tuberías enterradas.
- Permite la visualización del material de polietileno (plásticos en general), lo que representa una característica muy interesante, ya que la permitividad dieléctrica del PE es del mismo orden de magnitud que la del suelo.
- Se observa la aparición en las diferentes capas de las características de las tuberías enterradas en suelo, acorde a su composición, por lo que se abre la posibilidad de clasificación cuando encontramos grupos de conductos muy cercanos entre sí.
- Por último, cabe indicar que se trata de un proceso de cuya aplicación es sencilla y no dependiente de la consideración y criterio del especialista (proceso no subjetivo), que brinda la posibilidad de ser repetible y también, con los adecuados ajustes, la posibilidad de parametrizar los radargramas para el caso de los sistemas de tuberías de abastecimiento, con miras a servir como base para el entrenamiento de sistemas inteligentes.

Capítulo 5

Conclusiones y Desarrollos Futuros

5.1. Introducción

El objetivo principal del trabajo fue evaluar la viabilidad del método propuesto de análisis de radargramas para la caracterización de los componentes de un sistema de abastecimiento por medio de prospección mediante GPR. No se pretendía abarcar todos los aspectos y el espectro de posibilidades que brindan las técnicas no destructivas, que en este caso es el GPR. Por el contrario se pretendía ofrecer un primer avance en la parametrización de los registros obtenidos, que fundamente las bases para la determinación de las características de los componentes de un sistema de abastecimiento en servicio, por medio de sistemas de clasificación inteligentes, buscando generar herramientas que permitan actuaciones eficaces y eficientes en la misma.

En el desarrollo de este trabajo se ha encontrado, después del análisis de la bibliografía, que actualmente los registros de obtenidos mediante GPR son analizados, mediante técnicas de visualización y que, en general, se ofrecen múltiples y variadas metodologías de posprocesamiento de estos registros, que permiten mejorar la calidad de las imágenes captadas. Sin embargo, cabe mencionar que presentan una gran dependencia sobre la habilidad del especialista para su aplicación, presentando variedad en la interpretación.

Conclusiones Metodológicas

Después del análisis de los registros de GPR, resultados del paso de las señales emitidas y posteriormente recibidas, a través de los materiales en el medio sometido a prospección, y trabajando sobre la base del parámetro de amplitud de la onda, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Se ha desarrollado un procedimiento para la extracción, en rangos de amplitudes, que corresponde a la clasificación de los radargramas en escalas de colores, para realizar la posterior interpretación de las imágenes obtenidas en las prospecciones; se trata de un procedimiento que se ha empleado comúnmente para la identificación de los objetos enterrados, tomando como base las formas y figuras que delimitadas por contraste en la intensidad de los colores, debido a las diferencias en las propiedades electromagnéticas de cada uno de los materiales encontrados. El procedimiento es de gran utilidad, pero debe ser aplicado con especial cuidado, debido a que la aplicación de escalas con límites entre los rangos muy espaciados, puede ocasionar pérdida en la información relevante para el estudio. Por otra parte, para discretizaciones muy pequeñas de los rangos, aunque permite extraer características de conformación, es siendo posible determinar con mayor precisión las características tales como los límites y la zona central, por lo que puede ser un buen punto de partida para procedimientos más robustos. Como metodología individual, no permite la visualización consolidada de las formas de los objetos encontrados, al perder la perspectiva global de la misma, puesto que puede generar la posibilidad de errores de interpretación.

- En el procedimiento de extracción por rangos de amplitudes de onda, al menos en una de las matrices $B^{(k)}$ aparecen los límites que demarcan la figura de interés, resultante en la prospección. Las imágenes obtenidas por esta clasificación son dependientes a la h aplicada y no aporta consistencia en los resultados obtenidos, de modo que no es apta (de forma directa) como medida de una parametrización orientada al entrenamiento de sistemas inteligentes, dada su amplia variabilidad de resultados y su poca repetibilidad.
- En los procedimientos planteados para la extracción de matrices, tomando como puntos iniciales los valores mínimos (valles) y máximos (crestas) de amplitud de onda, por sus partes inferiores y superiores en ambos casos, se puede decir que estas matrices permiten la visualización de características que demarcan un mayor grado de solidez en comparación con las imágenes obtenidas mediante una clasificación por rangos, al conservarse los límites y agrupar sus valores, mostrándose en ellas la respectiva conformación de cada uno de los materiales encontrados tras la prospección realizada.
- Los procedimientos de extracción de amplitudes y de extracción de matrices, tomando como puntos iniciales los valores mínimos (valles) y máximos (crestas) de amplitud de onda, por sus partes inferiores y superiores en ambos casos, conducen, por medio de un proceso acumulativo, a la obtención de matrices denominadas $T3$, $T5$, $T9$, $T12$, $T14$ y $T15$, que presentan de manera sucinta las características de cada material. Estas matrices son un punto de partida adecuado para la visualización consolidada de la información resultante de las prospecciones realizadas y pueden servir como parametrización de los registros de GPR, en especial las $T14$ y $T15$, al presentar mayor consolidación de las formas.

Conclusiones de los Trabajos Experimentales

En el análisis de la aplicación del procedimiento experimental desarrollado con las matrices $T3$, $T5$, $T9$, $T12$, $T14$ y $T15$, se han realizado diversos ensayos mediante prospección por GPR en un tanque de laboratorio, en suelo seco, con cinco tuberías de cuatro diferentes materiales comerciales (PVC, PE1, Fib, Fund, PE2), comúnmente empleados en sistemas de abastecimiento. Al realizar la comparación con sus resultados en bruto se encontró que:

- En la visualización de los datos en bruto, utilizando una escala de grises y mapas de contorno, las tuberías de materiales débilmente reflexivos (PVC, PE1, PE2) presentan una considerable dificultad de visualización, para el caso en estudio. En el caso del PE, se presentan unos valores tan débiles de amplitud de onda en las reflexiones, que sus límites no aparecen en los mapas de contornos. Por otra parte, para las tuberías de Fib y Fund, se encuentra que presentan unos valores altos de amplitud de onda, comparados con los plásticos, que permiten unas intensidades elevadas de color, que resalta las formas resultantes de las mismas tras la prospección.
- Se puede decir, tras los análisis de las imágenes en bruto, que la identificación visual de formas puede ser realizada debido al marcado contraste de intensidad de color de materiales reflexivos, y también con los materiales poco reflexivos, permitiendo una identificación a priori de las tuberías, en radargramas resultantes de prospecciones con GPR. Sin embargo, esta metodología de identificación, está basada en parámetros subjetivos, que no permiten la repetibilidad del proceso, resultando inviable una parametrización conducente a la clasificación por medio de sistemas inteligentes de componentes de sistemas de abastecimiento.

- Tras el procesamiento de los datos en bruto y mediante el posprocesamiento conducente a las matrices *T3*, *T5*, *T9*, *T12*, *T14* y *T15*, con las configuraciones y parámetros establecidos en esta tesina, al comparar con los resultados en bruto para cada material de tubería adicionado, se obtuvo lo siguiente:
 - **PVC.** Presenta una mejora en la visualización de la imagen, obteniéndose mayor cantidad de las características visibles propias del paso de la señal a través de la misma, al compararlo con los datos en bruto.
 - **PE1 y PE2.** Permite la visualización de este tipo de material, presentando una mejor demarcación de la misma al compararlos con los datos en bruto.
 - **Fib. y Fund.** Mejora la visualización de las características propias de la imagen, tal como las asíntotas del perfil hiperbólico y presenta mayor solidez en la imagen de la tubería.

Finalmente, a la vista de los resultados obtenidos para tuberías enterradas en suelo seco como resultado de la aplicación de la herramienta metodológica experimental planteada, se puede concluir que:

- En general, la aplicación de esta herramienta presenta una mejora considerable en las imágenes, por la aparición de características. La mejora se manifiesta tanto en primera instancia, con la aplicación de las matrices *T3*, *T5*, *T9* y *T12*, como posteriormente, en la consolidación de las imágenes y en la visualización de las mismas tras su paso posterior por las matrices *T14* y *T15*.
- Se alcanza una mejora sustancial en la visualización de las características en conjunto de las tuberías enterradas.
- Permite la visualización del material de polietileno (plásticos en general), lo que representa una característica muy interesante, ya que la permitividad dieléctrica del PE es del mismo orden de magnitud que la del suelo.
- Se observa la aparición, en las diferentes capas, de las características de las tuberías enterradas en suelo, acorde a su composición, por lo que se abre la posibilidad de clasificación cuando encontramos grupos de conductos muy cercanos entre sí.

Por último, indicar que la amplitud de onda, que ha sido un parámetro habitualmente desestimado para su uso en el posprocesamiento de registros de obtenidos mediante prospección con GPR, se revela como un parámetro de interés y utilidad en la identificación y clasificación de objetos enterrados, tal y como hemos podido comprobar en el desarrollo de este trabajo. Tal es el caso del procedimiento planteado en este documento, que se caracteriza por su sencilla aplicación y por no depender de la consideración y criterio del especialista (proceso no subjetivo), por lo que resulta repetible y, mediante los adecuados ajustes, ofrece la posibilidad de parametrizar los radargramas para el caso de los sistemas de tuberías de abastecimiento, dirigido a servir como base para el entrenamiento de sistemas inteligentes.

5.2. Desarrollos Futuros

La metodología planteada y su posterior aplicación en ensayos de laboratorio, presentados en esta tesina, abren líneas de investigación conducentes a la clasificación de componentes de sistemas de abastecimiento por medio de sistemas inteligentes de clasificación. Específicamente en:

- Aplicación de sistemas automáticos de generación de radargramas sintéticos, con el objetivo de generar diferentes y variados modelos que simulen diversas condiciones de componentes de sistemas de abastecimiento, para ser comparados con ensayos de simulaciones en laboratorio, y también con el objetivo de generar bases de datos a ser empleadas en clasificación de los mismos.
- Uso de herramientas estadísticas o algoritmos de detección de características, dirigidos para servir de base en el entrenamiento de sistemas inteligentes de clasificación.
- Finalmente, la implementación, entrenamiento y puesta en marcha de un sistema inteligente para detección y caracterización de tuberías.

Referencias

- Ayala, D.; Pérez García, R.; (2009). "A tool for GPR image's visualization of Water Supply System Components". Presentación, WATERPIPE: Come l'innovazione può assistere nell'ottenere la Gestione Economica dei sistemi idrici - ECOMONDO, Rimini (Italia).
- Ayala, D.; Pérez, R.; Izquierdo, J.; Herrera, M.; (2009). "Visualización de componentes de sistemas de abastecimiento mediante imágenes de Georadar". IX SEREA, Seminario Iberoamericano sobre Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de agua, Valencia (España).
- Bonomo, N.; De la Vega, M.; (s.f.). "El método de Georadar". Recuperado el 17 de Septiembre de 2008 de <http://www.gaia.df.uba.ar/Radar.pdf>.
- Busquet, E.; Casas, A.; Pinto, V.; Rivero, L.; Sabadía, J. B.; (1996). "Geofísica ambiental: técnicas no destructivas para el reconocimiento de zonas contaminadas por vertidos". Acta Geologica Hispanica , Vol. 30 (n. 1-3), pp 73-82.
- Cukavac, M.; Klemčić, G.; Lazović, Č.; (2008). "Reconstruction of Buried Objects by Implementation of Ground Penetrating Radar Technique: Example on Roman Tomb in Brestovik (Serbia)". Proceeding of the International Conference, p. 333-338.
- Göttsche, F.-M.; (1997). "Identification of cavities by extraction of characteristic parameters from ground probing radar reflection data". PhD Thesis, Christian-Albrechts Universität, zu Kiel, Germany.
- Jol, H.; (2008). "Ground penetrating radar: Theory and applications". Primera edición, Editorial ELSEVIER, Universidad de Wisconsin, USA.
- Manresa, E. P.; (s.f.). Recuperado el 13 de 01 de 2009, de <http://www.epsem.upc.edu>
- Olhoeft, G.R.; (2006). "Ground penetrating radar". Recuperado el 29 de mayo de 2009, de <http://www.g-p-r.com>.
- Olhoeft, G.R.; (1999). "Maximizing the Information Return from Ground Penetrating Radar". Journal of Applied Geophyscs , pp 175-187.
- Pueyo, Ó.; Zamora, S.A.; Pocoví J.A.; (2005). "Aplicación de la Prospección Geofísica por Georadar (GPR) a la Delimitación y Caracterización de Estructuras Arqueológicas. Ejemplo de las Ruinas del Convento Agustino de Fraga (Huesca)". Geogaceta, pp 131-134.
- Tavera, M.; Pérez, R.; Izquierdo, J.; Montalvo, I. (2008). "Métodos no-destructivos para la mejora del rendimiento de una red hidráulica: casos de estudio con el georadar". XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias (Colombia).
- Tavera, M.; Pérez, R.; Montalvo, I.; Lopez, A. (2008). "Métodos no destructivos para la mejora del rendimiento de una red hidráulica: casos de estudio con el georadar".

Alterações Climáticas e Gestao da Água e Energia em Sistemas de Abastecimento e Drenagem, Editorial: IST-CEHIDRO, pp. 219-299.

Tavera, M.; Pérez, R.; Montalvo, I.; Lopez, A. (2008). “*Métodos no destructivos para la mejora del rendimiento de una red hidráulica: casos de estudio con el georadar*”. VIII SEREA, Seminario Iberoamericano Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimiento de Agua, Lisboa (Portugal).

Tavera, M. (2008). *Aplicación del Georradar para la Mejora del Rendimiento de una Red Hídrica*. Valencia, Tesis de Master, Universidad Politécnica de Valencia, España.

Tavera, M.; Pérez, R.; Belda, N.; Herrera, M. (2007). “*Uso del georadar per un migliore rendimento delle reti idriche: verifica in laboratorio della sua efficacia come tecnica di prospezione per la ricerca perdite*”. III Seminario La ricerca delle perdite e la gestione delle reti di acquedotto, Facoltà di Ingegneria di Perugia (Italia).

Tavera, M.; Pérez, R.; Belda, N.; Herrera, M.; Montalvo, I. (2007). “*Aplicación del radar de subsuelo en la mejora del rendimiento de redes de distribución de agua: caracterización de la firma digital de las pérdidas de agua en tuberías*”. VII SEREA, Seminario Iberoamericano Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de agua, Proceedings, Morelia (México).

Vega, P.G.; (2002). “*Radar de Subsuelo. Evaluación para Aplicaciones en Arqueología y en Patrimonio Histórico-Artístico*”. PhD Tesis, Universidad Politécnica de Cataluña, España.