



Título del Trabajo Fin de Máster:

***RECONOCIMIENTO DE PATRONES
PARA LA IDENTIFICACIÓN DE
TUBERÍAS ENTERRADAS EN
SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE
AGUA A PARTIR DE IMÁGENES DE
GPR***

Intensificación:

HIDRÁULICA URBANA

Autor:

OCAÑA LEVARIO, SILVIA JANETH

Director/es:

DR. PÉREZ GARCÍA, RAFAEL

DR. IZQUIERDO SEBASTIÁN, JOAQUÍN

Fecha: **MARZO, 2014**



Título del Trabajo Fin de Máster:

RECONOCIMIENTO DE PATRONES PARA LA IDENTIFICACIÓN DE TUBERÍAS ENTERRADAS EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA A PARTIR DE IMÁGENES DE GPR

Autor: **OCAÑA LEVARIO, SILVIA JANETH**

Tipo	A <input type="checkbox"/>	B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	RAFAEL PÉREZ GARCÍA		Fecha de Lectura	MARZO, 2014
Codirector1	JOAQUÍN	IZQUIERDO		
Codirector2	SEBASTIÁN			
Tutor				

Resumen:

Este trabajo se propone con el objetivo de realizar un primer avance hacia el desarrollo de una herramienta metodológica que permita la localización automática de tuberías en los sistemas de abastecimiento de agua (SAA), haciendo uso del GPR (Ground Penetrating Radar) como técnica de inspección no destructiva. Para ello se propone una metodología que permita la identificación y extracción de patrones a través del análisis de imágenes obtenidas con GPR.

Para el desarrollo del trabajo fueron realizados ensayos en laboratorio bajo condiciones controladas sobre un tanque lleno de suelo seco, donde se enterraron 4 tuberías de materiales diferentes; posteriormente, sobre él fueron tomadas las prospecciones con GPR. Con ello se obtuvieron las imágenes o radargramas, que fueron el punto de partida para el desarrollo del trabajo. A continuación, las imágenes fueron sometidas a los procedimientos planteados para lograr la identificación de patrones.

Tras la aplicación del procedimiento planteado se obtuvieron resultados prometedores, primeramente logrando mejorar la visualización de tuberías en las imágenes; adicionalmente, fue posible la identificación de algunos patrones propios para cada material de tubería enterrada, los cuales, posteriormente, fueron analizados y comparados entre ellos, evaluando las diferencias encontradas. Finalmente, los resultados obtenidos nos permiten la reconstrucción de las tuberías en modelos 3D.

Para acabar, debemos indicar que el procedimiento planteado es sencillo y de fácil aplicación, proporcionando la posibilidad de servir como primer planteamiento hacia el desarrollo de un sistema automático que permita ser capaces de localizar y caracterizar las tuberías de los SAA y, principalmente, que ello no dependa del criterio (subjetivo) de una persona específica.

ABSTRACT

This document is proposed with the objective to create a first approach through the development of a methodological tool that allows an automatic localization of pipelines in the water supply systems (WSS), by using GPR (Ground Penetrating Radar) as a non destructive inspection technique. To do so, a methodology that permits identification and patterns extraccion through image analysis previously obtained by the GPR. To develop this job, laboratory essays were done under controlled conditions on a dry-soil filled tank, where 4 diferent materials pipelines were previously buried; afterwards, GPR prospections were taken over the tank. Radargrams or GPR images were obtained by doing so, beeing the starting point to develop this investigation. Next, images were subjected through different procedures to

identify patterns.

After applying the past procedures results were obtained first of all upgrading visualization of pipelines in the images, additionally some materials patters proper to each of the buried pipelines were identified, analyzed, and subsequently compared between them, evaluating their differences.

Finally, the results obtained allowed the reconstruction of the pipelines using 3D modeling.

To end up, we must indicate that the procedure presented is simple and easy to obtain, giving the possibility to serve as a first approach to develop an automatic system that allows to localize and characterize WSS pipelines, and most important, that this does not be restricted to the subjective criteria of an specific person.

RESUM

Aquest treball es proposa amb l'objectiu de realitzar un primer avanç cap al desenvolupament d'una eina metodològica que permeti la localització automàtica de canonades en els sistemes de proveïment d'aigua (SPA), fent ús del GPR (Ground Penetrating Radar) com a tècnica d'inspecció no destructiva. Per a açò es proposa una metodologia que permeti la identificació i extracció de patrons a través de l'anàlisi d'imatges obtingudes amb GPR.

Per al desenvolupament del treball van ser realitzats assajos en laboratori sota condicions controlades sobre un tanc ple de sòl sec, on es van enterrar 4 canonades de materials diferents; posteriorment, sobre ell van ser preses les prospeccions amb GPR. Amb açò es van obtenir les imatges o radargramas, que van anar el punt de partida per al desenvolupament del treball. A continuació, les imatges van ser sotmeses als procediments plantejats per a aconseguir la identificació de patrons.

Després de l'aplicació del procediment plantejat es van obtenir resultats prometedors, primerament aconseguint millorar la visualització de canonades en les imatges; addicionalment, va ser possible la identificació d'alguns patrons propis per a cada material de canonada enterrada, els quals, posteriorment, van ser analitzats i comparats entre ells, avaluant les diferències oposades. Finalment, els resultats obtinguts ens permeten la reconstrucció de les canonades en models 3D.

Per a acabar, hem d'indicar que el procediment plantejat és senzill i de fàcil aplicació, proporcionant la possibilitat de servir com a primer plantejament cap al desenvolupament d'un sistema automàtic que permeti ser capaços de localitzar i caracteritzar les canonades dels SAA i, principalment, que açò no depenga del criteri (subjectiu) d'una persona específica.

Palabras clave:

GPR, Localización de tuberías enterradas, Reconocimiento de patrones, Sistemas de abastecimiento de agua, Técnicas no destructivas>

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco primeramente a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de este reto, por ser mi fortaleza en momentos de debilidad y por permitirme culminar esta etapa.

Quiero agradecer también a la Universidad Autónoma de Chihuahua (México) por todo el apoyo moral y económico que me ha sido brindado. Además, me gustaría agradecer a mis directores de tesis Rafael Pérez y Joaquín Izquierdo quienes siempre confiaron en mí y por todo el apoyo que siempre me dieron. Asimismo a todos los miembros del grupo Fluing de la Universidad Politécnica de Valencia por que siempre estuvieron ahí aconsejándome, ayudándome y dándome ánimos cuando más lo necesite, especialmente a David por su paciencia, por su amistad, por su apoyo en todo momento, pero sobre todo por creer en mí cuando muchas veces ni yo lo hacía.

Por otra parte le doy gracias a mis padres por apoyarme y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación, a mis hermanos por ser parte importante en mi vida y darme ánimos cuando estaba decaída, quiero agradecer también a mi esposo que ha sido un gran apoyo para mí desde el inicio de este reto, por su paciencia, por sus consejos y por motivarme a seguir adelante en momentos de desesperación. Pero sobre todo este trabajo se lo dedico a mi hija Natalia que a pesar de su corta edad me apoya y me motiva a seguir adelante con solo ver su sonrisa cada mañana.

CAPITULO I..... 5

INTRODUCCIÓN..... 5

1.1 INTRODUCCIÓN 5
1.2 OBJETIVO 7
1.2.1 Objetivo general..... 7
1.2.2 Objetivos específicos..... 7
1.3 JUSTIFICACIÓN..... 7
1.4 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO..... 9

CAPITULO II..... 10

GPR, PRINCIPIOS, FUNDAMENTOS Y BASES TEORICAS..... 10

2.1 INTRODUCCIÓN 10
2.2 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL GPR 11
2.3 ASPECTOS GENERALES DEL GPR 12
2.4 BASES TEÓRICAS DEL GPR 16
2.4.1 Ecuación del GPR..... 17
2.5 PARÁMETROS QUE CARACTERIZAN EL COMPORTAMIENTO DE LAS ONDAS EN EL MEDIO. 18
2.5.1 Conductividad eléctrica (σ)..... 18
2.5.2 Permitividad eléctrica (ϵ) 19
2.5.3 Permeabilidad magnética (μ)..... 19
2.5.4 Velocidad de propagación y longitud de onda..... 20
2.5.5 Atenuación 21
2.5.6 Reflexión y Refracción 21

CAPITULO III..... 25

CASO DE ESTUDIO, MATERIALES Y MÉTODOS 25

3.1 INTRODUCCIÓN 25
3.2 CASO DE ESTUDIO. CONFIGURACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO 27
3.3 CAPTURA DE DATOS..... 29
3.4 PROCESO DE REDIMENSIONAMIENTO DE IMÁGENES 31
3.4.1 Métodos de medición en estudios GPR 32
3.4.2 Método de redimensionamiento propuesto 33
3.4.3 Calibración de la cámara 34
3.4.4 Descripción del sistema planteado 36
3.5 CONTRASTE 45

CAPITULO IV..... 46

ANÁLISIS DE RESULTADOS. DATOS EN BRUTO	46
4.1 INTRODUCCIÓN	46
4.2 FORMAS DE REFERENCIA A IDENTIFICAR EN EL ANÁLISIS.....	47
4.3 IMÁGENES DE GPR EN BRUTO. ENSAYOS DE REFERENCIA	48
4.4 IMÁGENES DE GPR EN BRUTO. ENSAYOS CON TUBERÍA DE PVC.....	51
4.5 IMÁGENES DE GPR EN BRUTO. ENSAYOS CON TUBERÍA DE PE	54
4.6 IMÁGENES DE GPR EN BRUTO. ENSAYOS CON TUBERÍA DE AC.....	57
4.7 IMÁGENES DE GPR EN BRUTO. ENSAYOS CON TUBERÍA FUND.....	59
4.8 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS DIFERENTES MATERIALES ENSAYADOS	61
<u>CAPITULO V.....</u>	63
ANÁLISIS DE RESULTADOS. CONTRASTES	63
5.1 INTRODUCCIÓN	63
5.2 CONTRASTES DE IMÁGENES DE GPR. REFERENCIA CONTRA TUBERÍA DE PVC	64
5.3 CONTRASTES DE IMÁGENES DE GPR. REFERENCIA CONTRA TUBERÍA DE PE.....	67
5.4 CONTRASTES DE IMÁGENES DE GPR. REFERENCIA CONTRA TUBERÍA DE AC	70
5.5 CONTRASTES DE IMÁGENES DE GPR. REFERENCIA CONTRA TUBERÍA FUND	72
5.6 EXTRACCIÓN Y ANÁLISIS DE CARACTERÍSTICAS ENCONTRADAS PARA CADA MATERIAL EN LOS CONTRASTES	75
<u>CAPITULO VI.....</u>	82
CONCLUSIONES, TRABAJOS FUTUROS Y APORTACIONES EN HIDRÁULICA URBANA	82
6.1 INTRODUCCIÓN	82
6.2 CONCLUSIONES, IMÁGENES EN BRUTO	84
6.3 CONCLUSIONES. CONTRASTES	85
6.4 DESARROLLOS FUTUROS.....	87
6.5 APORTACIONES EN HIDRÁULICA URBANA.....	88
<u>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</u>	89

FIGURA 2.1. CAPTURA DE IMÁGENES CON PROSPECCIÓN GPR.	14
FIGURA 2.2. FENÓMENOS DE REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN	22
FIGURA 3.1. PROCESO LÓGICO PARA LA DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE TUBERÍAS DE SAA EN IMÁGENES DE GPR .	25
FIGURA 3.2. ETAPAS DE LA METODOLOGÍA PLANTEADA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE PATRONES DE TUBERÍAS DE SAA EN IMÁGENES DE GPR.	26
FIGURA 3.3. TANQUE SOBRE EL QUE SE REALIZARON LOS ENSAYOS: A) DIMENSIONES, B) TUBERÍA DE POLIETILENO EN PROCESO DE ENTERRAR Y C) PLACA DE COBERTURA DEL TANQUE	28
FIGURA 3.4. CONFIGURACIÓN PARA LA TUBERÍA ENTERRADA: A) CORTE TRANSVERSAL, B) CORTE LONGITUDINAL (D = DIÁMETRO EXTERNO DE TUBERÍA, L = LONGITUD DE TUBERÍA, VER TABLA 3.1).....	28
FIGURA 3.5. EQUIPO DE GPR EMPLEADO EN LOS ENSAYOS: A) ANTENA, B) UNIDAD CENTRAL	29
FIGURA 3.6. CONFIGURACIÓN DE CAPTURA DE DATOS (RADARGRAMAS/PERFILES)	30
FIGURA 3.7. CONFIGURACIÓN DE LA CAPTURA DE VIDEOS.....	34
FIGURA 3.8. PROCEDIMIENTO DE REDIMENSIONAMIENTO.	37
FIGURA 3.9. IDENTIFICADORES EMPLEADOS EN LA DETECCIÓN DE LA ANTENA.....	37
FIGURA 3.10. PRIMER BLOQUE - PROCESO DE SELECCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE LAS 4 ESQUINAS QUE DELIMITAN EL ÁREA DE TRABAJO: A) HASTA H), SELECCIÓN DE LAS ESQUINAS, I) ÚLTIMA ESQUINA Y DELIMITACIÓN DEL PLANO DE REFERENCIA.....	39
FIGURA 3.11. PRIMER BLOQUE – EXTRACCIÓN DEL PLANO DE REFERENCIA: A) PUNTOS COPLANARES QUE DELIMITAN EL CONTORNO DEL PLANO DE REFERENCIA, B) PLANO DE REFERENCIA	40
FIGURA 3.12. BLOQUE 2. PASOS PARA LA DETECCIÓN DE LA ANTENA DENTRO DE LA SUPERFICIE DE CONTROL	42
FIGURA 3.13. GRÁFICO DE LOS TIEMPOS DE LA CÁMARA Y EL TIEMPO DE REGISTRO	44
FIGURA 3.14. A) PERFIL SIN REDIMENSIONAR, B) PERFIL REDIMENSIONADO.....	44
FIGURA 4.1. GENERACIÓN DE HIPÉRBOLAS EN LAS IMÁGENES DE GPR: A) HAZ DE ENERGÍA EMITIDO, B) TRAZAS GENERADAS, Y C) FORMA OBTENIDA EN LA IMAGEN (EN ESTE CASO HIPÉRBOLA).....	47
FIGURA 4.2. FORMAS ENCONTRADAS EN LOS PERFILES DE LAS IMÁGENES EN BRUTO: A) TRIÁNGULO INVERTIDO, B) HIPÉRBOLA, C) FONDO DEL TANQUE, D) LÍNEAS DIAGONALES (SENTIDO LONGITUDINAL DE LA TUBERÍA).....	48
FIGURA 4.3. PERFILES TRANSVERSALES DE ENSAYOS DE REFERENCIA. IMÁGENES EN BRUTO.....	49
FIGURA 4.4. PERFILES LONGITUDINALES DE ENSAYOS DE REFERENCIA. IMÁGENES EN BRUTO	50
FIGURA 4.5. PERFILES TRANSVERSALES DE ENSAYOS CON TUBERÍA DE PVC. IMÁGENES EN BRUTO	52
FIGURA 4.6. PERFILES LONGITUDINALES DE ENSAYOS CON TUBERÍA DE PVC. IMÁGENES EN BRUTO	53
FIGURA 4.7. PERFILES TRANSVERSALES DE ENSAYOS CON TUBERÍA DE PE. IMÁGENES EN BRUTO.....	54
FIGURA 4.8. PERFILES LONGITUDINALES DE ENSAYOS CON TUBERÍA DE PE. IMÁGENES EN BRUTO	56
FIGURA 4.9. PERFILES TRANSVERSALES DE ENSAYOS CON TUBERÍA DE ASBESTO CEMENTO (AC). IMÁGENES EN BRUTO.....	57
FIGURA 4.10. PERFILES LONGITUDINALES DE ENSAYOS CON TUBERÍA DE ASBESTO CEMENTO (AC). IMÁGENES EN BRUTO.....	58
FIGURA 4.11. PERFILES TRANSVERSALES DE ENSAYOS CON TUBERÍA FUND. IMÁGENES EN BRUTO	59
FIGURA 4.12. PERFILES LONGITUDINALES DE ENSAYOS CON TUBERÍA FUND. IMÁGENES EN BRUTO.....	60
FIGURA 4.13. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS ENSAYOS E IDENTIFICACIÓN DE PERFILES CON TUBERÍA (PERFILES EN ROJO). (A – E): PERFILES TRANSVERSALES; (F – J): PERFILES LONGITUDINALES; (A Y F): ENSAYOS DE REFERENCIA; (B Y G): ENSAYOS CON TUBERÍA DE PVC; (C Y H): ENSAYOS CON TUBERÍA DE PE; (D Y I): ENSAYOS CON TUBERÍA DE AC; (E Y J): ENSAYOS CON TUBERÍA FUND.....	61
FIGURA 5.1. PERFILES TRANSVERSALES. TUBERÍA DE PVC. CONTRASTE	64
FIGURA 5.2. PERFILES LONGITUDINALES. TUBERÍA DE PVC. CONTRASTE.....	66
FIGURA 5.3. PERFILES TRANSVERSALES. TUBERÍA DE PE. CONTRASTE	67
FIGURA 5.4. PERFILES LONGITUDINALES. TUBERÍA DE PE. CONTRASTE.....	69
FIGURA 5.5. PERFILES TRANSVERSALES. TUBERÍA DE AC. CONTRASTE	70

FIGURA 5.6. PERFILES LONGITUDINALES. TUBERÍA DE AC. CONTRASTE	71
FIGURA 5.7. PERFILES TRANSVERSALES. TUBERÍA FUND. CONTRASTE.....	73
FIGURA 5.8. PERFILES LONGITUDINALES. TUBERÍA FUND. CONTRASTE	74
FIGURA 5.9. RANGOS DE COLOR PARA CADA MATERIAL: A) PERFILES TRANSVERSALES, B) PERFILES LONGITUDINALES	75
FIGURA 5.10. FORMAS ENCONTRADAS EN LAS IMÁGENES RESULTANTES DE LOS CONTRASTES.....	77
FIGURA 5.11. FORMAS PROMEDIO	80
FIGURA 5.12. RECONSTRUCCIÓN DE TUBERÍAS EN MODELOS 3D: A) TUBERÍA DE PVC, B) TUBERÍA DE PE, C) TUBERÍA DE AC, D) TUBERÍA FUND.....	81

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Los sistemas de abastecimiento de agua (SAA) son uno de los servicios de mayor relevancia en las grandes ciudades ya que, en gran medida, de ellos depende su desarrollo. Por ello, resulta necesario conseguir un funcionamiento óptimo de la red en todos sus aspectos.

Para que sea posible aplicar una gestión óptima del sistema, es necesario tener conocimiento detallado del mismo, de su trazado y de las características de sus componentes. Sin embargo, no es posible esto en muchos países en desarrollo, ya que estas características no son conocidas, debido a que no se realiza un control exhaustivo sobre los mismos, lo que genera un amplio desconocimiento de las condiciones bajo las que trabaja la red. Esto dificulta considerablemente emprender acciones y tomar decisiones relativas a la gestión técnica de los SAA, para su mejor funcionamiento.

Las inspecciones periódicas en las redes de abastecimiento urbano son indispensables, ya que permiten detectar problemas tales como fugas, anomalías en la red o el deterioro de la misma, y obstrucciones, entre otros. Estas acciones sobre la red conllevan, generalmente, un impacto económico y social elevado, debido a que suelen ser llevadas a cabo mediante metodologías convencionales (por ejemplo, mediante excavación). Este es el motivo por el que los métodos no destructivos adoptan un papel importante en la hidráulica urbana, siendo de gran ayuda para realizar inspecciones de la red sin costes sociales y económicos elevados y, además, aportando información relevante sobre la red. Sin embargo, a pesar de que la recuperación de información mediante métodos no destructivos es una buena alternativa, factores tales como la complejidad de la disposición espacial de las redes de agua y saneamiento, junto con el constante crecimiento de las ciudades y el enorme volumen de información generado,

dificultan la interpretación y el análisis de los datos obtenidos con estos métodos, por lo que es necesario un alto nivel de habilidad y experiencia por parte de los operarios para extraer conclusiones relevantes de los datos obtenidos.

Uno de los métodos no destructivos que ha tomado más fuerza en la búsqueda e inspección de activos en la hidráulica urbana es el georadar (radar del subsuelo) o también conocido como GPR (Ground Penetrating Radar). El GPR permite la inspección y caracterización del subsuelo de forma no invasiva, por lo que resulta una herramienta muy útil para la delimitación y caracterización de estructuras hidráulicas en el subsuelo. A diferencia de otros métodos no destructivos, el GPR permite la identificación de materiales tanto metálicos como no metálicos, tal es el caso de las tuberías (Cist et al., 2001; Takahashi, 2006). El GPR basa su funcionamiento en la emisión de impulsos electromagnéticos de muy corta duración que penetran en el suelo y se transmiten y reflejan a través de los estratos. Parte de esa energía emitida por los pulsos se refleja, registrándose mediante una antena receptora en la superficie, mientras que otra parte continúa transmitiéndose a profundidades mayores (Bereciartua et al., 2011). Los registros de la energía capturada son colectados en el tiempo, y se representan gráficamente en los radargramas, que son la base de estudio en este trabajo.

Esta investigación pretende ser un primer avance hacia el desarrollo de una herramienta que permita la localización de componentes de SAA urbanos, específicamente tuberías, con el uso de GPR como método no destructivo. El objetivo es proveer a los SAA de información suficiente de sus activos, con un impacto económico y social bajo, que favorezcan una gestión óptima de los mismos. El planteamiento para la resolución de esta problemática, se lleva a cabo mediante la evaluación de la viabilidad de identificación de patrones de tuberías enterradas comúnmente empleadas en los SAA, con los que sea posible su caracterización en imágenes de GPR. Para ello se realizaron ensayos en laboratorio con tuberías de diferentes materiales enterradas y bajo condiciones controladas de laboratorio. La información obtenida de los ensayos fue procesada mediante una metodología propia, cuyo planteamiento se plasma en este documento, lo que permitió identificar algunos patrones de las tuberías estudiadas que, adicionalmente, permiten la reconstrucción de las mismas en modelos 3D. Además, esta información puede servir como punto de partida para el entrenamiento de un sistema inteligente de análisis de datos que permita la localización automática de tuberías en los SAA mediante GPR.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo general

Generar una herramienta metodológica que permita avanzar hacia la localización automática de tuberías mediante el uso del GPR como técnica de inspección no destructiva, para el análisis de componentes de los SAA, por medio de la identificación de patrones en imágenes de GPR.

1.2.2 Objetivos específicos

- Captura de imágenes de GPR en un tanque con suelo seco con tuberías de diferentes materiales comúnmente empleados en los SAA y sin tubería (ensayo de comparación).
- Análisis de la información de los radargramas en bruto obtenida de los ensayos de laboratorio identificando características de las tuberías y de su entorno (tanque, suelo, etcétera).
- Generación de una herramienta metodológica que permita hacer un ajuste de la métrica de las imágenes de GPR obtenida en los ensayos.
- Contraste entre las imágenes en bruto de los ensayos con tubería, contra las imágenes en bruto de los ensayos sin tubería.
- Identificación y análisis de los patrones obtenidos en los contrastes, para la reconstrucción de la traza o imagen de las tuberías enterradas.
- Establecimiento de conclusiones y recomendaciones para su consideración en casos reales.

1.3 Justificación

En muchas ciudades del mundo, los problemas relacionados con las infraestructuras de los SAA van en aumento, puesto que su uso continuo provoca que vayan deteriorándose con el tiempo y que su funcionamiento no sea el óptimo. Para poder emprender acciones referentes a los SAA, es necesario conocer el estado de funcionamiento de la red. Sin embargo, esto resulta sumamente complejo ya que, por lo general, no se realiza un control exhaustivo de las tuberías instaladas ni de los cambios que se realizan en el sistema por lo que, en muchos

casos, las características de las tuberías (diámetro, material, estado, tiempo de uso, etcétera) son totalmente desconocidas (Ayala-Cabrera et al., 2009).

Para tener conocimiento del funcionamiento de las redes de abastecimiento urbanas es necesario realizar inspecciones periódicas de la red. Sin embargo, en múltiples ocasiones, el trazado de la red es desconocido o está representado de forma errónea. Generalmente, este problema se afronta mediante el uso de métodos convencionales de inspección, tales como las catas, lo que implica la remoción de gran volumen de suelo, provocando costes económicos y sociales elevados. Es así como han tomado protagonismo los métodos de inspección de características no destructivas, ya que facilitan la inspección de subsuelo en búsqueda de la infraestructura, sin generar grandes molestias a los ciudadanos y con un bajo coste económico.

El conocimiento de los componentes de los SAA es fundamental, ya que permite la detección de fallos en la red tales como fugas, acometidas ilegales u otros. Esto favorece la toma de decisiones para una adecuada gestión de las redes en aspectos como el mantenimiento, rehabilitación o renovación de los componentes, con el objetivo de brindar un mejor servicio a la sociedad.

Debido a la importancia del conocimiento de su infraestructura para los SAA, se han desarrollado múltiples trabajos relacionados con la localización y caracterización de componentes de dichos sistemas empleando el GPR. En esta línea encontramos trabajos como el de Ayala-Cabrera et al. (2010), en el que se pretende mejorar la visualización de tuberías plásticas en imágenes de GPR. De igual forma, se presentan trabajos donde se propone la localización de tuberías plásticas a partir del uso de sistemas multi-agente, como el planteado por Ayala-Cabrera et al. (2011). Además, se han desarrollado trabajos donde se propone un sistema de reconocimiento de patrones para la extracción de características de objetos enterrados (Pasolli et al.; 2009), o como en el trabajo de Ocaña-Levario et al. (2013), donde se propone el reconocimiento de patrones para localizar elementos plásticos aplicando un sistema de sustracciones entre imágenes en bruto, o bien el trabajo desarrollado por Maas et al. (2013), donde se busca la localización automática de hipérbolas (traza teórica en el radargrama de una sección circular) en las imágenes en bruto, utilizando un algoritmo de aprendizaje y la transformada de Hough, entre otros. De igual manera, se encuentran trabajos en los que se hace uso de la realidad aumentada en conjunto con el GPR para la visualización automática de tuberías en los sistemas de abastecimiento de agua, como el de Ayala-Cabrera

et al. (2013a). Estos trabajos muestran la efectividad y viabilidad del empleo del GPR como herramienta no destructiva para la localización de componentes de sistemas de abastecimiento. Sin embargo, la complejidad del análisis de los datos sigue siendo uno de los grandes problemas a los cuales se enfrenta el personal que emplea dicha herramienta. Así pues, este trabajo se plantea como un primer avance hacia el desarrollo de una herramienta automática que permita conocer los trazados y las características de componentes de los SAA, para proveer herramientas que permitan una adecuada visualización de los resultados obtenidos, tratando de facilitar la inspección de la red por parte de los operarios.

1.4 Organización del documento

En el capítulo 1 se ha presentado una introducción del trabajo a desarrollar, y han sido explicados brevemente los objetivos de la tesina. En el capítulo 2 se realiza una breve introducción a los métodos no destructivos, donde destaca el GPR, además de realizar una breve descripción del método de GPR, sus características y principios de funcionamiento, así como las bases teóricas por las que se rige. En el capítulo 3 se plantean los principios de la metodología propuesta y aplicada a lo largo del desarrollo del trabajo, tales como el proceso de obtención de datos, captura y configuración de ensayos, así como, el redimensionamiento de radargramas (imágenes de GPR), método aplicado para redimensionamiento, métrica utilizada, proceso de contraste e identificación de patrones. En el capítulo 4 son presentados, analizados y comparados entre sí los resultados obtenidos de los ensayos realizados. Adicionalmente, en el capítulo 5, se muestran los resultados de los radargramas contrastados y su análisis individual. En este capítulo también se muestran las características extraídas de estas imágenes, y los patrones obtenidos son explicados en unos gráficos mostrando las diferencias entre ellos. Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones de este trabajo y se indican las posibles líneas de investigación futuras.

CAPITULO II

GPR, PRINCIPIOS, FUNDAMENTOS Y BASES TEORICAS

2.1 Introducción

La posibilidad de una exploración del subsuelo, basada exclusivamente en medidas realizadas desde la superficie (métodos no destructivos), puede abrir las puertas a múltiples aplicaciones donde se den restricciones de coste y riesgo. La explotación de la diferencia entre las propiedades de materiales de interés económico y el resto de suelo es común en la exploración del subsuelo (petróleo, aguas subterráneas, minerales, infraestructura enterrada, etc.). También se realizan prospecciones de soporte a la Ingeniería Civil, como el estudio de las condiciones de cimentación de presas o edificios, o de los materiales a extraer para la construcción de una nueva carretera. Existen también otras aplicaciones, como la orientación de excavaciones arqueológicas o la localización de galerías subterráneas.

Hay diversos métodos geofísicos que permiten la detección de infraestructuras enterradas desde la superficie. Destacan entre los grupos más importantes: el gravimétrico, la magnetometría, el sísmico (de refracción y de reflexión), los métodos eléctricos, potencial espontáneo, los métodos acústicos y combinaciones de ellos como los electromagnéticos.

De estos grupos destacan como técnicas más empleadas para la inspección de tuberías en los SAA, las siguientes: *eddy currents*, impacto-eco, flujo magnético, métodos de sonar, pruebas de ultrasonidos, métodos de inducción de pulsos, localizadores magnéticos, métodos de resistividad, prueba gráfica de radio, medidores de inspección de tuberías, rayos-X y georadar (GPR). La diversidad de técnicas de cada uno tiene ventajas y desventajas. Por ejemplo, el método *eddy currents* y los métodos electromagnéticos se utilizan para la inspección de tuberías metálicas, mientras que la emisión acústica y el impacto-eco se utilizan para tuberías de hormigón (Rizo, 2010). Los métodos de inducción de pulsos y los métodos de resistividad

son útiles en la localización de objetos metálicos. Por otra parte, además de la detección de tuberías metálicas, el GPR ha mostrado una mayor capacidad en la detección de tuberías no metálicas en comparación con otros métodos mencionados (Cist et al., 2001; Takahashi, 2006). El principio en el que se basa la detección de tuberías enterradas con GPR explota las diferencias entre las propiedades dieléctricas de las tuberías y el suelo que las rodea, de modo que las tuberías metálicas pueden ser fácilmente detectadas en las imágenes resultantes. Sin embargo, si el material del tubo tiene propiedades dieléctricas similares a las de suelo, la detección puede ser difícil (Loulizi, 2001), tal y como ocurre con las tuberías plásticas. Debido al gran espectro de materiales que pueden ser detectados por el GPR, en esta investigación se ha seleccionado éste como método no destructivo en la identificación de tuberías enterradas.

En este capítulo se hace una breve introducción a la evolución histórica del GPR y se definen las características generales, los principios fundamentales del funcionamiento y sus aplicaciones. Este capítulo pretende proporcionar el contexto con respecto al equipo empleado en este trabajo, debido a que los datos obtenidos con el mismo (imágenes de GPR) serán la base para el desarrollo del trabajo.

2.2 Evolución histórica del GPR

La historia del GPR es relativamente corta, y puede ser dividida en cuatro etapas de desarrollo. La primera etapa fue caracterizada por los primeros trabajos experimentales con este equipo. La primera aplicación para encontrar objetos metálicos por medio de energía electromagnética (EM) se atribuye a Hulsmeyer en 1904. Lowy en 1911, desarrolló una técnica capaz de indicar la profundidad de las capas del subsuelo de manera aproximada, pero el uso del GPR para el mapeo a través de materiales geológicos fue realizado por primera vez por Stern en 1930, cuando intentaba determinar la profundidad de un glaciar.

Sin embargo, no fue sino hasta la década de 1960 que el interés en la tecnología del radar para aplicaciones de imágenes del subsuelo comenzó a tomar fuerza. La segunda etapa se caracterizó por el desarrollo de sistemas construidos con propósitos específicos. Los primeros sistemas fueron diseñados para aplicaciones tales como las mediciones del espesor de capas de hielo, el mapeo de las estructuras de roca en minas subterráneas, y la localización de

tuberías y sus componentes. Algunos trabajos tuvieron por objeto la medición de la profundidad de cuerpos de agua superficial. Sin embargo, el estudio de glaciares y capas de hielo, así como para mapeo de minas de sal y carbón, protagonizaron estos primeros trabajos con GPR.

La tercera etapa de desarrollo comenzó con el desarrollo del primer sistema analógico comercial de GPR (Lerner, 1974), con lo cual, el nivel de actividad aumentó considerablemente, con una variedad de aplicaciones. Sin embargo, el desempeño moderado de los primeros sistemas comerciales y la falta de capacidad de procesamiento de datos digitales limitaron su utilidad. Estos sistemas solían ser grandes y pesados, por lo que dificultaban su uso.

A mediados de la década de 1980, el primer sistema digital de GPR fue introducido por Sensors y Software de Mississauga, Ontario (Canadá), comenzando así la cuarta y más reciente etapa de desarrollo. Este sistema consiguió un mayor rendimiento, lo que permitió mayor profundidad de penetración y la generación de datos digitales para su procesamiento informático y manipulación.

A partir de la década de 1990, el GPR ha llegado a ser una herramienta estándar para geología, geotécnica y aplicaciones ambientales. Los sistemas actuales cuentan con rápidos procesadores de datos y sistemas de transferencia de datos, tienen diseños robustos y son suficientemente pequeños para ser fácilmente transportados (Moorman, 2001).

2.3 Aspectos generales del GPR

Actualmente existen numerosos métodos no destructivos que facilitan la inspección del suelo poco profundo. Estos métodos presentan un enorme potencial en cuanto a su capacidad para caracterizar el subsuelo de forma precisa y no invasiva (Bonomo et al., 2010). Sin embargo, presentan el inconveniente de que, generalmente, su uso conlleva que el usuario deba ser un experto en la adquisición y, principalmente, en la interpretación y análisis de los datos obtenidos.

Dentro de la gran variedad de métodos existentes destacamos, para nuestro estudio, el GPR, por su efectividad para localizar servicios urbanos enterrados (Ballester et al., 2012). El GPR

es una técnica no destructiva de prospección geofísica, que ha sido utilizado ampliamente como herramienta para la investigación del subsuelo poco profundo y que permite su inspección sin alterarlo, obteniendo como respuesta mapas detallados del subsuelo que facilitan detectar y ubicar estratos, así como objetos enterrados con una alta precisión en un tiempo relativamente corto, permitiendo realizar inspecciones con costos razonables y bajo condiciones no destructivas.

El empleo del GPR se ha ido popularizando desde la década de los 70, momento en el que aparecen los primeros trabajos publicados (Biskup et al.; 2005), hasta nuestros días, debido a la gran variedad de aplicaciones que el método presenta. Dentro de las múltiples aplicaciones destaca el uso en el ámbito geológico, minero, estudios medioambientales, arqueológicos, geotecnia, glaciología, hidrología, en ingeniería civil para el análisis de construcciones y estructuras tales como carreteras o puentes (Bereciartua-Pérez et al., 2011) y actualmente dentro de las múltiples aplicaciones, para la localización de servicios urbanos enterrados, así como las posibles anomalías presentes en ellos, entre muchísimas más aplicaciones.

El método del GPR se basa en la emisión de ondas electromagnéticas mediante una antena emisora ubicada en la superficie del terreno. La señal se propaga, en profundidad, por el interior del medio y se refleja en las superficies de contacto que separan dos materiales caracterizados por parámetros electromagnéticos distintos. En cada una de estas discontinuidades, parte de la energía que incide se refleja y se propaga hacia la superficie, y parte de la energía incidente se propaga, modificando su dirección, hacia el interior del medio. La señal reflejada alcanza la superficie, donde una antena receptora la detecta, registrando su tiempo de llegada y su amplitud (Ballester et al., 2012). En la Figura 2.1, se presenta esquemáticamente el principio de funcionamiento del método.

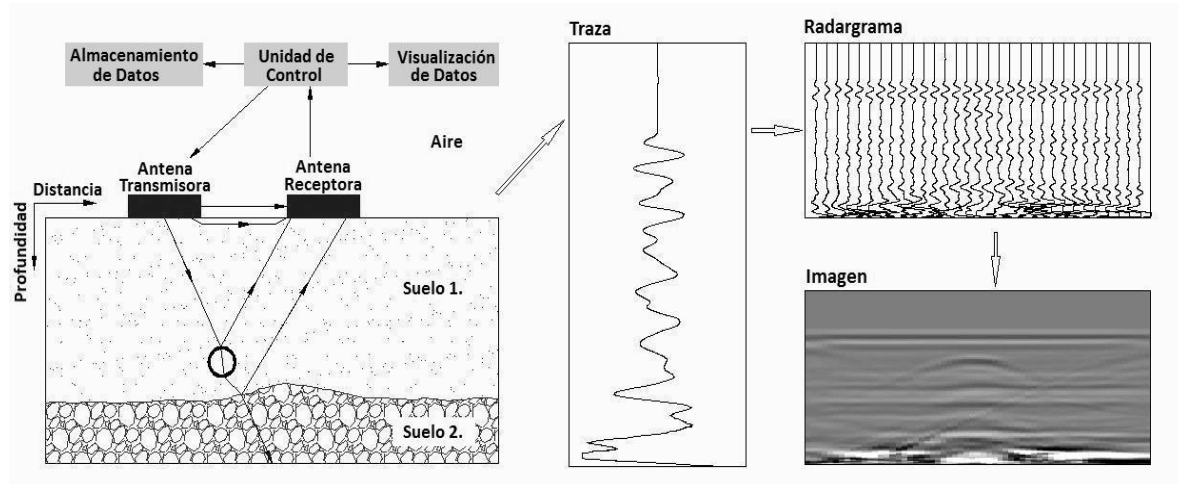


Figura 2.1. Captura de imágenes con prospección GPR. [Fuente: Ayala-Cabrera et al., 2011]

Como se puede observar en la Figura 2.1, al ir desplazando la antena sobre la superficie del terreno será posible registrar la historia de las reflexiones detectadas en el subsuelo bajo la línea de desplazamiento del equipo (Biskup et al., 2005). El resultado obtenido es un perfil vertical continuo del subsuelo, en el cual la abscisa corresponde a la distancia recorrida y la ordenada al tiempo que tarda la onda en encontrar la superficie reflectante y volver al receptor. Estos registros obtenidos son denominados radargramas, y constituyen una acumulación sucesiva de trazas, las cuales son señales que se van registrando a través del tiempo y contienen las características electromagnéticas del medio atravesado. Al radargrama obtenido, para su mejor visualización, se le suele aplicar una escala de color (generalmente en tonalidades de grises), obteniendo así una imagen. Esta última es de particular interés, ya que es nuestro punto de partida y la base para el desarrollo de esta investigación.

Los datos obtenidos mediante GPR dependen en gran medida de las propiedades electromagnéticas del suelo y de su composición. Cada medio posee unas características electromagnéticas propias (permitividad, permeabilidad magnética y conductividad eléctrica) y estas, a su vez, se ven afectadas por factores tales como la composición del suelo, existencia de fluidos, condiciones térmicas y de presión, así como del intervalo de frecuencias empleadas en la emisión de ondas electromagnéticas al medio (Bereciartua et al., 2011).

Los equipos GPR se fundamentan en la capacidad de las ondas de radar de alta frecuencia (aproximadamente en el rango 10 MHz - 2.5 GHz) para propagarse a través de medios poco conductivos, y encontrar las discontinuidades o los cambios de material en el subsuelo. La

propagación de las ondas está condicionada por las características electromagnéticas del medio de propagación. La obtención de buenos resultados al aplicar este método dependerá de las características del subsuelo, existencia de suficiente contraste electromagnético entre ambos medios, así como de la habilidad y experiencia del operador para manejar el GPR e interpretar los datos obtenidos.

Un sistema de GPR básico está constituido por una unidad central con monitor incorporado y una o varias antenas. Existen dos tipos de antenas: las monoestáticas y las biestáticas. Las antenas monoestáticas reúnen emisor y receptor en la misma antena, mientras que las antenas biestáticas cuentan con un emisor y un receptor separados físicamente. Cabe señalar que para el desarrollo del presente trabajo se ha utilizado una antena monoestática apantallada del tipo habitual para trabajos en un entorno urbano. Por otra parte, las antenas de un sistema son intercambiables y deben seleccionarse en función de la profundidad deseada para la prospección y la resolución demandada. Dentro de las diversas antenas existentes podemos encontrar: antenas de frecuencia entre 50-200 MHz, de alta penetración (10-30m), antenas de 500 MHz, que proporcionan buena penetración (3-5m) y resolución, y, para estudios de alta resolución, se emplean antenas de alta frecuencia entre 800 y 1.5 GHz, que difícilmente penetran más allá de 1 metro. Además, la unidad central es de gran importancia ya que es donde se configura la adquisición de datos, se gestionan las antenas y se da salida a los datos adquiridos. Asimismo, es posible visualizar en tiempo real la prospección realizada en el momento, lo cual permite a expertos realizar un análisis in-situ de la zona prospectada (Biskup et al., 2005). También es importante indicar que la unidad central funciona gracias a un programa informático implementado que controla la emisión, la recepción y el registro de la energía. Opcionalmente, pueden añadirse al equipo básico algunos accesorios tales como teclado, odómetros y material topográfico y fotográfico, entre otros (Vega, 2001).

Finalmente, es importante mencionar que el GPR es una técnica rápida en su ejecución y aplicable en muchos entornos, sobre todo y para nuestro estudio, en entornos urbanos. Por otra parte, el GPR genera una imagen del subsuelo que supera en resolución a cualquier otro método de prospección (Biskup et al., 2005), permitiendo la identificación y localización de objetos enterrados, tanto metálicos como no metálicos (Vega, 2001), con gran exactitud y en tiempos relativamente cortos. Además, es posible la visualización en tiempo real de los radargramas en bruto, aportando información instantánea sobre el propio terreno, lo que implica, por otra parte, que el usuario debe ser experto en la interpretación de las señales de

GPR, lo cual representa una gran desventaja. Entre otras limitaciones encontramos que el método presenta una penetración limitada en el subsuelo. Por otra parte, el éxito de la técnica dependerá de las características naturales del terreno, ya que pueden llegar a atenuar totalmente la señal, haciendo inútil su aplicación. Otro de los factores que puede llegar a originar interpretaciones erróneas se relaciona con la presencia cercana de fuentes emisoras de campos electromagnéticos intensos y el empleo de teléfonos móviles por parte de los operarios (Biskup et al., 2005; Bereciartua et al., 2011). Por consiguiente, deducimos que el funcionamiento adecuado de la técnica dependerá de las características naturales del terreno, del equipo utilizado y de la correcta interpretación de los datos.

2.4 Bases teóricas del GPR

La base teórica de este método de prospección electromagnética se asienta en las ecuaciones desarrolladas por el físico escocés James Clerk Maxwell, quien resumió el trabajo de numerosos investigadores, dando lugar a las llamadas ecuaciones de Maxwell, formuladas en 1867. A continuación se presentan las ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \vec{D} = \rho_f \text{ (Ley de Gauss para el campo eléctrico),} \quad \text{(Ecuación 2.1)}$$

$$\nabla \vec{B} = 0 \text{ (Ley de Gauss del magnetismo),} \quad \text{(Ecuación 2.2)}$$

$$\nabla \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{M} \text{ (Ley de Faraday),} \quad \text{(Ecuación 2.3)}$$

$$\nabla \vec{H} = -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \text{ (Ley de Ampere generalizada).} \quad \text{(Ecuación 2.4)}$$

\vec{E} y \vec{H} representan la intensidad del campo eléctrico (V/m) y la intensidad del campo magnético (A/m) respectivamente, \vec{B} es la inducción magnética (W/m^2), \vec{M} es la imanación (en A/m), \vec{D} es el vector de desplazamiento eléctrico (C/m^2), ρ_f es la densidad de carga libre (C/m^3) y, finalmente, \vec{J} es la densidad de corriente debida al movimiento de cargas en la materia (A/m^2), y comprende tanto la densidad de corriente de cargas libres como la densidad de corriente de polarización y la densidad de corriente equivalente en materia imanada (Vega, 2001).

Cuando se consideran distribuciones superficiales de carga, es decir, donde existen discontinuidades en el subsuelo, las relaciones descritas por Maxwell se complementan con otras denominadas ecuaciones constitutivas. Estas ecuaciones incluyen parámetros que caracterizan los medios (Sánchez, 2004), permitiendo determinar el comportamiento de las ondas del GPR durante su propagación por el subsuelo.

Las ecuaciones constitutivas, que se presentan a continuación, relacionan la intensidad de los campos eléctrico y magnético con el desplazamiento eléctrico y la inducción magnética, respectivamente:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu}, \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}. \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

Estas ecuaciones son válidas para medios homogéneos e isótropos. Las ecuaciones constitutivas tienen una expresión sencilla, relacionando estas magnitudes por medio de la permitividad dieléctrica (ϵ), la conductividad (σ) y la permeabilidad magnética (μ) del material (Vega, 2001).

2.4.1 Ecuación del GPR

La ecuación del GPR es una referencia importante para definir un sistema de radar ya que relaciona las características de la antena emisora y las propiedades del medio (que producen la atenuación de la señal) con dicha potencia emitida por la antena y la potencia recibida tras una reflexión.

La ecuación del GPR para equipos monoestáticos (emisor-receptor en una misma antena), 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.

$$Q = \frac{P_R}{P_E} = \frac{\lambda^2}{4\pi} * G^2 * \frac{S}{(4\pi r^2)^2} * e^{-4ar} \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

donde λ representa la longitud de onda en aire, G la ganancia de la antena, S la superficie efectiva del reflector, a es la constante de atenuación y finalmente r representa la distancia al reflector. De la ecuación 2.8, se obtiene la relación entre amplitudes de onda (Q_{Amp}) recibida, A_R , y emitida, A_E , de la siguiente manera (Göttsche, 1997):

$$Q_{Amp} = \frac{A_R}{A_E} \propto \sqrt{\frac{1}{r^4} * e^{-4ar}} = \frac{e^{-2ar}}{r^2}. \quad (\text{Ecuación 2.9})$$

2.5 Parámetros que caracterizan el comportamiento de las ondas en el medio.

El comportamiento de las ondas electromagnéticas que se propagan a través de un material (suelo) está determinado, en gran medida, por tres parámetros que definen sus características electromagnéticas; tales parámetros son: conductividad eléctrica, permitividad dieléctrica o constante dieléctrica relativa y permeabilidad magnética. Además, estos parámetros a su vez se ven afectados por la composición del suelo.

2.5.1 Conductividad eléctrica (σ)

La conductividad de un medio proporciona una medida de la capacidad de un material de conducir corriente eléctrica. Es así cómo materiales muy conductivos transportaran con mayor facilidad la energía, obteniéndose mayor penetración de la parte eléctrica de la onda electromagnética y disipación o atenuación del objeto en la imagen obtenida (Dojack, 2012).

Las unidades de medida de la conductividad, en el S.I., son ohms/metro o el equivalente de Siemens/metro. La conductividad de un medio es la inversa de su resistividad (medida en Ohmios, Ωm). En general se puede distinguir entre materiales conductores, semiconductores y aislantes. Este parámetro es muy variable, ya que depende de la temperatura, la humedad ambiental y la capacidad del medio para retener dicha humedad (García, 2012).

2.5.2 Permitividad eléctrica (ϵ)

La permitividad es una constante que da una 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 relativa del vacío es 1. Para la mayoría de los materiales se puede encontrar que en el subsuelo, al realizar una prospección electromagnética, los valores de la permitividad relativa se encuentran entre 1 (la del aire) y 81, siendo esta última la constante dieléctrica del agua a 20° de temperatura.

2.5.3 Permeabilidad magnética (μ)

La permeabilidad magnética es la capacidad que posee un medio para atraer y hacer pasar a su través un campo magnético. Es una medida que nos proporciona su capacidad de almacenar energía magnética y únicamente los medios de composición ferromagnética (que pueden ser atraídos por un imán) tienen esta capacidad (García, 2012). El resto no son capaces de almacenar esta energía. Esta constante es intrínseca del medio y se denomina μ_r (constante relativa del medio).

La permeabilidad magnética relaciona la inducción magnética, \vec{B} , con la intensidad del campo magnético, \vec{H} , definiendo una de las ecuaciones constitutivas del electromagnetismo, explicadas anteriormente:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}. \quad (\text{Ecuación 2.10})$$

Donde μ es a su vez el producto de la permeabilidad magnética en el vacío ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m) y la permeabilidad relativa (μ_r) del medio. Se mide en Henri/metro:

$$\mu = \mu_r \times \mu_0. \quad (\text{Ecuación 2.11})$$

2.5.4 Velocidad de propagación y longitud de onda

A partir de las ecuaciones desarrolladas por Maxwell, dada una onda plana que se propaga en un medio, es posible calcular las relaciones que definen la propagación de las ondas electromagnéticas en un material.

2.5.4.1 Velocidad de propagación de onda

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

$$V_m = \frac{c}{\sqrt{\left(\frac{\epsilon_r \mu_r}{2}\right)((1+P^2)+1)}}, \quad (\text{Ecuación 2.12})$$

donde P , factor de pérdida, es definido por $\sigma/\omega\epsilon$, siendo σ la conductividad, $\omega = 2\pi f$ donde f es la frecuencia, y ϵ es la constante dieléctrica absoluta. En un material con un bajo factor de pérdida $P \rightarrow 0$, además, para medios no magnéticos, suponemos $\mu_r = 1$; entonces la velocidad de la onda electromagnética se simplifica y viene dada por:

$$V_m = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{0.3}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ m/ns}, \quad (\text{Ecuación 2.13})$$

donde c es la velocidad de propagación de una onda electromagnética en el vacío, que es definida por la relación entre la permeabilidad magnética en el vacío y la permitividad dieléctrica en el vacío, dando como resultado $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 30 \text{ cm/ns}$.

La profundidad de penetración (D), puede ser determinada a partir de la velocidad en el medio V_m determinada mediante la ecuación 2.12.

$$D = \frac{T \times V_m}{2} \quad (\text{Ecuación 2.14})$$

Finalmente, el tiempo doble de propagación puede ser determinado mediante la representación gráfica de las señales del GPR.

2.5.4.2 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 la onda emitida. Como en la expresión aparecerán parámetros de la propagación en el vacío, podemos relacionarlo con la longitud de la onda en el vacío:

$$\lambda_m = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega} v = \frac{2\pi}{\omega} \frac{c}{Re\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} = \frac{\lambda_0}{Re\sqrt{\epsilon_r\mu_r}}, \quad (\text{Ecuación 2.15})$$

donde λ_0 es la longitud de onda en el vacío.

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

$$\lambda_m = \frac{\lambda}{Re\sqrt{\epsilon_r}}. \quad (\text{Ecuación 2.16})$$

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

2.5.5 Atenuación

Se denomina 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:

$$\alpha = \frac{\omega}{c} Im\sqrt{\epsilon_r\mu_r}. \quad (\text{Ecuación 2.17})$$

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

2.5.6 Reflexión y Refracción

Cuando la energía electromagnética emitida por el GPR alcanza una discontinuidad en los parámetros electromagnéticos del medio por el cual se propaga, se producen los fenómenos de

reflexión y de refracción, lo que está relacionado con el cambio en la dirección de propagación de la señal (es decir, el frente de onda se refracta), de conformidad con la ley de Snell, en la que se relacionan los ángulos de incidencia, reflexión y refracción con las velocidades de propagación de las ondas en los dos medios que están en contacto. En la Figura 2.2 se presentan esquemáticamente los fenómenos de reflexión y refracción de la energía.

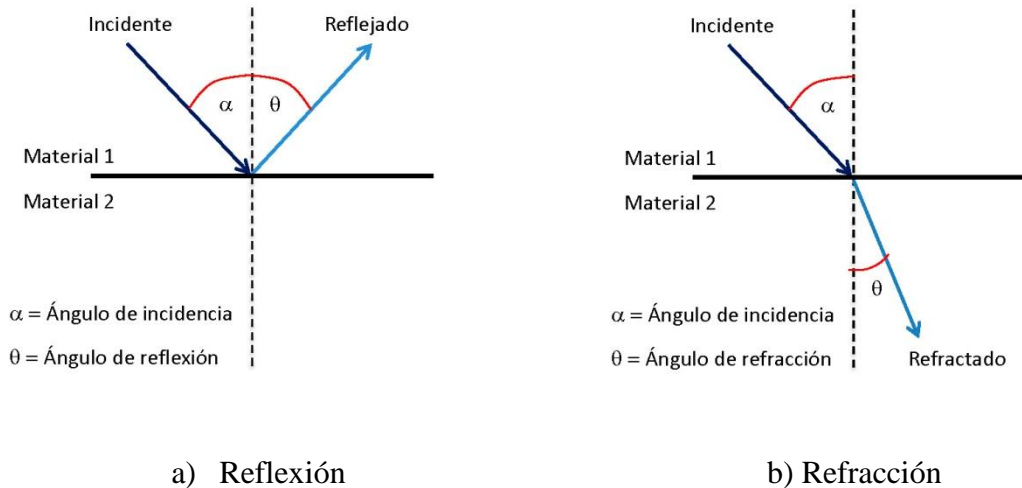


Figura 2.2. Fenómenos de Reflexión y Refracción

Una onda es reflejada cuando alcanza una discontinuidad en el material y varían las propiedades de éste. El ángulo de reflexión es el mismo que el ángulo de incidencia, por lo general, tomando como referencia la perpendicular a la superficie. Por otra parte, el cambio de la señal se presenta cuando se pasa de un medio a otro con diferente velocidad (diferente índice de refracción), con un ángulo de incidencia diferente a cero grados respecto a la normal de la interfase.

La impedancia de un campo electromagnético es el cociente entre el campo eléctrico y el campo magnético, pudiendo definirse 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:

$$\eta_1 = \left\{ \frac{\vec{E}_i}{\vec{H}_i} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \right\} = \left\{ \frac{\vec{E}_r}{\vec{H}_r} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \right\}, \quad (\text{Ecuación 2.18})$$

$$\eta_2 = \left\{ \frac{\vec{E}_t}{\vec{H}_t} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_{r2}}{\epsilon_0 \epsilon_{r2}}} \right\}. \quad (\text{Ecuación 2.19})$$

A partir de las expresiones de las impedancias se pueden 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 las siguientes expresiones:

$$R_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{E}_r}{\vec{E}_i} = \frac{\eta_2 \cos(at) - \eta_1 \cos(ai)}{\eta_1 \cos(ai) + \eta_2 \cos(at)}, \quad (\text{Ecuación 2.20})$$

$$T_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{E}_t}{\vec{E}_i} = \frac{2\eta_2 \cos(at)}{\eta_1 \cos(ai) + \eta_2 \cos(at)}, \quad (\text{Ecuación 2.21})$$

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, \vec{E}_i es el campo incidente, \vec{E}_r el campo reflejado y \vec{E}_t el campo refractado o transmitido.

En los estudios que se realizan con GPR pueden simplificarse estas expresiones ya que el sistema opera con ángulos de reflexión muy pequeños, 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 GPR, la expresión de los coeficientes queda como:

$$R = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}, \quad (\text{Ecuación 2.22})$$

$$T = \frac{2\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}. \quad (\text{Ecuación 2.23})$$

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 Ecuaciones 2.22 y 2.23, 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 GPR, 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).

CAPITULO III

CASO DE ESTUDIO, MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Introducción

En este capítulo se describe el caso de estudio, así como los diferentes procesos metodológicos planteados para el reconocimiento de patrones de tuberías en imágenes de GPR. Para ello se presentan las características generales bajo las cuales se plantearon los ensayos en el laboratorio para la obtención de los radargramas, definiendo la configuración de los ensayos, así como el equipo y los parámetros del equipo establecidos para el desarrollo de la investigación. Por otro lado, se debe tener en cuenta que con este trabajo se pretende reconocer patrones de tuberías enterradas en SAA en imágenes de GPR, que favorezcan procesos posteriores de localización automática de estos patrones.

El planteamiento esquemático para la detección de tuberías que se realiza actualmente en campo se presenta en la Figura 3.1.

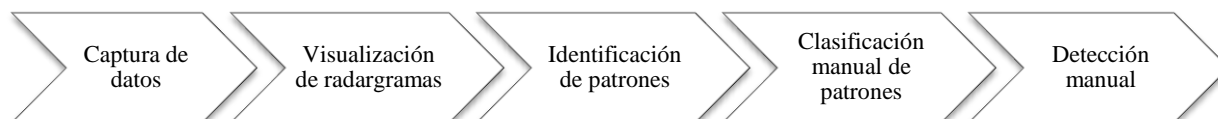


Figura 3.1. Proceso lógico para la detección manual de tuberías de SAA en imágenes de GPR

Los datos capturados mediante el GPR son visualizados directamente en campo. Sobre estas visualizaciones el operario identifica las anomalías y, basado en su nivel de experiencia, las clasifica. Estas clasificaciones son marcadas en el suelo y su continuidad espacial es

determinada, localizando con ello el trazado de la tubería. Con este trazado el experto reevalúa las visualizaciones y, conforme a su interpretación, determina el material de la tubería encontrada. Tomando como base esta forma típica de procedimiento, la metodología planteada en este documento se esquematiza en la Figura 3.2.

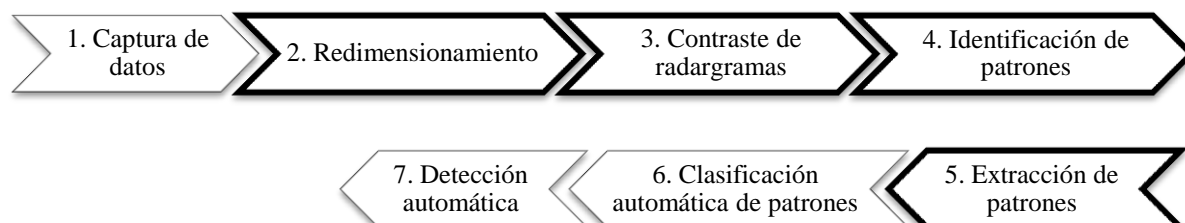


Figura 3.2. Etapas de la metodología planteada para la identificación de patrones de tuberías de SAA en imágenes de GPR.





La primera etapa de la metodología planteada consiste en la captura de imágenes con GPR de tuberías enterradas de diferentes materiales e imágenes sin tubería (referencia), obteniendo lo que en este documento se llamará matrices en bruto. En la segunda etapa, redimensionamiento de imágenes, se propone una metodología de tratamiento de los datos, con el objetivo de eliminar trazas repetidas y ubicar cada una de ellas en su correspondiente posición espacial. Contando ya con una métrica adecuada en las imágenes (obtenida en la etapa anterior), en la tercera etapa de la metodología planteada, las matrices en bruto de las tuberías son contrastadas con las matrices en bruto de las referencias. Esta etapa se realiza con el objetivo de que aflore visualmente el objeto enterrado, en este caso, las tuberías. La cuarta y la quinta etapa están definidas por el análisis de las imágenes contrastadas (identificación), para la posterior extracción de características de cada tubería. Finalmente con las etapas realizadas previamente se pretende favorecer las dos etapas siguientes (clasificación automática de patrones y detección automática de patrones). Los detalles de la metodología se describen a lo largo del capítulo.

3.2 Caso de estudio. Configuración de ensayos de laboratorio

Antes de describir en detalle la metodología propuesta, es importante definir las condiciones bajo las cuales se desarrolló el trabajo y la configuración de los ensayos realizados. En este apartado se presenta la configuración de los ensayos realizados en laboratorio, mediante los cuales fueron obtenidas las imágenes de GPR. Denominaremos *perfiles* a estas imágenes, ya que las mismas son cortes en profundidad del suelo inspeccionado.

En la adquisición de los perfiles con GPR se emplearon 4 tuberías de diferentes materiales. La selección de estos materiales se realizó intentando abarcar un espectro general de los materiales que comúnmente se encuentran instalados en los SAA. Aunque la instalación de tuberías nuevas de asbesto-cemento en la actualidad se encuentra restringida o, en la mayoría de casos, prohibida por la legislación, en muchas redes de SAA aún se encuentran instaladas hasta que no se requiera su remoción, y por este motivo se incluyó este material de tubería en esta investigación. El diámetro externo de las tuberías fue seleccionado con el objetivo de que fueran semejantes entre sí, a fin de que fueran comparables sus resultados. Las características de las tuberías enterradas son mostradas en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características de las tuberías empleadas en los ensayos

Material		Diámetro externo (d) (mm)	Longitud de tubería (l) (mm)
	Policloruro de vinilo (PVC)	110	500
	Polietileno (PE)	90	480
	Asbesto-cemento* (AC)	96	210
	Fundición Dúctil (Fund)	98	270

*Esta tubería presenta incrustación en su interior.

Las tuberías presentadas en la Tabla 3.1 fueron enterradas una a una y por separado, dentro de un tanque. El tanque sobre el que se desarrolló el trabajo presenta unas dimensiones de 1.00×1.00×0.60m de volumen útil, y el material del terreno contenido en su interior presentaba características de arcillo-limoso. Una vez enterrada la tubería (en el caso de los ensayos con tubería), el tanque fue cubierto con una placa de prolipileno. Vale la pena mencionar que en el caso de los ensayos de referencia (sin tubería) se empleó la misma placa

de polipropileno para cubrir el tanque. Sobre la placa de cobertura se ha marcado un mallado, correspondiendo cada uno de los trazados en esta malla a cada uno de los perfiles de interés por ensayo. La configuración y planteamiento de este mallado se presentan en la sección 3.3. En la Figura 3.3, se presenta la configuración del tanque empleado.

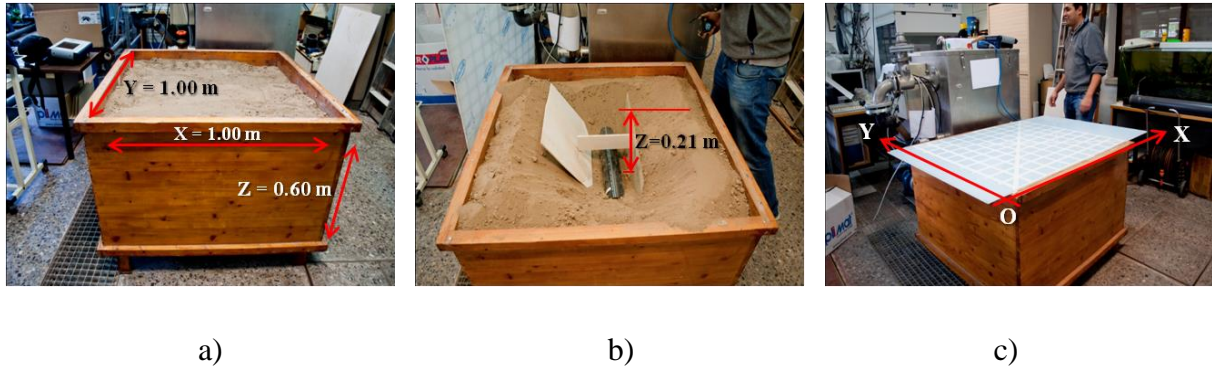


Figura 3.3. Tanque sobre el que se realizaron los ensayos: a) dimensiones, b) tubería de polietileno en proceso de enterrar y c) placa de cobertura del tanque

Sobre la placa de cobertura se estableció un sistema de coordenadas (Figura 3.3, c). Sobre este sistema de coordenadas, cada tubería fue enterrada a una profundidad (z) de 0.21m a clave de la tubería, y una ubicación (x, y) de (0.50m, 0.25m), aproximadamente. La ubicación de cada tubería, se presenta en la Figura 3. 4.

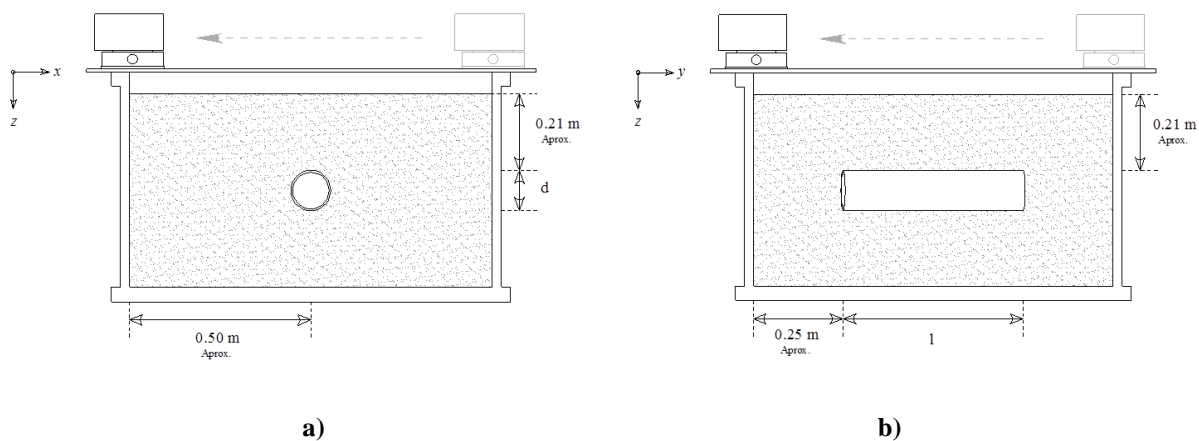


Figura 3. 4. Configuración para la tubería enterrada: a) corte transversal, b) corte longitudinal (d = diámetro externo de tubería, l = longitud de tubería, ver Tabla 3.1).

3.3 Captura de datos

La captura de datos consistió en realizar ensayos con GPR, con cada una de las configuraciones de estudio planteadas en la sección anterior. El equipo de GPR empleado en la captura de datos corresponde a una unidad central SIR 3000 “Geophysical Survey Systems Inc.” (GSSI) (Figura 3.5, b), y una antena monoestática comercial, con una frecuencia central de antena de 1,5 GHz (Figura 3.5, a).

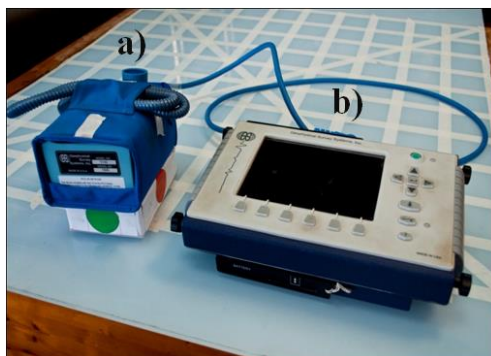


Figura 3.5. Equipo de GPR empleado en los ensayos: a) antena, b) unidad central

Los parámetros del GPR bajo los cuales se realizaron los ensayos son presentados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Equipo y Parámetros de GPR empleados en los ensayos.

PARÁMETROS DEL GPR			
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Antena	1.5 GHz	GP1 (dB)	-20
T_rate	100KHz	GP2 (dB)	-20
Mode	Time	GP3 (dB)	10
GPS	None	GP4 (dB)	20
		GP5 (dB)	50
Samples	512	FILTROS	
Format (bits)	16	LP_IIR	2500
Range (ns)	20	HP_IRR	200
Diel	9	LP_FIR	0
Rate	120	HP_FIR	0
SCN/UNIT	64	STACKING	3
		BGR_RMVL	0
Points	5		

Los parámetros del equipo presentados en la Tabla 3.2 se mantuvieron constantes en todos los ensayos, con el objetivo de hacer comparables entre sí los resultados.

En este estudio se plantearon un total de 22 ensayos por cada tubería y un conjunto adicional de 22 ensayos sin tubería (como referencia). Para ello, una vez establecido el sistema de coordenadas en la cubierta del tanque (placa de polipropileno) –sección anterior–, fueron trazadas 22 líneas, correspondientes a 11 líneas paralelas al eje x y 11 paralelas al eje y , espaciadas entre sí 0.10 m (malla de muestreo). Sobre cada trazado de la malla de muestreo se deslizo la antena de GPR para la obtención de los perfiles, para posteriormente ser sometidos a análisis. En la Figura 3.6, se presenta un ejemplo de la captura de uno de los perfiles y el sistema mallado mencionado. Los resultados y el análisis de los datos obtenidos (en bruto) con estos ensayos, se presentan en el Capítulo IV.

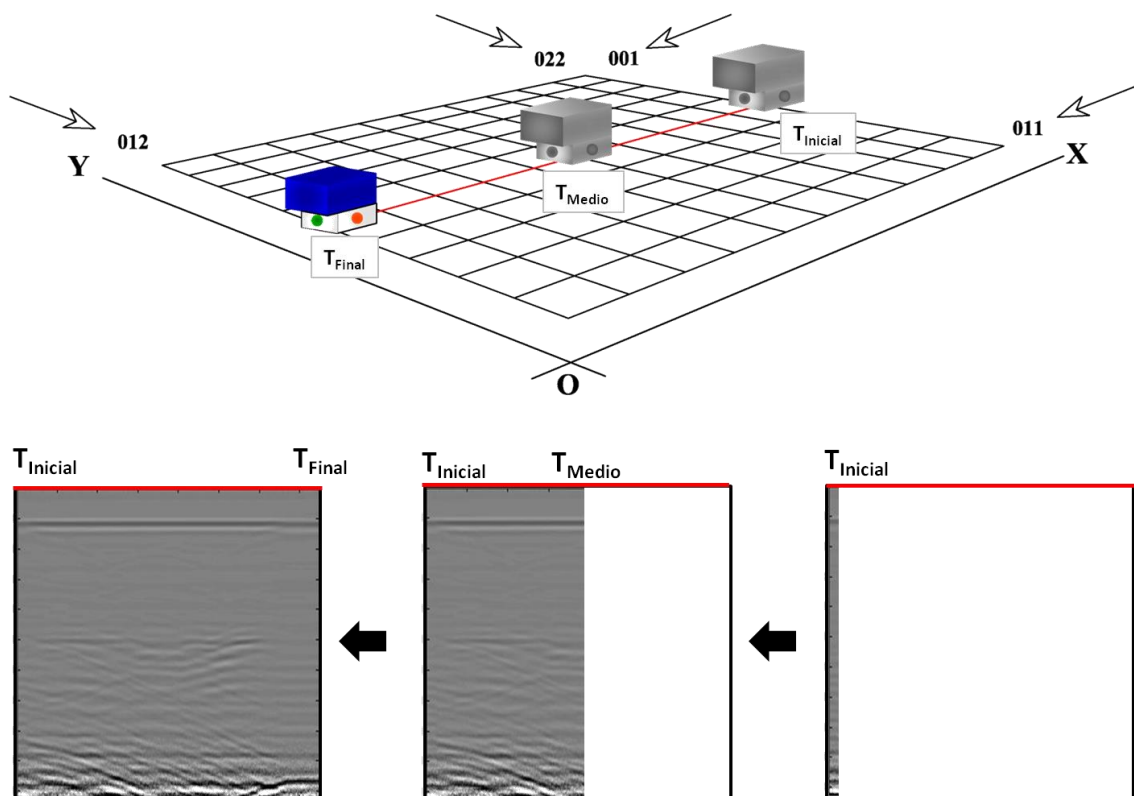


Figura 3.6. Configuración de captura de datos (radargramas/perfiles)

Las mediciones fueron realizadas en sentido transversal a la tubería (perfiles paralelos al eje x , ver Figura 3. 4, a) y longitudinal a la tubería (perfiles paralelos al eje y , ver Figura 3. 4, b). Adicionalmente, cabe destacar que cada ensayo realizado fue registrado en video mediante una cámara web. Estos registros sirvieron para situar y redimensionar espacialmente las mediciones realizadas. Los detalles de este redimensionamiento se presentan en la siguiente sección.

3.4 Proceso de redimensionamiento de imágenes

En esta sección se muestra el proceso de redimensionamiento aplicado a los perfiles (radargramas) obtenidos mediante GPR. El objetivo principal de esta sección es lograr una métrica adecuada para los perfiles obtenidos. Para ello, se llevaron a cabo algunas tareas, tales como obtención de videos del recorrido de la antena en los ensayos, extracción de datos a partir de los videos (tiempo, posición x , y) y, finalmente, el tratamiento de dichos datos. Para este procedimiento se desarrolló una herramienta con la cual fue posible ajustar la imagen al espacio real medido.

Antes de continuar, es importante señalar el motivo por el cual consideramos necesario el redimensionamiento de las imágenes. El problema consistió en que las prospecciones realizadas en laboratorio fueron llevadas a cabo manualmente por un operario, lo cual conlleva que los perfiles tengan dimensiones diferentes. Esto es así debido a que es difícil controlar la velocidad de deslizamiento de la antena manualmente y mantener una velocidad constante a lo largo de un trayecto (de la superficie mallada). Otro problema presente en la medición está dado por las mediciones cuando la antena no se encuentra en movimiento. Este problema se da principalmente al principio y final de cada captura, o por obstrucciones en la superficie de deslizamiento de la antena. Al detener la antena, el GPR sigue capturando datos en ese punto, provocando repetición de las trazas, lo que hace que la matriz de los perfiles cuente con más datos y posición espaciales diferentes a las reales. Se debe mencionar que este redimensionamiento es fundamental en este trabajo, para poder homogenizar los datos y poder llevar a cabo el contraste planteado en la sección 3.5. Los detalles de la metodología planteada para redimensionar las imágenes se presentan a continuación.

3.4.1 Métodos de medición en estudios GPR

Existe una amplia variedad de métodos de localización y posicionamiento de objetos; dentro de los métodos comúnmente usados destacan la odometría y el GPS, que son ampliamente utilizados en los estudios mediante GPR.

Odometría. La odometría es el método más utilizado para la localización de objetos móviles de ruedas (robot, vehículo, etcétera.) (Tello, 2010). Este método consiste en colocar sensores ópticos que aportan información de la rotación de las ruedas, y del ángulo de giro. Posteriormente, los datos obtenidos de los sensores se utilizan para el cálculo del desplazamiento a partir de cierta posición inicial conocida (Martínez et al., 2009).

Este método es simple de implementar, poco costoso de computar, y posible de lograr en tiempo real (Martínez et al., 2009). Por otra parte presenta la gran desventaja de la acumulación de errores cuando el recorrido es muy largo, lo que también causa incertidumbre en la orientación del móvil (Tello, 2010).

Otra tecnología utilizada para odometría son los sistemas de navegación inercial (Inertial Navigation Systems o INS). Un *INS* mide movimientos de forma electrónica a través de acelerómetros en miniatura. Mientras los movimientos sean suaves, sin golpes o movimientos bruscos, y las muestras sean tomadas con frecuencia, un INS puede proveer odometría precisa al 0.1 por ciento de la distancia recorrida. Sin embargo, los objetos móviles (robots) generalmente violan esta regla, ya que frecuentemente reciben golpes o giros bruscos pudiendo exceder el rango de la medida de los acelerómetros introduciendo errores. Esta tecnología no es viable para objetos móviles, ya que tienen un alto costo, debido a que los acelerómetros se deben estabilizar con giroscopios, además del costo natural de la precisión en la electrónica (Martínez et al., 2009).

GPS. Los Sistemas de Posicionamiento Global (Global Positioning System o GPS) funcionan recibiendo señales de satélites que orbitan la Tierra. El receptor triangula su propia posición en términos de latitud, longitud, altitud y cambios en el tiempo. Existe además un método conocido como *Sistema de Posicionamiento Global Diferencial* (Differential Global Positioning System o DGPS), en el cual se utilizan dos receptores GPS. Uno de ellos permanece estacionario y el otro se coloca en el robot. Los GPS

poseen la desventaja de que no funcionan correctamente en lugares cerrados. Por otro lado, los sistemas DGPS comerciales son excesivamente caros (Martínez et al., 2009).

La aplicación de estas técnicas no es posible en muchos casos debido a múltiples razones tales como los costos excesivos para lo que se pretende realizar, que no son adecuados para la problemática presente, que no se ajustan a las necesidades del trabajo a realizar, que la precisión que se necesita no es la adecuada para el uso que se le va a dar, o simplemente que las condiciones de trabajo no lo permiten. Este es el motivo para plantear una metodología de redimensionamiento que solventara las problemáticas planteadas anteriormente, con el objetivo de que fuese de bajo coste económico y que fue posible obtener mediciones en espacios, tanto abiertos como cerrados, con una métrica adecuada. El planteamiento de la propuesta se presenta a continuación.

3.4.2 Método de redimensionamiento propuesto

El método propuesto en este trabajo consiste en emplear un sistema de posicionamiento basado en visión global que involucra una cámara web fija en cierta posición que captura los movimientos de los objetos (antena) en un área delimitada (plano de referencia). La selección de un sistema visual basado en una cámara web se planteó debido a que la cámara es sumamente económica en comparación con la compra de otros equipos más específicos, y permite obtener resultados de métrica adecuados para el objetivo formulado en este trabajo. En la Figura 3.7 se presenta la posición de la cámara web en la captura de los videos y las condiciones de trabajo.

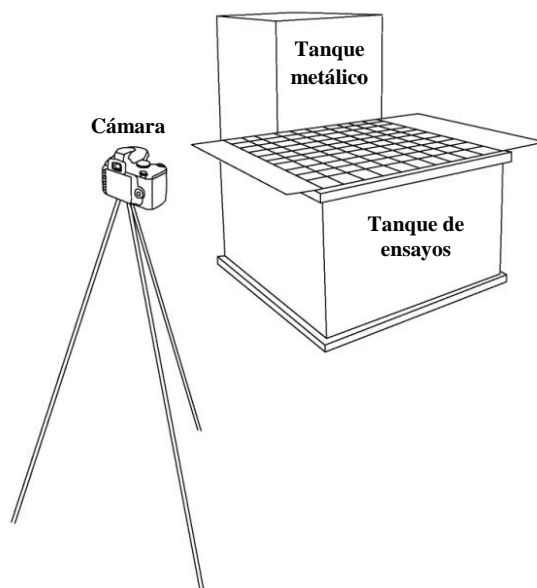


Figura 3.7. Configuración de la captura de videos

En la Figura 3.7 se puede observar que la cámara se posiciona en un lugar estratégico, de tal manera que el foco de la cámara tenga visibilidad sobre la totalidad del área de trabajo. Para la captura de los videos se utilizó una cámara web, con la que se capturó el deslizamiento de una antena de 1.5 GHz sobre el plano de referencia. El uso de esta cámara web, además de permitirnos redimensionar las imágenes, permitirá entender aspectos que pueden ser visibles y que afectan las imágenes obtenidas con GPR. Tal es el caso de un tanque metálico que se encuentra ubicado a un costado del tanque donde fueron practicados los ensayos, que, como se verá posteriormente, afecta a algunos de los perfiles obtenidos con los ensayos realizados con GPR.

3.4.3 Calibración de la cámara

En aplicaciones con visión artificial, un aspecto importante a considerar es el proceso denominado calibración de cámara, que consiste en determinar los parámetros intrínsecos y los parámetros extrínsecos de la cámara. Los parámetros intrínsecos son aquellos que definen la geometría y características internas de la cámara (la distancia de la cámara, puntos centrales de la imagen y los coeficientes de distorsión de la lente) (Aracena, 2005). Al contrario de estos, los parámetros extrínsecos, son aquellos que relacionan los sistemas de referencia del

mundo real y la cámara, describiendo la posición y orientación de la cámara en el sistema de coordenadas del mundo real (Garzón, 2013).

El proceso de calibración de cámaras es necesario para poder extraer información métrica a partir de imágenes 2D del mundo a 3D. Para ello, es necesario contar con un método que nos lo permita. Dentro de los diferentes métodos de calibración que existen según Aracena (2005), encontramos el método propuesto por Zhang, que es denominado método de calibración por homografía o matriz de proyección. En este método no se obtienen directamente los valores de los parámetros, sino que se calculan a partir de los valores de la homografía o matriz de proyección. El algoritmo presentado por Zhang se describe brevemente. Este algoritmo, consiste en utilizar patrones que descansan en un único plano, requiriendo al menos 4 puntos coplanares correspondientes (Aracena, 2005).

El modelo de cámara puntual describe las relaciones entre el punto 3D, coordenadas globales $M = [X Y Z 1]^T$, y su proyección en el plano imagen $m = [u v 1]^T$ como

$$sm = A[RT]M, \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

donde s es el factor de escala desconocido, R la matriz de rotación, T es el vector de traslación y A es la matriz de cámara o de parámetros intrínsecos, que están en función de las coordenadas del centro de la imagen (u_0, v_0) , α y β , que se derivan de la distancia focal y el tamaño del pixel, y γ , la asimetría. Así la matriz de cámara es de la forma

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Cuando todos los puntos 3D son coplanares, en el modelo se selecciona el sistema de coordenadas globales tal que en el modelo el plano Z es cero. Por tanto la Ecuación 3.1 puede ser re-escrita como,

$$sm = A[r_1 \ r_2 \ r_3 \ T][X \ Y \ 0 \ 1]^T$$

$$sm = A[r_1 \ r_2 \ T][X \ Y \ 1]^T. \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

Se considera $M' = [X \ Y \ 1]^T$ como un punto en el plano imagen, luego m y M' pueden relacionarse por una matriz de homografía H (Gonzales, 2010):

$$sm = HM', \text{ con } H = A[r_1 \ r_2 \ T] \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

Todo el proceso de calibración de una cámara por este método está implementado en la toolbox de MatLab llamada “Camera Calibration Toolbox for Matlab” (Bouguet, 2014) que fue utilizada como base para el desarrollo del redimensionamiento de las imágenes de GPR de este trabajo.

3.4.4 Descripción del sistema planteado

El sistema planteado en este apartado está basado en un proceso iterativo en el cual se llevan a cabo varias tareas, que pueden agruparse en 3 bloques principales: a) extracción del plano de referencia, b) seguimiento del movimiento de la antena, y c) redimensionamiento de la imagen. El objetivo principal de este sistema es obtener la posición de la antena en el tiempo, sobre cada línea trazada en la malla del plano de referencia y extraer los datos para un posterior tratamiento y finalmente redimensionar la imagen al espacio real medido. Para este problema se desarrolló una sencilla herramienta programada en MatLab, mediante la que se consiguió alcanzar el objetivo. El esquema del sistema planteado para el redimensionamiento se presenta en la Figura 3.8.

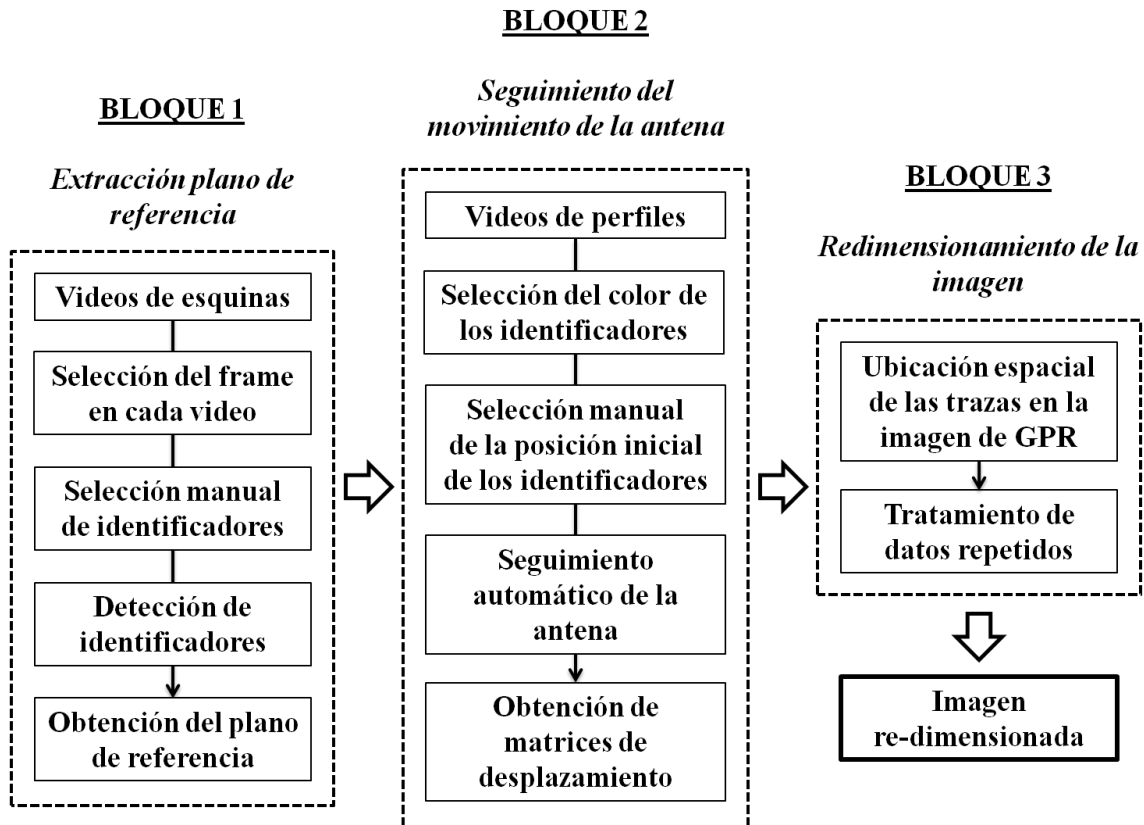


Figura 3.8. Procedimiento de redimensionamiento.

Antes de explicar cada uno de los bloques que compone el sistema propuesto, se debe mencionar que en la antena se ubicaron dos pegatinas en forma de círculo (identificadores), que serán los objetos buscados dentro de la imagen a fin de identificar la posición de la antena. Los identificadores son círculos situados en la antena en sus caras laterales, de color naranja (RGB, [255, 127, 0]), para las caras más largas y de color verde (RGB, [0, 255, 0]) para las caras más cortas. Un ejemplo de estos indicadores se presenta en la Figura 3.9.

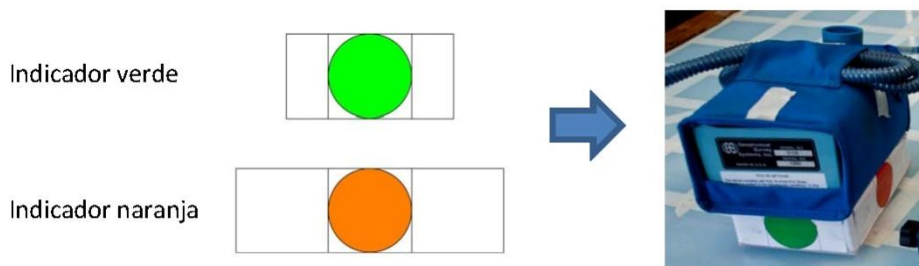


Figura 3.9. Identificadores empleados en la detección de la antena

Estos identificadores deben ser detectados en función de su color. Una vez identificada el área donde pueden estar, se genera una nube de puntos que los definen (a cada color de cada identificador), de tal manera que al realizar un promedio de la nube de puntos de cada color, se obtiene un único punto de cada color, que define a cada cara de la antena. El punto medio entre estos dos puntos de color obtenidos representará la posición de la antena en la imagen obtenida con la cámara web. A continuación se detallan los diferentes bloques que componen el sistema.

Extracción del plano de referencia

El primer bloque del sistema planteado representa la extracción del plano de referencia de la imagen de la cámara, al espacio métrico real. Este proceso es solo necesario si no se ha definido un plano de referencia (principio del proceso), si se modifica la posición de la cámara, o si se requiere cambiar de plano de referencia.

Para definir el plano de referencia en la imagen, se deben definir 4 puntos coplanares, como se mencionó anteriormente. Estos cuatro puntos, en nuestro trabajo, corresponderán a las esquinas de la malla. Para ello, hemos decidido grabar 2 videos por cada esquina de la malla. El centro de la antena en ambos videos corresponderá a la esquina, y la diferencia entre uno y otro corresponderá a la ubicación del eje central más largo de la antena. Es decir, en uno de los videos, el eje central más largo de la antena se ubicará en el sentido de los trazados en x y el otro video con el eje central en el sentido de los trazados en y . El objetivo es obtener una posición media de la antena en cada esquina, intentando minimizar el error de medición.

Obtenidos los videos de las esquinas, se extrae un *frame* (imagen del video); la selección del *frame* puede ser aleatoria, o como fue en nuestro caso, el *frame* que correspondía al tiempo medio de cada video. En cada una de estas ocho imágenes seleccionadas se marcó un área con un recuadro que contuviera los dos identificadores; este proceso se realizó de forma manual, aunque es susceptible de ser automatizado. El proceso de selección e identificación se hace en cada una de las esquinas del área de trabajo, seleccionando primeramente la esquina correspondiente al origen y posteriormente las otras 3 esquinas en sentido horario. Finalmente, se generan las 4 esquinas que determinan el plano de referencia. Un ejemplo de la este proceso se presenta en la Figura 3.10.

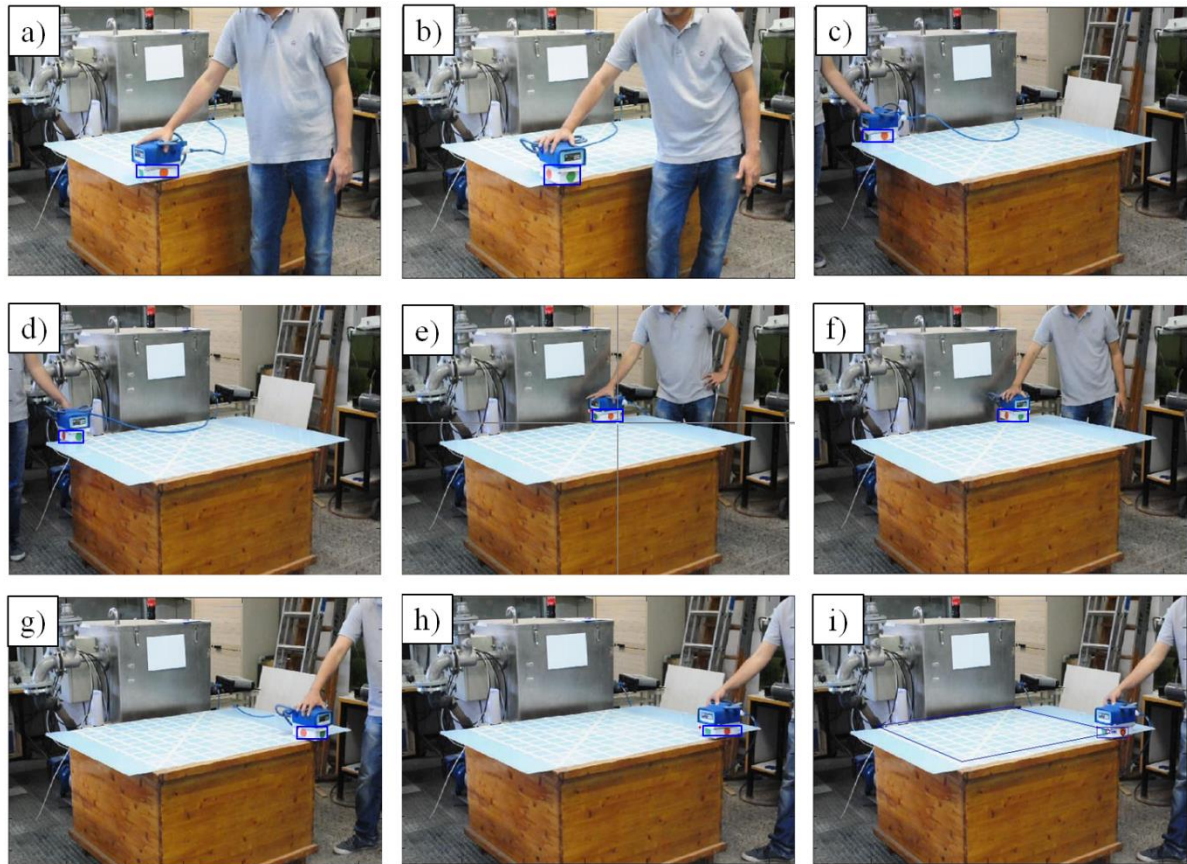


Figura 3.10. Primer bloque - Proceso de selección e identificación de las 4 esquinas que delimitan el área de trabajo: a) hasta h), selección de las esquinas, i) última esquina y delimitación del plano de referencia

Inmediatamente después de haber determinado el área de trabajo, se relaciona el espacio medido por la cámara y el espacio real para la superficie de control, de tal manera que se asignan coordenadas al plano y , además, sus dimensiones, introduciendo el número de cuadros de la malla en cada sentido x y y , así como su distribución, siendo generado de esta manera el plano de referencia sobre el cual se trabajará (Figura 3.11).

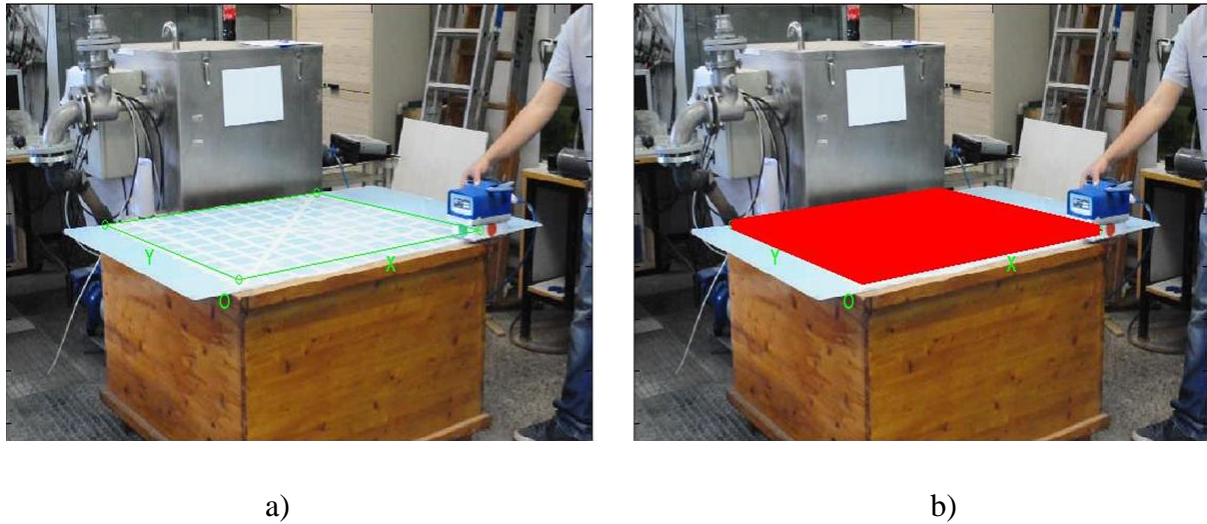


Figura 3.11. Primer bloque – extracción del plano de referencia: a) puntos coplanares que delimitan el contorno del plano de referencia, b) plano de referencia

El plano de referencia obtenido (Figura 3.11, b) tiene la propiedad de relacionar el espacio de la cámara (en píxeles), con distancias métricas del sistema de referenciación seleccionado. Es así, como al detectar en el siguiente bloque la antena, conoceremos en el tiempo su ubicación espacial.

Seguimiento del movimiento de la antena

El segundo bloque del sistema planteado representa la detección de la antena dentro de la superficie de control en la imagen, para determinar la ubicación en el espacio de referencia real. Capturados los videos de cada ensayo realizado (22 videos), es decir, aquellos videos que capturaron el deslizamiento de la antena sobre cada perfil en la superficie de control, se procede a la selección del color de los identificadores que representarán a la antena. Los identificadores propuestos en este documento, como ya se mencionó anteriormente, corresponden a dos círculos de color naranja (RGB, [255, 127, 0]) y verde (RGB, [0, 255, 0]). Sin embargo, los rangos RGB seleccionados para los identificadores, en las imágenes de los videos (*frames*), se ven afectados por diferentes factores, tales como: luminosidad, distorsión (en muchos casos por el movimiento), entre otros. Intentando solventar esta problemática, en este planteamiento, determinamos un umbral dentro del cual se debían encontrar los

identificadores. La selección de este umbral para el identificador naranja se sitúa en el rango RGB ([173, 54, 34], [255, 169, 171]), y para el identificador verde en el rango RGB ([57, 106, 63], [141, 226, 188]). Esta selección se realizó de forma manual para cada video (al inicio del mismo), buscando que la detección de la antena fuera lo más aproximada posible.

Determinado el umbral para los identificadores, mediante un rectángulo, se acotó sobre el *frame* inicial de cada video, la zona donde se encuentran estos identificadores, con el objetivo de facilitar la identificación en el *frame* inicial de los indicadores y agilizar el proceso. Esta área servirá, adicionalmente, para que el algoritmo busque automáticamente a los identificadores en una zona cercana a esta zona inicial demarcada, agilizando con ello el proceso de seguimiento de la cámara. Esta zona seleccionada se va desplazando posteriormente, de forma automática, con respecto al punto medio obtenido en el *frame* anterior, hasta que se termina la trayectoria de la antena en el sentido de x o y , según sea el caso del perfil analizado. De este proceso se obtiene la posición de la antena en cada *frame* y el instante que corresponde a esta posición en el video que, al relacionarlo con el plano de referencia obtenido previamente, nos brinda los valores de las coordenadas (x, y) de ubicación de la antena para el sistema de referenciación planteado y el *instante correspondiente* al mismo. Este paso se repite para los 22 videos de los ensayos, con lo que se obtienen 3 matrices con los valores de (x, y) y *tiempo*, de los 22 videos, que puede representarse mediante las expresiones.

$$x = \begin{bmatrix} x_{01,1} & \cdots & x_{01,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{22,1} & \cdots & x_{22,n} \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} y_{01,1} & \cdots & y_{01,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{22,1} & \cdots & y_{22,n} \end{bmatrix}, t = \begin{bmatrix} t_{01,1} & \cdots & t_{01,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{22,1} & \cdots & t_{22,n} \end{bmatrix},$$

donde x , es la matriz de distancias en el eje X de los 22 perfiles capturados; y , es la matriz de distancias en el eje Y de los 22 perfiles; y t , es la matriz de los tiempos para la posición (x, y) . La Figura 3.12, resume gráficamente el bloque del proceso descrito.

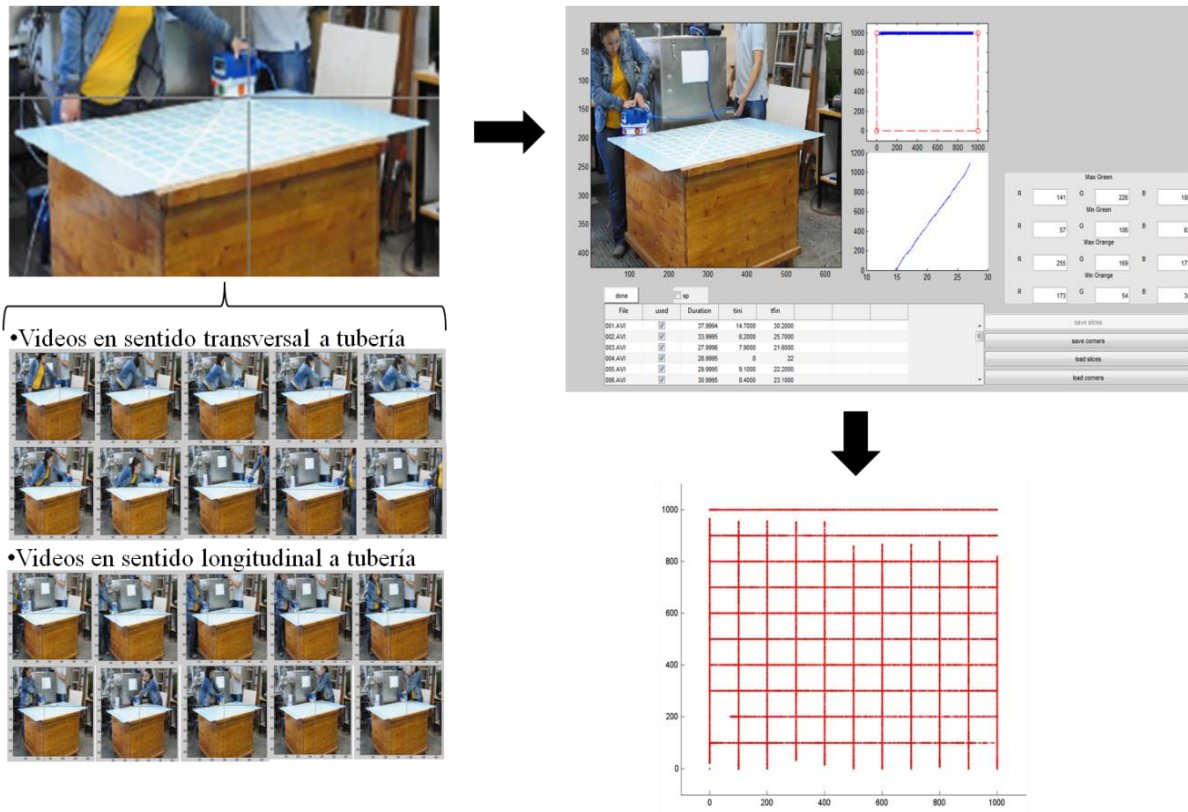


Figura 3.12. Bloque 2. Pasos para la detección de la antena dentro de la superficie de control

Redimensionamiento de la imagen

Una vez extraídas las matrices de ubicación espacial y temporal del desplazamiento de la antena de los ensayos realizados, en el tercer bloque de este planteamiento, se busca relacionar los tiempos medidos en la cámara con el tiempo en el cual fue obtenida cada traza en la imagen de GPR. Esto se realiza con el objetivo de asignarle a cada traza su ubicación espacial dentro del ensayo, una vez relacionados los tiempos.

Como se ha mencionado anteriormente, cada una de las capturas de los perfiles (radargramas), fue grabada mediante una cámara web, y mediante estos videos fueron obtenidos los tiempos de recorrido de la antena para cada perfil del espacio de trabajo. Se obtuvo el tiempo de grabación total del video que correspondió a un instante anterior a iniciar la medición y un instante posterior al finalizarla. Este tiempo obtenido será denominado tiempo de la cámara (t_c).

Por otra parte, las mediciones del GPR están determinadas por las características del equipo. Dentro de los parámetros del equipo, que fueron establecidos a priori, podemos destacar uno denominado *rate* (ver Tabla 3.2). Este parámetro permite seleccionar el número de trazas (columnas del radargrama) por segundo que registrará el equipo durante el ensayo. Además, el número de trazas viene dado por los registros obtenidos con GPR (radargramas). Así pues, el tiempo de la medición con GPR (tr) estará dado por la ecuación 3.5.

$$tr(s) = \frac{trazas}{rate(trazas/s)}. \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

Como se pretendía que todo el ensayo quedara registrado en el video, se tiene que $tc > tr$. Teniendo esto en consideración, entonces es necesario determinar qué instante de tc corresponde propiamente a la medición realizada.

Por otra parte, al analizar los videos para la extracción del tiempo de grabación, observamos que el equipo empleado emite cuatro señales acústicas, dos de ellas al inicio de la captura y las restantes al finalizar la misma. El tiempo en el que se presentó cada señal acústica (denominado $tsav_n$) en el video fue registrado, siendo $n = 1, \dots, 4$, el orden en que se emiten los sonidos. Basándonos en estudios experimentales, se obtuvo que los $tsav$ que presentan mayor correspondencia con tr fueron $tsav_2$ y $tsav_3$, siendo $tr = (tsav_3 - tsav_2) + ts$, donde ts será un tiempo sobrante. A fin de repartir el tiempo sobrante y obtener $tirc$ (tiempo inicial del radargrama en la cámara) y $tfrc$ (tiempo final del radargrama en la cámara) se definieron las siguientes expresiones:

$$tirc = tr - \left(\frac{(tsav_3 + tsav_2)}{2} \right), \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

$$tfrc = tr + \left(\frac{(tsav_3 + tsav_2)}{2} \right). \quad (\text{Ecuación 3.7})$$

Un ejemplo de los datos de tiempo empleados para identificar los tiempos del radargrama en el video se presentan en la Figura 3.13.

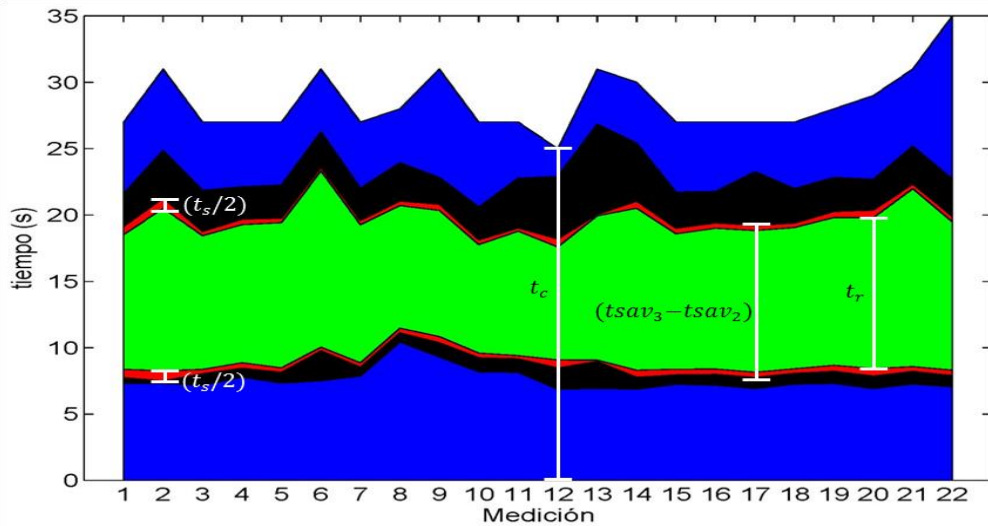


Figura 3.13. Gráfico de los tiempos de la cámara y el tiempo de registro

Una vez obtenidos y relacionados los tiempos, se procede a reubicar espacialmente cada traza. Se debe mencionar que en instantes donde la antena estuvo detenida durante el ensayo, como es de esperar, algunas trazas tendrán una misma ubicación espacial que otras (datos repetidos). Las trazas repetidas fueron promediadas, obteniendo con ellas una única traza relativa la posición (x, y) correspondiente. Al considerar que la velocidad de desplazamiento de la antena en la captura puede variar en el tiempo, se procedió a homogenizar las trazas, siendo la distancia propuesta entre traza y traza de 1mm. En la Figura 3.14 se presenta un ejemplo de los resultados obtenidos con este planteamiento.

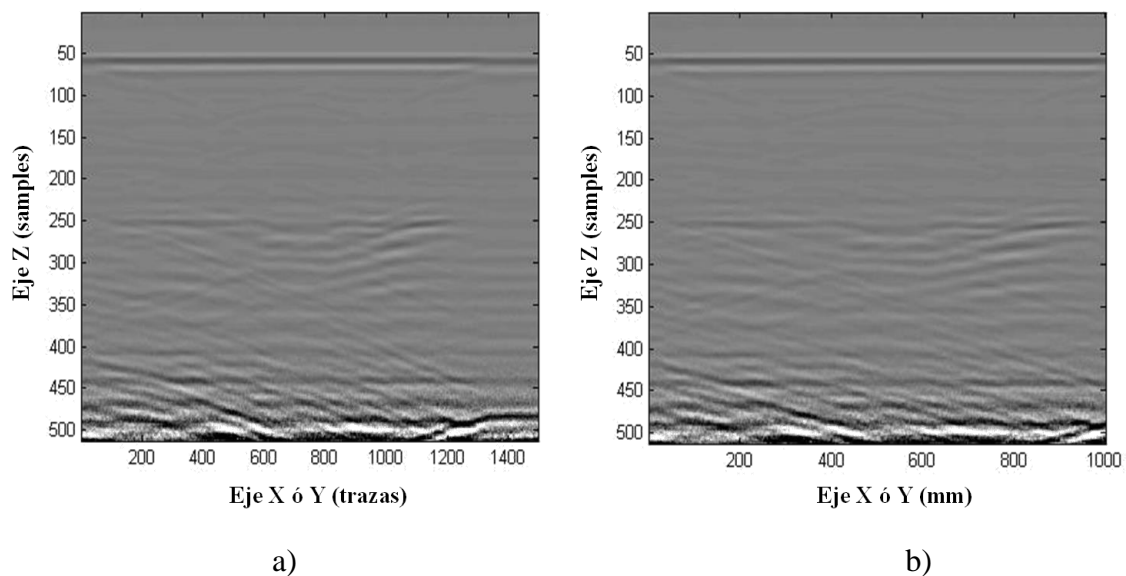


Figura 3.14. a) Perfil sin redimensionar, b) Perfil redimensionado

3.5 Contraste

Obtenidas las imágenes con una métrica adecuada, es posible llevar a cabo el siguiente paso de la metodología planteada, el denominado contraste, que consiste en la resta de las matrices de datos de los perfiles de referencia (sin tubería) con sus correspondientes matrices de datos de los perfiles con tubería (de cada material). Se debe mencionar, adicionalmente, que, como nos interesaban las diferencias entre las matrices, a fin de que afloraran en las matrices los objetos diferentes (tuberías en nuestro caso), se tomó el valor absoluto de esta resta.

$$[MC_{mat}] = abs([MB_{ref}] - [MB_{mat}]), \quad (\text{Ecuación 3.8})$$

donde, MC_{mat} , hace referencia a la matriz contraste del material (PE, PVC, Asbesto-cemento, Fundición dúctil), que resulta de la resta entre MB_{ref} siendo esta la matriz en bruto de referencia (ya redimensionada), y MB_{mat} .

Finalmente, las imágenes obtenidas de los perfiles contrastados, son analizadas detalladamente, con la finalidad de encontrar formas que aporten información de cada tubería y poder extraerlas, para su posterior análisis y comparación. Estos resultados se presentan en el Capítulo V de este documento.

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS. DATOS EN BRUTO

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan y se analizan las imágenes en bruto resultantes de los sets de ensayos realizados en laboratorio, de acuerdo a la configuración planteada en el capítulo anterior. En estos análisis se hace principal énfasis en la identificación de componentes (tuberías) de los SAA, mediante la localización de hipérbolas en las imágenes de GPR. Para ello serán analizados los 22 perfiles, transversales y longitudinales, de cada set de ensayos.

Antes de comenzar con el análisis de las imágenes es importante señalar que las tuberías enterradas tienden a generar hipérbolas en las imágenes de GPR. Estas hipérbolas son producidas debido a que la antena del GPR emite un haz de energía que se propaga desde la superficie, en profundidad, en el suelo, en un patrón cónico que irradia hacia fuera a medida que viaja a más profundidad en el suelo (Conyers, 2005). De esta manera la hipérbola es generada a partir de la conversión de los tiempos que la onda invierte desde la antena hasta el objeto en un plano bidimensional (Ballester et al., 2012). Un ejemplo del fenómeno mencionado se presenta en la Figura 4.1.

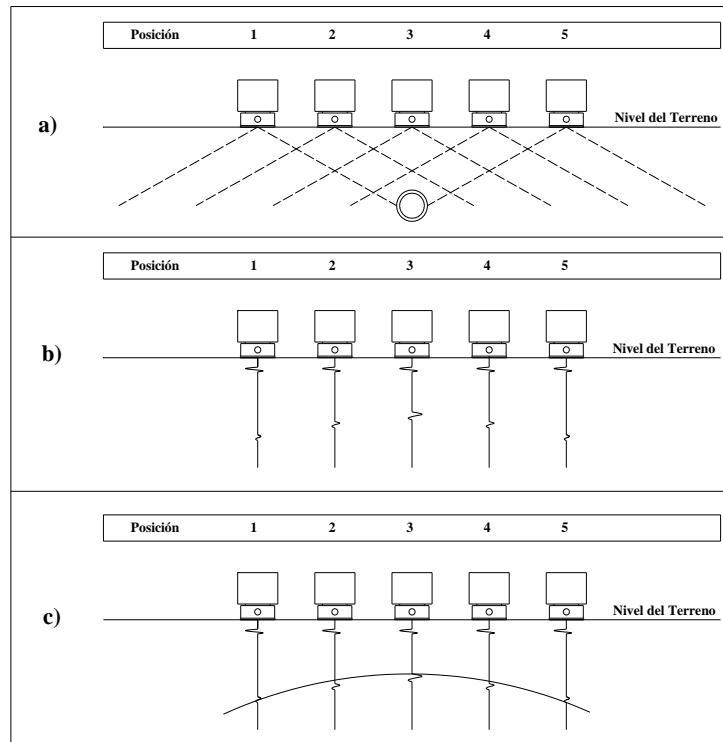


Figura 4.1. Generación de hipérbolas en las imágenes de GPR: a) haz de energía emitido, b) trazas generadas, y c) forma obtenida en la imagen (en este caso hipérbola)

Durante la adquisición de datos, la antena registra el objeto (tubería) antes de estar situada en su vertical (Figura 4.1, posiciones 1 y 2 de la antena). A su vez, el objeto sigue siendo registrado mientras la antena se aleja de nuevo (Figura 4.1, posiciones 4 y 5 de la antena). El punto sobre la vertical (Figura 4.1, posición 3 de la antena), registra el tiempo de reflexión más corto (Ballester et al, 2012). El análisis e identificación de estas hipérbolas ha sido la manera clásica de interpretar las imágenes de GPR en la búsqueda de objetos enterrados. Teniendo claro el funcionamiento de captura de la antena, pasamos al análisis de las imágenes obtenidas tras los ensayos de laboratorio.

4.2 Formas de referencia a identificar en el análisis

Teniendo en cuenta la gran dificultad de interpretación que presentan estas imágenes, debido a la gran cantidad de datos contenidos y a la escala de color que presenta, resulta difícil ver lo que las imágenes nos muestran. Sin embargo, observando con detenimiento cada uno de los

perfiles y comparándolos entre ellos, es posible destacar algunas características de especial interés. Para facilitar la interpretación y comprensión de las imágenes en bruto que realizamos en este capítulo, en la Figura 4.2 se resumen las principales formas a las que se hará referencia a lo largo del capítulo.

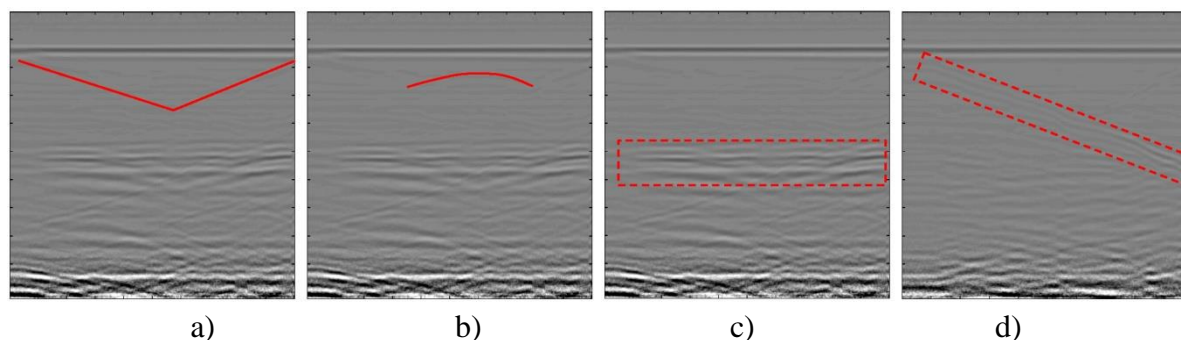


Figura 4.2. Formas encontradas en los perfiles de las imágenes en bruto: a) triángulo invertido, b) hipérbola, c) fondo del tanque, d) líneas diagonales (sentido longitudinal de la tubería)

Con estas bases, en las siguientes secciones de este capítulo, presentaremos y analizaremos las imágenes de GPR redimensionadas y en bruto de los sets de ensayos realizados. Se debe mencionar que estas imágenes fueron redimensionadas bajo la metodología propuesta en la sección 3.4.2.

4.3 Imágenes de GPR en bruto. Ensayos de referencia

En la Figura 4.3 se presentan las imágenes en bruto de los correspondientes perfiles de referencia (sin tubería) para los cortes transversales (paralelos al eje x).

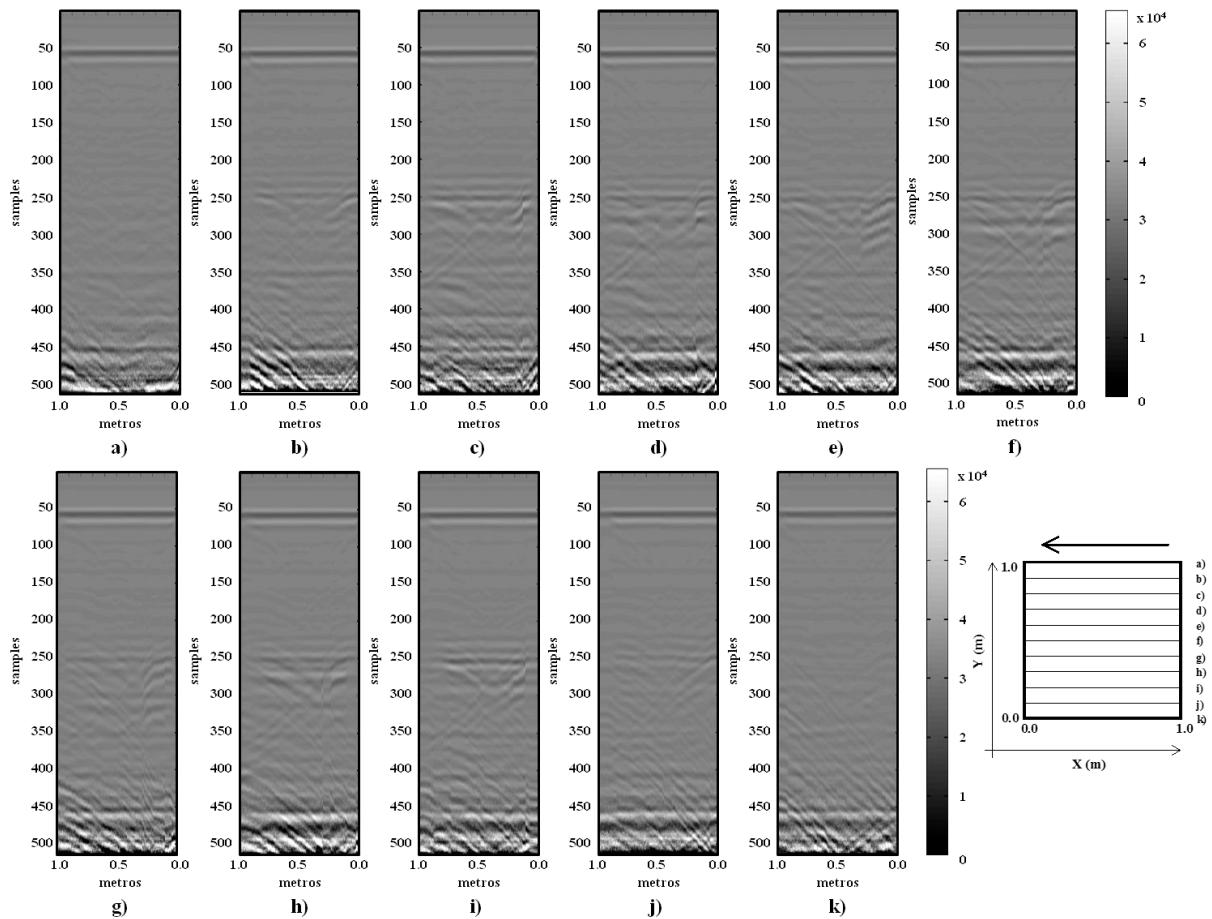


Figura 4.3. Perfiles transversales de ensayos de referencia. Imágenes en bruto

En la Figura 4.3 se puede observar, en las imágenes desde a) hasta c), la presencia de unas pequeñas hipérbolas, hacia la esquina superior izquierda, encontradas a una profundidad de 100 *samples* aproximadamente; sabemos que estas hipérbolas no presentan relación con la tubería puesto que estas imágenes corresponden a la referencia. Sin duda son generadas por algún objeto del suelo, probablemente una piedra. Por otra parte, observando todas las imágenes, es posible destacar la aparición de líneas que descienden diagonalmente de las esquinas superiores y que, en algunos casos, se van desvaneciendo conforme se aproximan al centro de la imagen y, en otros, simplemente se unen hacia los 150 *samples* aproximadamente, formando una especie de triángulo invertido. Tal fenómeno se atribuye a la respuesta que da la pared del tanque a la antena, debido al cono que esta emite.

En las imágenes desde b) hasta j), la presencia de una formación de líneas horizontales, entre 250 y 300 *samples*, corresponde al fondo del tanque; además, se logra ver cómo estas formaciones no se hacen notar en las imágenes a) y k); esto lo atribuimos a que estos perfiles

han sido tomados muy próximos o sobre las paredes del tanque, lo cual, al estar tomando datos muy semejantes entre sí, no permite el marcado contraste del fondo del tanque, como en las demás imágenes.

A continuación, en la Figura 4.4, se presentan los cortes longitudinales (paralelos al eje y) de los perfiles de los ensayos de referencia.

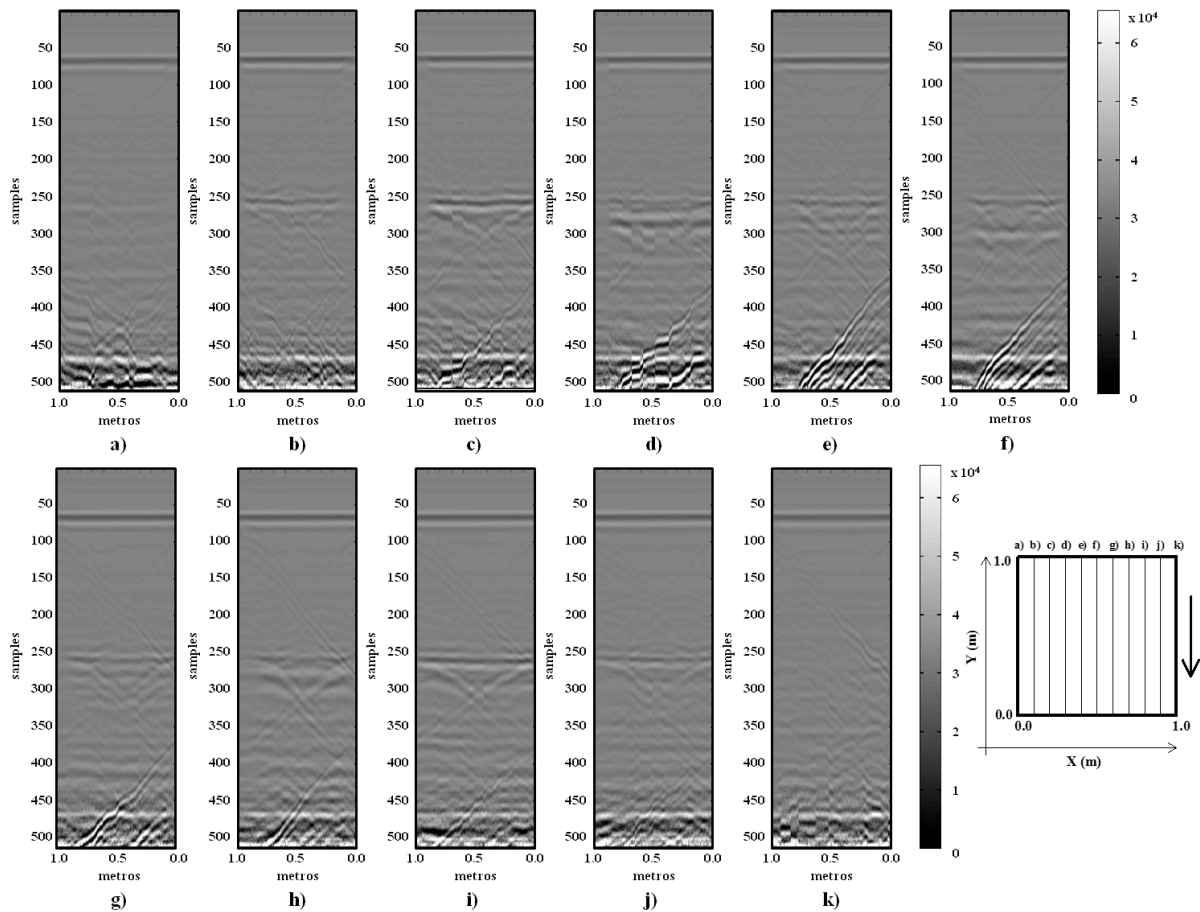


Figura 4.4. Perfiles longitudinales de ensayos de referencia. Imágenes en bruto

En la Figura 4.4, se observan algunas características que ya han sido destacadas previamente en la Figura 4.3. Tal es el caso de las formaciones correspondientes al fondo del tanque, así como la presencia de los triángulos invertidos de las paredes del tanque, lo cual confirma nuestra interpretación inicial. Por otra parte, en las imágenes i) y j), se evidencian dos hipérbolas ubicadas a una profundidad de entre 150 y 250 *samples* aproximadamente, y localizadas entre 0 y 0.6m. Estas anomalías se pueden relacionar con la presencia de piedras, ya que, por tratarse de la referencia, sabemos que no es la tubería. En las imágenes desde f)

hasta k) se puede destacar una formación de líneas diagonales que atraviesan la imagen. Tal formación tiene relación con un tanque de metal, ubicado a un lado del tanque sobre el que se realizaron las prospecciones; no olvidemos que el GPR detecta los metales más fácilmente que otro material. Esta interpretación pudo ser realizada gracias a que se contaba con los videos, y en ellos se determinó que el único objeto que podría ocasionar esta interferencia sería el tanque metálico (ver Figura 3.7).

Las características destacadas en la Figura 4.3 y la Figura 4.4, presentan una importancia significativa en el análisis de las imágenes en bruto, ya que nos permiten identificar perfil a perfil los resultados del contorno (tanque de prospección, suelo, tanque metálico) en las prospecciones. Estas condiciones deberán presentarse de manera similar en las imágenes de los ensayos con tubería, y esto facilitará la identificación de las características relevantes de nuestro interés (características de las tuberías) y evitar confusiones al momento de su interpretación.

4.4 Imágenes de GPR en bruto. Ensayos con tubería de PVC

En la Figura 4.5 son presentados los perfiles transversales de los ensayos realizados con una tubería de PVC enterrada en el tanque.

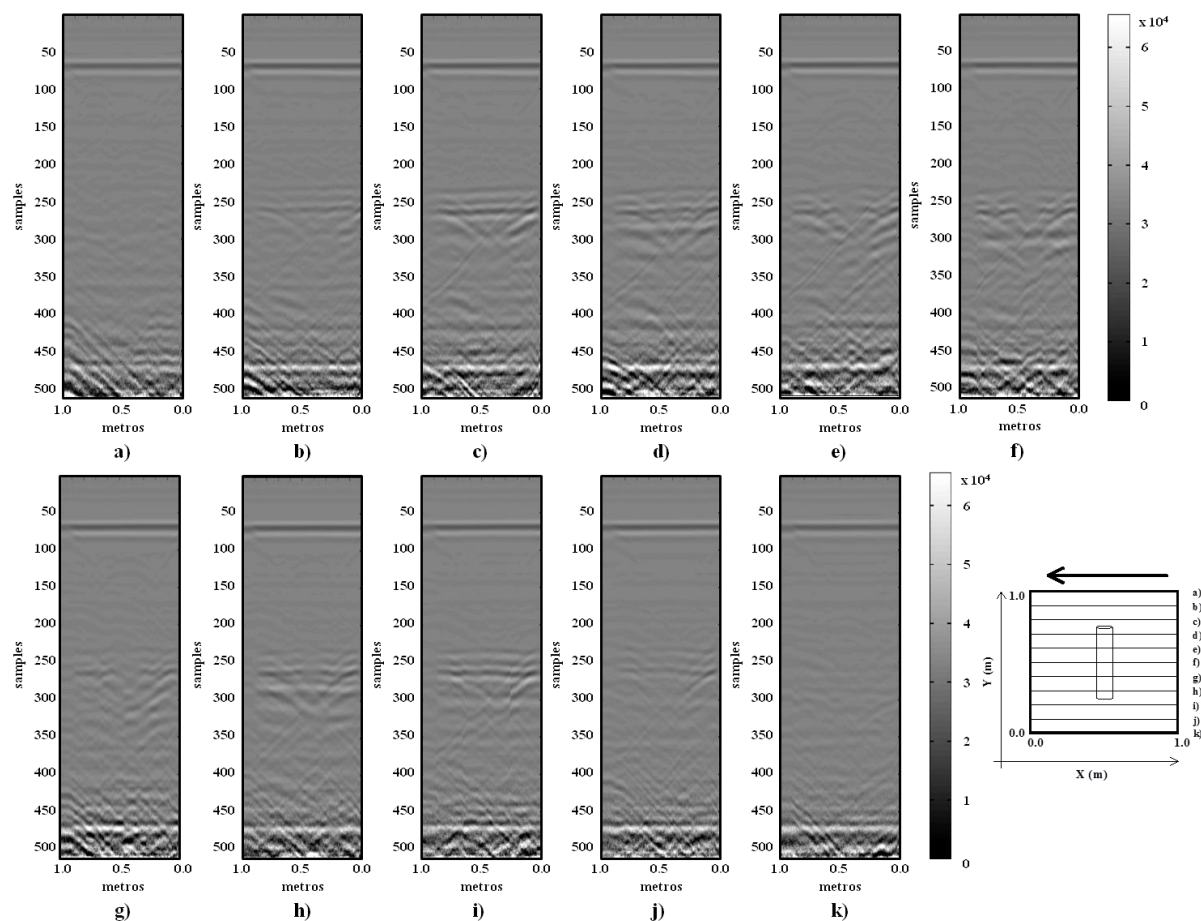


Figura 4.5. Perfiles transversales de ensayos con tubería de PVC. Imágenes en bruto

En la Figura 4.5 es posible observar la presencia de una hipérbola, que se hace presente desde la imagen d) hasta h), donde el centro de la hipérbola se localiza aproximadamente en 0.40m y en profundidad se encuentra entre 100 y 150 *samples*. Esta ubicación coincide con la establecida en la configuración planteada para la tubería enterrada. Adicionalmente, se puede apreciar el aumento de la intensidad del contraste y la visibilidad de la hipérbola, conforme nos acercamos al corte central de la tubería (perfil f). Como se puede observar en el cuadro esquemático de ubicación de los perfiles, el perfil f) corta transversalmente por su centro a la tubería instalada, con lo que se obtiene simetría en el área de influencia del haz de energía emitido. Esto da como resultado el incremento de la intensidad, que se puede corroborar con el desvanecimiento de la misma desde f) hasta d) y desde f) hasta h).

Por otra parte, se puede observar, en todas las imágenes presentadas, que las características destacadas en la Figura 4.3 vuelven a aparecer y con las mismas propiedades. Tal es el caso

de los triángulos invertidos que se presentan en todas las imágenes, y la demarcación del “fondo del tanque” presentes en las imágenes b) hasta j) (Figura 4.5), a una profundidad entre 250 y 300 *samples*. Otra característica ya mencionada en la referencia, como son las pequeñas hipérbolas en la parte superior izquierda de las imágenes a), b) y c), son visibles para la figura actual. Se debe mencionar que de no haberse contado con el análisis de contornos realizados en la referencia, estas anomalías podrían haber dado lugar a equivocaciones y confusiones al momento de su interpretación.

En la Figura 4.6 se presentan los perfiles longitudinales de los ensayos realizados con una tubería de PVC enterrada en el tanque.

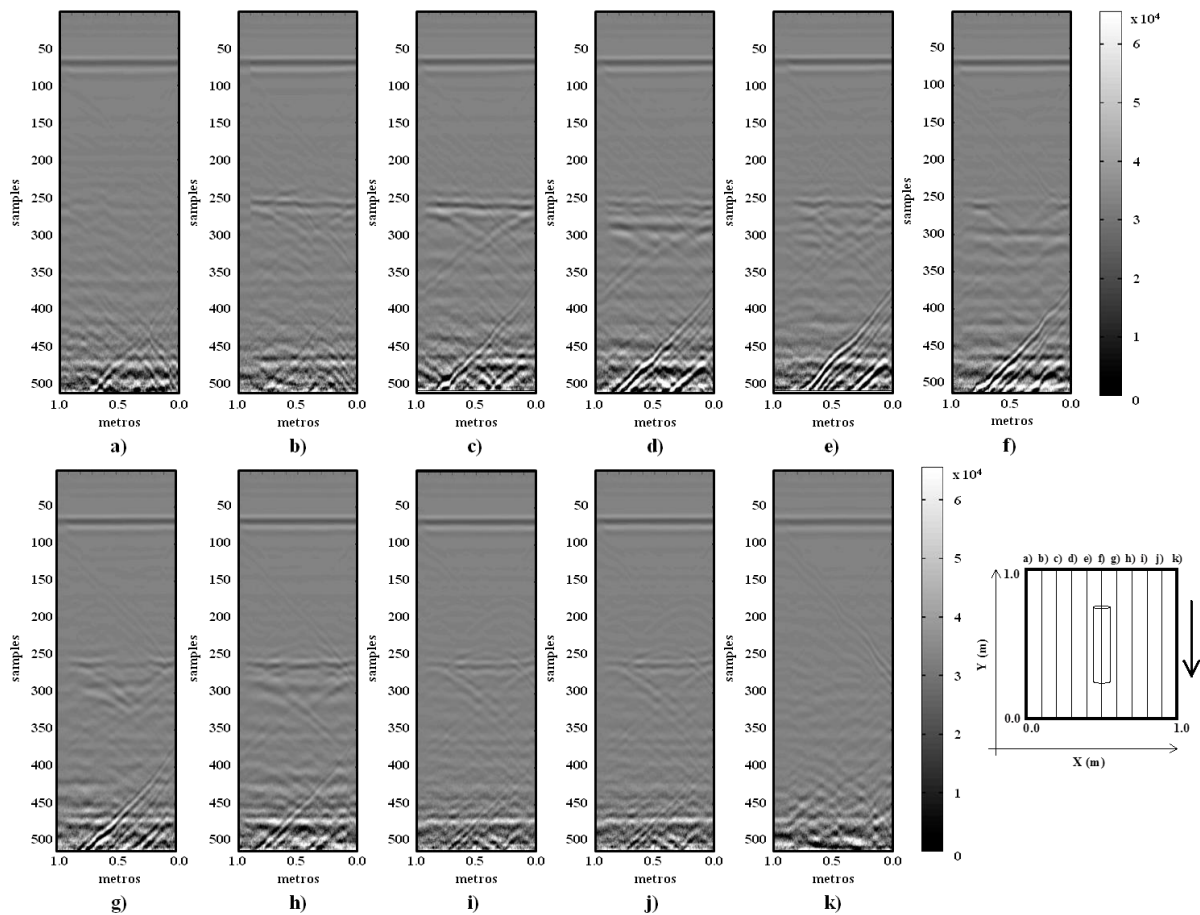


Figura 4.6. Perfiles longitudinales de ensayos con tubería de PVC. Imágenes en bruto

En la Figura 4.6 se puede observar que las hipérbolas que identificamos como la tubería instalada en las imágenes de la Figura 4.5 ya no se presentan, lo cual es coherente con la configuración planteada. Por otra parte, en las imágenes e) hasta g) de esta figura, se demarca una formación horizontal, a una profundidad entre 100 y 150 *samples*, y en distancia, se

delimita entre 0.20 y 0.70m, aproximadamente. Esta localización coincide con el de la hipérbola encontrada en las imágenes de la Figura 4.5 y con la configuración esquemática presentada, de lo cual se podría deducir que esta formación corresponde al corte longitudinal de la tubería enterrada.

Adicionalmente, se debe mencionar que en estas imágenes se siguen observando las características adicionales de contorno que se identificaron en la Figura 4.4. Tal es el caso de los triángulos invertidos (en todas las imágenes), así como el fondo del tanque, las 2 hipérbolas de la anomalía interpretada como una piedra y, en las imágenes desde f) hasta k), las líneas diagonales que atraviesan la imagen, relacionadas con el tanque de metal contiguo.

4.5 Imágenes de GPR en bruto. Ensayos con tubería de PE

Los perfiles de los ensayos realizados con tubería de PE, para los cortes transversales, se presentan en la Figura 4.7.

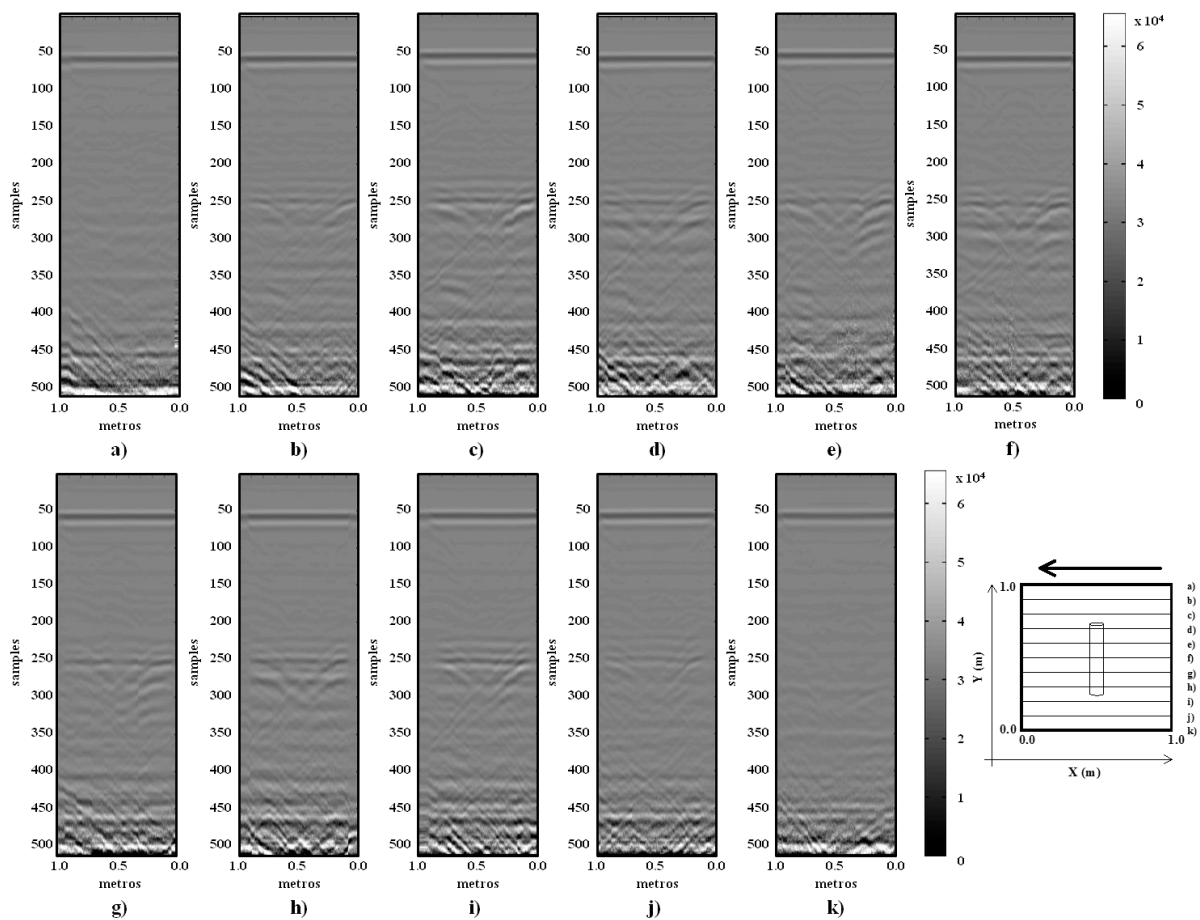


Figura 4.7. Perfiles transversales de ensayos con tubería de PE. Imágenes en bruto

En la Figura 4.7 se puede observar, en las imágenes desde d) hasta h), la presencia de un par de hipérbolas (delineadas una sobre otra) que se demarcan a una profundidad entre 100 y 150 *samples*, aproximadamente. El punto máximo de las hipérbolas lo encontramos a una distancia de 0.50m en todas las imágenes en las que se presenta. Estas formas coinciden con la ubicación de la tubería enterrada, de acuerdo a la configuración esquemática de los ensayos.

En estos ensayos se puede observar, de igual manera, para las hipérbolas que interpretamos como la tubería, la ampliación de la hipérbola y el incremento en la intensidad conforme se aproximan los perfiles al centro de la tubería que, aproximadamente, corresponde a la imagen f). Es así como se puede observar que las hipérbolas en los perfiles d) y h) y en los perfiles e) y g), presentan similitud en forma e intensidad, siendo, tanto en forma como en intensidad, mayores para el segundo par que para el primero. Esto es resultado de la simetría de corte con respecto al centro de la tubería y a la forma de corte con la antena (haz en forma cónica). Este mismo efecto fue observado en la Figura 4.5 para la tubería de PVC. De igual manera que en la Figura 4.3, las características adicionales de contorno se siguen observando.

En la Figura 4.8, se presentan los cortes longitudinales de los ensayos realizados con la tubería de PE enterrada.

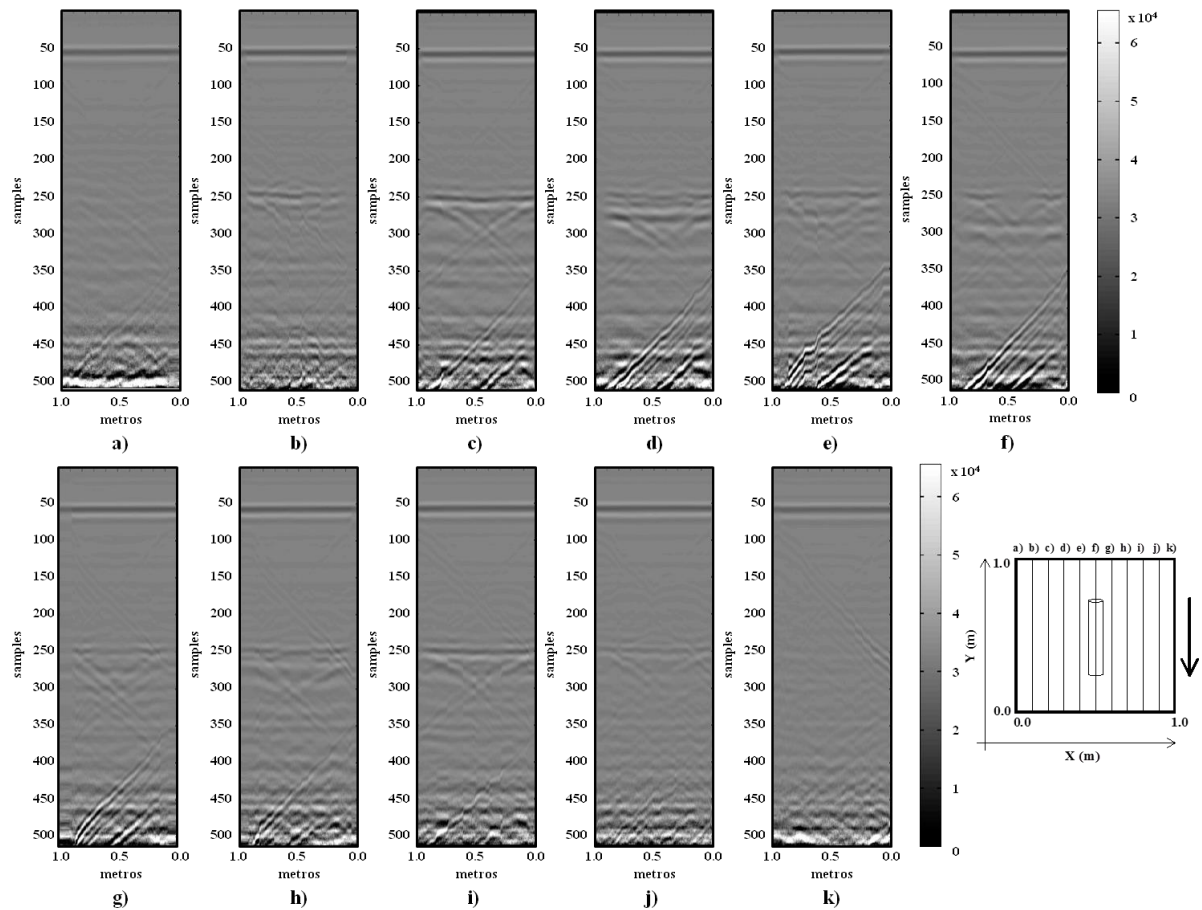


Figura 4.8. Perfiles longitudinales de ensayos con tubería de PE. Imágenes en bruto

En la Figura 4.8, a una profundidad entre 100 y 150 *samples*, se hace presente una formación de líneas horizontales, que se hacen notar en las imágenes e), f) y g). Estas formas se localizan en el centro de la imagen, aproximadamente entre 0.20 y 0.70m. Podemos decir que estas formaciones corresponden al corte longitudinal de la tubería enterrada, ya que coincide con la localización en profundidad de la hipérbola encontrada en las imágenes transversales del PE. Además es posible asumir que la imagen f) corresponde al corte longitudinal y las otras dos imágenes son cortes muy próximos a la tubería. Por otra parte, en estas imágenes también se observan las reflexiones del tanque (triángulos invertidos), así como el fondo del mismo, y aquellas hipérbolas presentes en las imágenes i) y h), observadas en las imágenes de referencia (Figura 4.4).

4.6 Imágenes de GPR en bruto. Ensayos con tubería de AC

Los resultados de los ensayos realizados con tubería de AC para los perfiles transversales son presentados en la Figura 4.9.

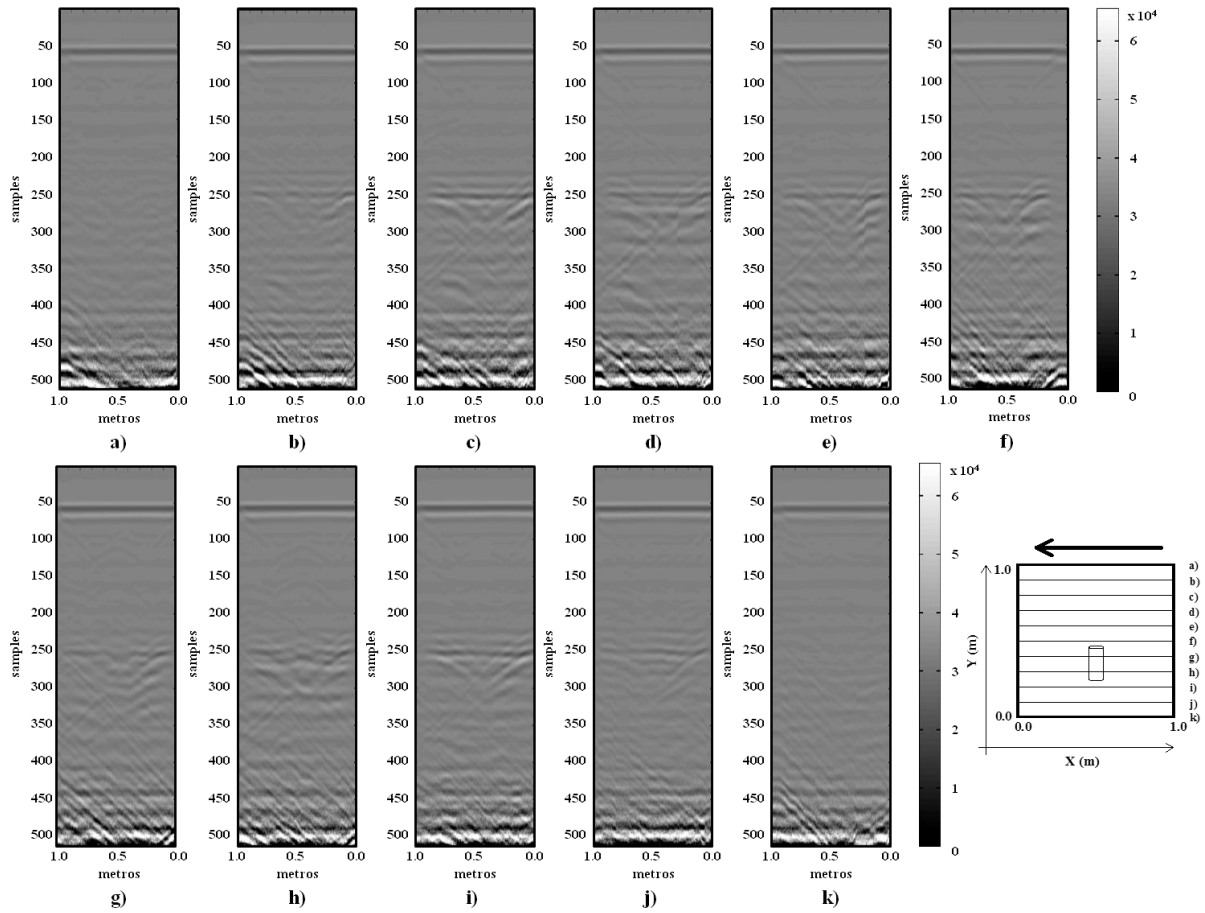


Figura 4.9. Perfiles transversales de ensayos con tubería de asbesto cemento (AC). Imágenes en bruto

En la Figura 4.9, en las imágenes g) y h), se puede observar la clara presencia de dos hipérbolas con un gran espacio entre ellas; la primera se presenta a una profundidad de 120 *samples*, mientras que la otra se demarca a 170 *samples* aproximadamente. Adicionalmente, en la imagen i) de esta figura se puede observar la delimitación de una hipérbola que se hace notar en el *sample* 130 aproximadamente. Es importante señalar que el centro de la hipérbola está localizado a 0.50m, coincidiendo con la ubicación de la tubería enterrada en las tres imágenes mencionadas. Adicionalmente, como ya se había mencionado previamente (Tabla 3.1), esta tubería presenta una incrustación calcárea en su interior. Lo cual explica la aparición

de dos hipérbolas en las imágenes. De igual manera que para la Figura 4.3, las características adicionales de contorno también son observadas en los diferentes perfiles de la actual figura.

Las hipérbolas encontradas en esta imagen presentan una mayor intensidad de color que las hipérbolas halladas para las tuberías plásticas (Figura 4.5 – PVC y Figura 4.7 – PE), lo cual hace más fácil su identificación.

En la Figura 4.10, se presentan los perfiles longitudinales de los ensayos realizados en la tubería de AC.

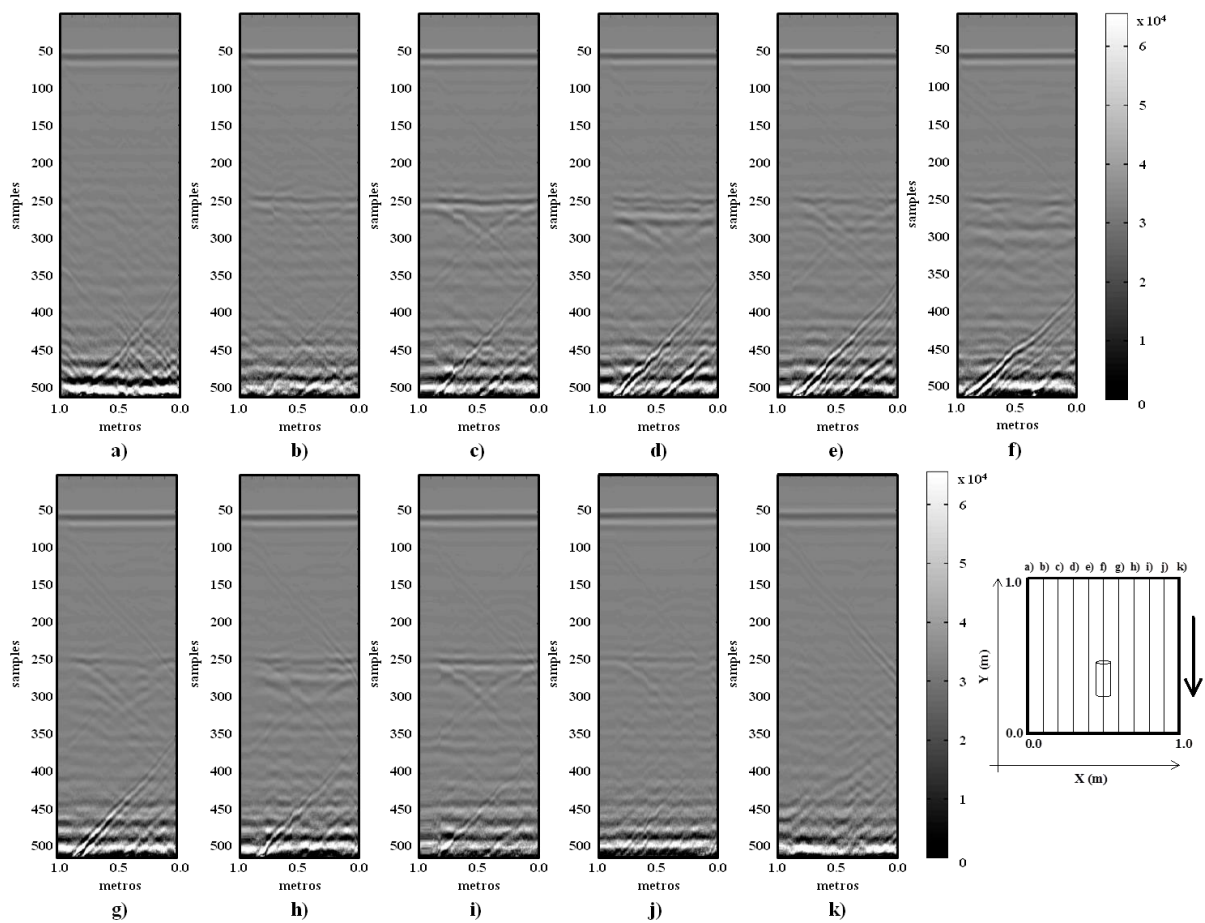


Figura 4.10. Perfiles longitudinales de ensayos con tubería de asbesto cemento (AC).
Imágenes en bruto

En la Figura 4.10 se pueden observar las mismas características de contorno adicionales observadas en la Figura 4.4. Adicionalmente, se puede observar en las imágenes desde e) hasta h), entre 100 y 150 *samples*, la demarcación de una formación que asemeja una

hipérbola alargada, que, de acuerdo a su localización, consideramos que se trata de la tubería enterrada, ya que coincide con su ubicación aproximada.

4.7 Imágenes de GPR en bruto. Ensayos con tubería Fund

En la Figura 4.11 se presentan los perfiles transversales de los ensayos realizados con tubería de fundición dúctil (Fund).

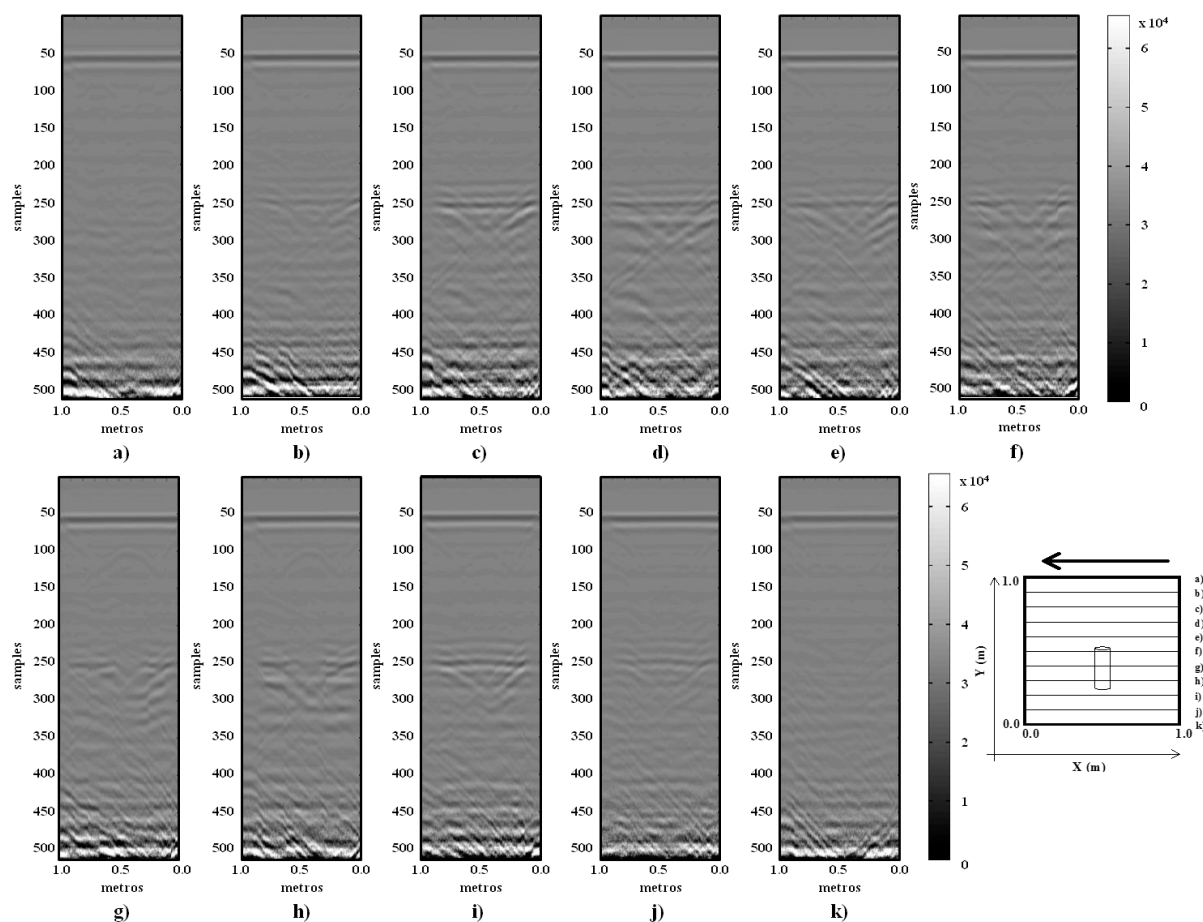


Figura 4.11. Perfiles transversales de ensayos con tubería Fund. Imágenes en bruto

En la Figura 4.11 es posible apreciar, en las imágenes desde f) hasta i), la formación de una clara y demarcada hipérbola, entre 100 y 150 *samples*. El centro de la hipérbola identificada en estas imágenes, está en 0.50m, que coincide con la ubicación aproximada de la tubería enterrada. Podemos destacar la facilidad con la que se aprecia la hipérbola en estas imágenes

en comparación con aquellas en las que la tubería enterrada es de material plástico (Figura 4.5 – PVC y Figura 4.7 – PE); esto se debe a que las propiedades electromagnéticas de este material son altas respecto a las del suelo que lo rodea, y esto permite la clara demarcación de las hipérbolas encontradas y favorece su visualización en las imágenes de GPR obtenidas. Adicionalmente, se puede mencionar que, aunque la visibilidad de estas hipérbolas en las imágenes es semejante a las encontradas para AC (Figura 4.9), en estas imágenes solo se demarca una hipérbola y no dos como es el caso de AC. Por otro lado, también se observan las características de contornos adicionales, destacadas en las imágenes de referencia (Figura 4.3).

En la Figura 4.12, se presentan las imágenes de los cortes longitudinales de los ensayos realizados con Fund.

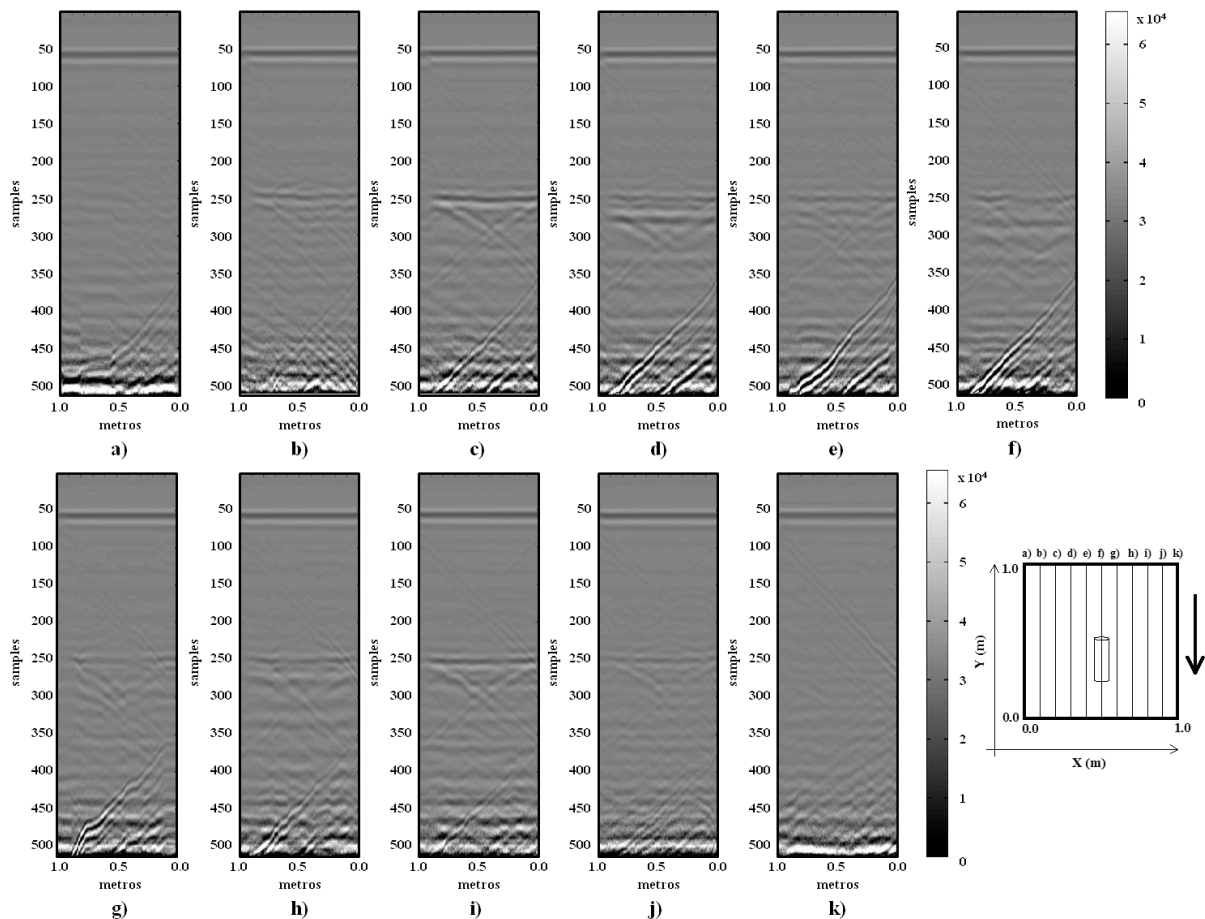


Figura 4.12. Perfiles longitudinales de ensayos con tubería Fund. Imágenes en bruto

En la Figura 4.12 observamos, en las imágenes desde e) hasta h), la formación de una hipérbola alargada entre 100 y 150 *samples*, desde 0.10 hasta 0.60m. Adicionalmente, las características de contorno observadas en la Figura 4.4 son observadas para estas imágenes.

4.8 Interpretación de los resultados obtenidos con los diferentes materiales ensayados

Realizado este exhaustivo análisis de las imágenes obtenidas con GPR para los diferentes materiales, a continuación, relacionamos todas estas observaciones de manera gráfica con el objetivo de clarificar lo expuesto (Figura 4.13).

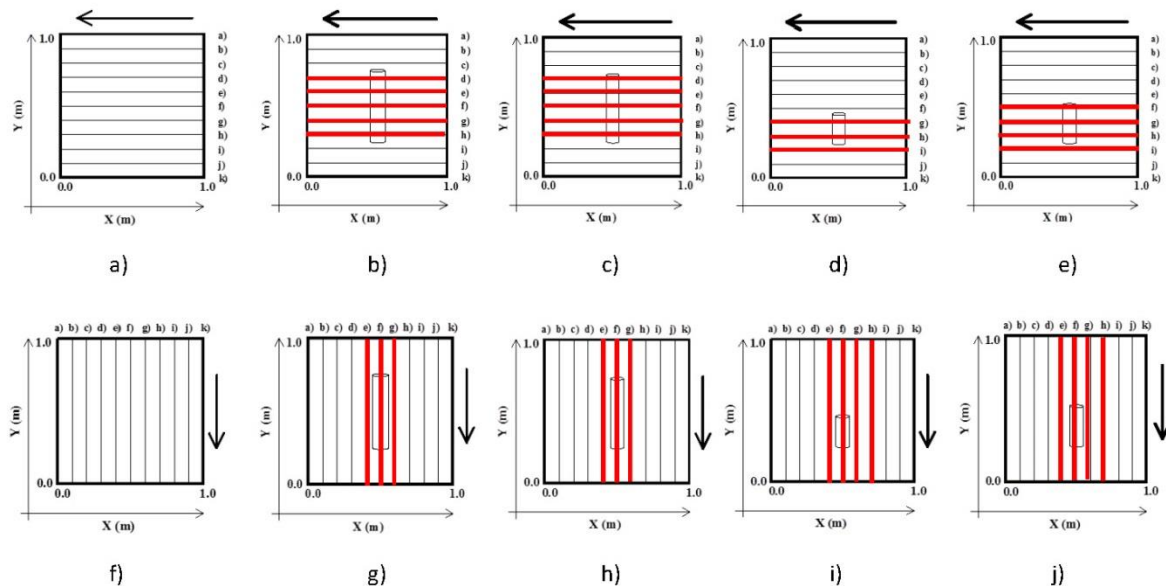


Figura 4.13. Representación esquemática de los ensayos e identificación de perfiles con tubería (perfiles en rojo). (a – e): perfiles transversales; (f – j): perfiles longitudinales; (a y f): ensayos de referencia; (b y g): ensayos con tubería de PVC; (c y h): ensayos con tubería de PE; (d y i): ensayos con tubería de AC; (e y j): ensayos con tubería Fund

En la Figura 4.13, de sus cortes transversales, se puede obtener una longitud aproximada de la tubería, y de sus cortes longitudinales, un diámetro aproximado de cada tubería. Este análisis se presenta debido a que es la forma más usual de identificar los objetos enterrados en los ensayos realizados con GPR, ya sea en campo o en laboratorio. Sin embargo, observamos que aunque las aproximaciones son buenas, el análisis de las mismas es extremadamente

complejo. El análisis es aún más complejo para materiales con características dieléctricas muy cercanas a las del suelo, como lo son las tuberías plásticas. Esta clase de resultados motiva y promueve el uso de identificaciones más precisas y que requieran de menos análisis y experiencia por parte del personal que los realiza. Por esta razón, en el siguiente Capítulo, se propone una metodología para la extracción de estos patrones mediante la metodología de contraste planteado. El objetivo no es que la metodología sea el resultado como tal, sino que favorezca la clasificación por medio de algoritmos de análisis inteligente de datos que permitan una identificación rápida y automática de estos patrones.

CAPITULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS. CONTRASTES

5.1 Introducción

En este capítulo se presenta y analiza el resultado de los contrastes realizados entre las imágenes de referencia y las imágenes obtenidas con tubería enterrada. El contraste, como se ha mencionado en el Capítulo III, consiste en tomar los datos de las matrices en bruto de los perfiles de referencia y restárselos a los datos de las matrices en bruto de los perfiles con tubería enterrada. Esto es posible ya que las matrices en bruto han sido previamente redimensionadas (metodología propuesta en el Capítulo III) y cuentan con una métrica adecuada. Los contrastes realizados permitirán ampliar más y de mejor manera el análisis y la interpretación realizados en el Capítulo IV. En el análisis de las imágenes de referencia en bruto (sección 4.3), se identificaron algunas características que denominamos características adicionales de contorno (paredes del tanque, fondo del tanque, etc.). El planteamiento de estos contrastes intenta que al restar estos perfiles de referencia de los ensayos con tubería enterrada se eliminen, parcial o totalmente, estas condiciones adicionales de contorno y afloren (visualmente) las características de los objetos de interés (en nuestro caso, las tuberías). En el presente capítulo se logra la obtención de imágenes en las que los contornos de las características de interés, principalmente las hipérbolas, quedan definidos con mayor claridad. Esto permite una extracción de los patrones de cada tubería que favorecerá posibles automatizaciones de las mismas, así como su reconocimiento.

5.2 Contrastes de Imágenes de GPR. Referencia contra tubería de PVC

En la Figura 5.1 se presentan los resultados del contraste de los perfiles de PVC para los cortes transversales.

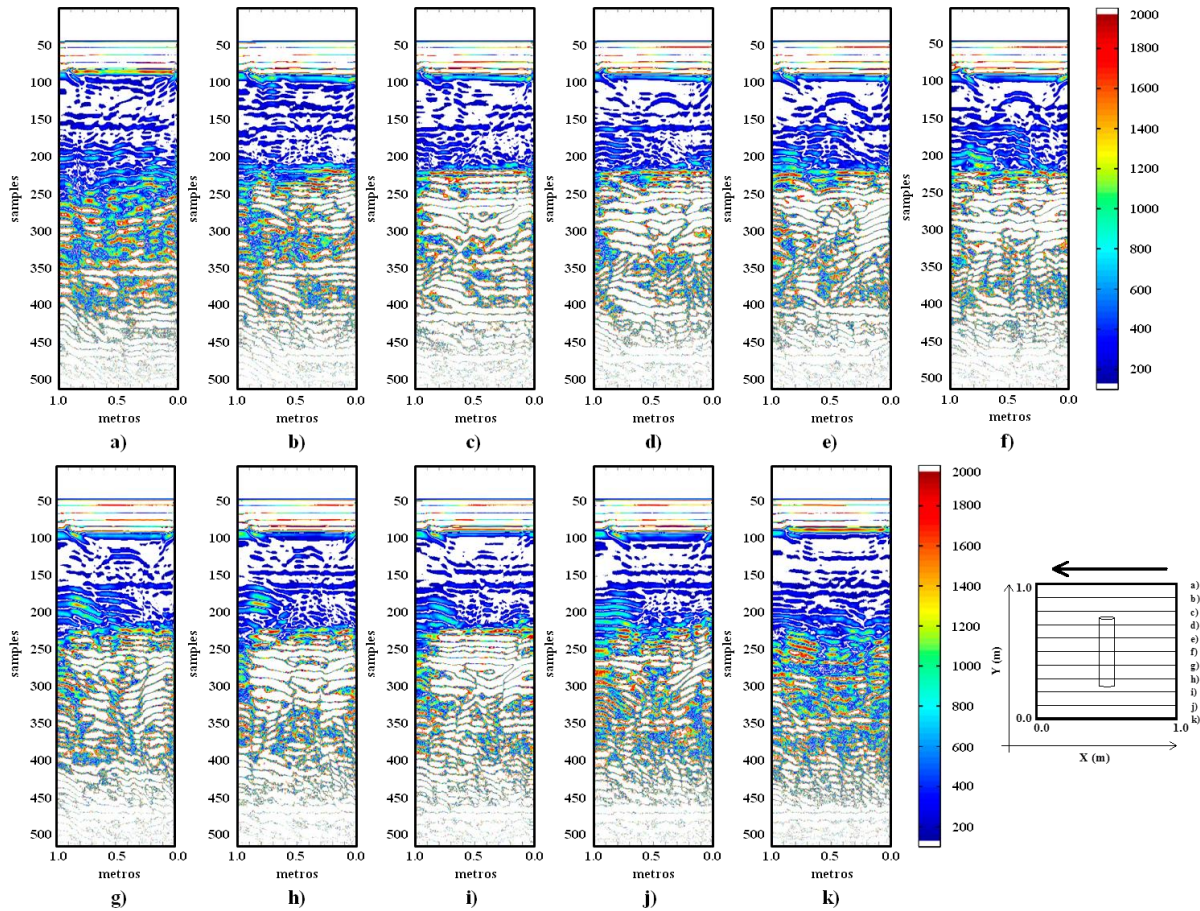


Figura 5.1. Perfiles transversales. Tubería de PVC. Contraste

En la Figura 5.1 se puede observar, en las imágenes desde d) hasta h), la presencia de dos hipérbolas sobrepuestas, que se hacen notar entre 100 y 150 *samples*, aproximadamente, en el centro de la imagen, entre 0.20 y 0.70 m. Se puede apreciar con facilidad que las hipérbolas encontradas van tomando más intensidad y se hacen más visibles conforme nos acercamos al centro de la tubería, que corresponde a la imagen f). El incremento de la intensidad y tamaño se observa en sentido d) hacia f) y h) hacia f), hasta ya no estar presentes en los perfiles c) e i). Estas características, que fueron identificadas (con mucha dificultad) en las imágenes en bruto (Figura 4.5), son evidentes en estas imágenes. Adicionalmente, se puede notar cómo estas

formas, que hemos denominado hipérbolas, intentan cerrarse en su parte más baja, denotando con ello el contorno de la tubería.

Por otra parte, es posible destacar una gran zona que se demarca a lo largo de la imagen y entre 200 y 350 *samples*; esta zona corresponde al fondo del tanque al que se hizo referencia en las imágenes en bruto (Figura 4.3), y podemos observar que se hace notar en casi todas las imágenes, concretamente desde la imagen b) hasta la imagen j). En las imágenes a) y k) esta zona no se hace presente. Esto es debido a que estas imágenes corresponden a las prospecciones tomadas cerca a las paredes del tanque, prácticamente sobre la pared del tanque. La zona que denominamos fondo del tanque varía en intensidad dependiendo del material de la tubería enterrada, es decir, esta zona se demarca más en aquellas imágenes de tuberías plásticas que en aquellas en las que hay tuberías no plásticas. Esto es debido a un fenómeno denominado convolución. A grandes rasgos lo que sucede es que la imagen de lo que se encuentra debajo de la tubería enterrada se deforma, y su deformación depende del material del que esté compuesto. Aunque con estos contrastes se pretendía eliminar las condiciones de contorno adicionales (paredes del tanque, fondo del tanque, etc.), estas perduran debido a que la medición de estas zonas se ve afectada en intensidad de la señal, por la introducción de un elemento extraño (tubería).

En la Figura 5.2 se presentan los contrastes entre los perfiles longitudinales de referencia y con tubería de PVC.

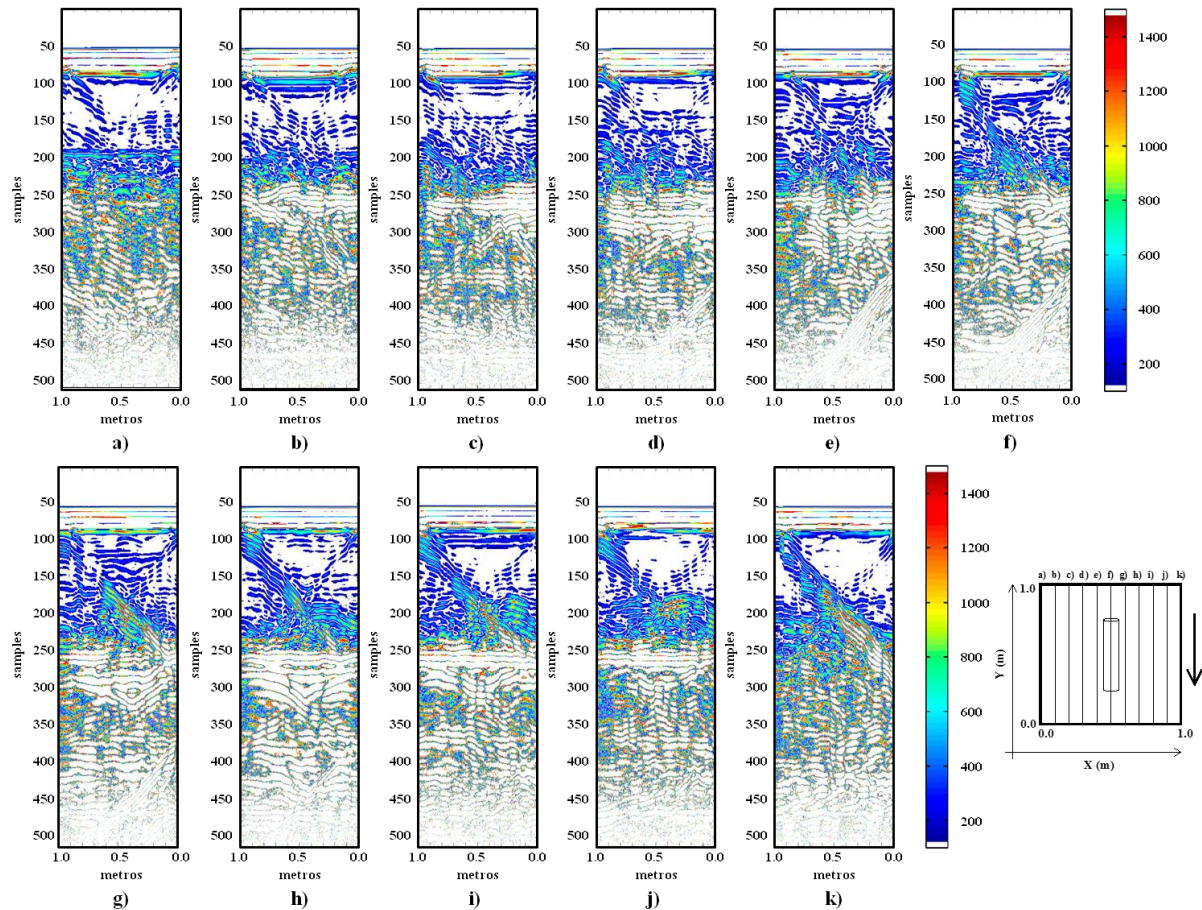


Figura 5.2. Perfiles longitudinales. Tubería de PVC. Contraste

En la Figura 5.2 podemos destacar, para las imágenes desde e) hasta g), la presencia de una formación de líneas horizontales, entre 100 y 150 *samples*, que representan los cortes a lo largo de la tubería. La ubicación de esta formación se encuentra comprendida entre 0.20 y 0.70m aproximadamente, razón por la cual asumimos que lo que se demarca es la tubería, ya que coincide con la profundidad a la que se encontraron las hipérbolas con las que se identificó a la tubería en la Figura 5.1, siendo adicionalmente coincidentes con la longitud aproximada de la tubería instalada. Es posible asumir que la imagen f) es el corte longitudinal que atraviesa a la tubería y que los perfiles e) y g) son aquellos que están a los costados, debido a que en la imagen f) la formación horizontal que se presenta se encuentra por encima de las otras. Adicionalmente, la intensidad del color que presenta es mayor y la formación presente está más definida.

Por otra parte, así como en las imágenes en bruto de los cortes longitudinales se observa una formación de líneas diagonales que atraviesan la imagen, estas formaciones se evidencian a partir de la imagen f) hasta la k), y son originadas por el tanque metálico que está ubicado justamente al lado del tanque sobre el que se trabajó. Esto se origina por el cono de energía que emite la antena y por el metal, que es mucho más fácil de detectar para el GPR que otro material.

5.3 Contrastes de Imágenes de GPR. Referencia contra tubería de PE

En la Figura 5.3 se presentan los resultados del contraste para los perfiles de PE de los cortes transversales.

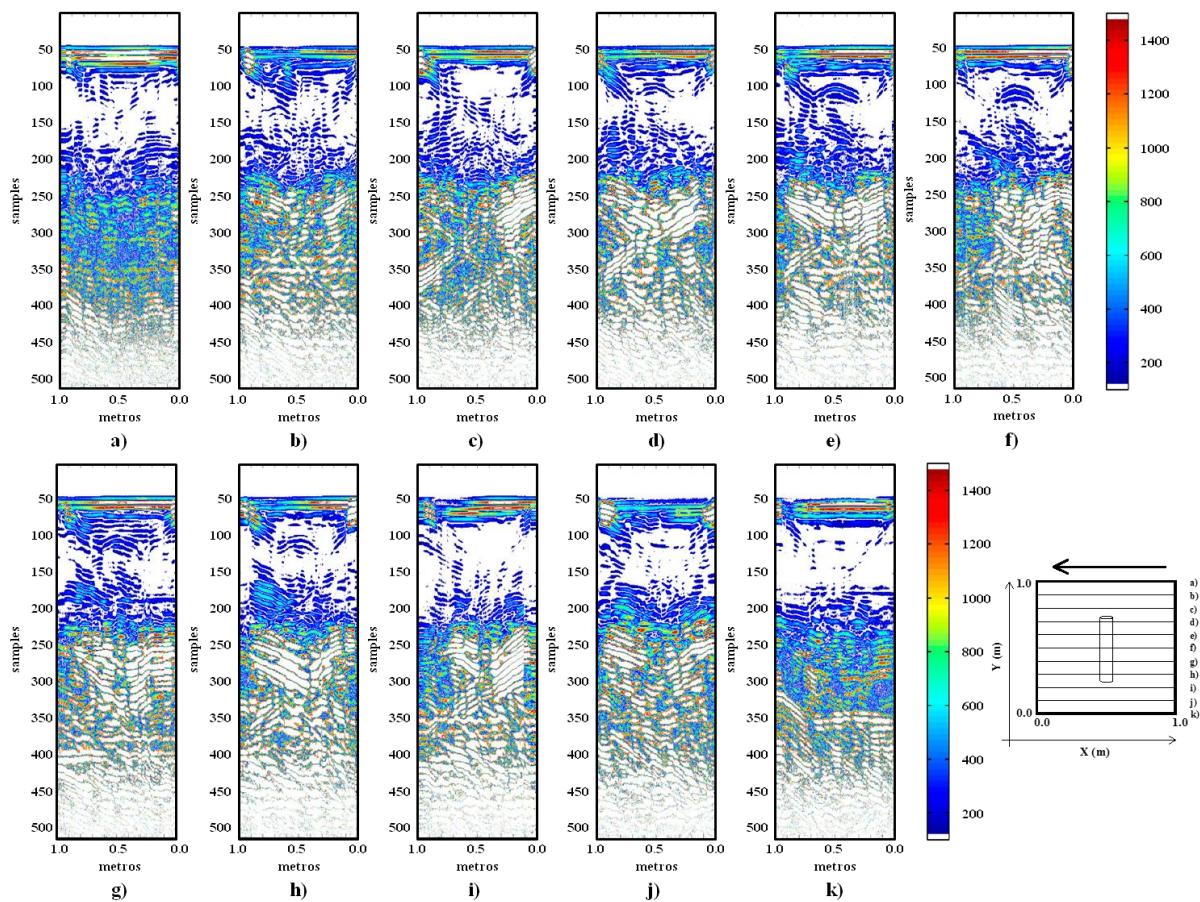


Figura 5.3. Perfiles transversales. Tubería de PE. Contraste

En el análisis de la Figura 5.3 se puede destacar la presencia de hipérbolas en las imágenes desde d) hasta h). Estas hipérbolas se hallan localizadas entre 100 y 150 *samples* y aproximadamente en el centro de la imagen entre 0.30 y 0.70m, destacando que el centro de la hipérbola coincide, en 0.50m, con la ubicación esquemática de la tubería enterrada. Teniendo en cuenta que el centro de la tubería corresponde a la imagen f), se puede destacar cómo en esta imagen se delinear las hipérbolas claramente con respecto a las otras imágenes que presentan hipérbolas. Sin embargo, conforme se recorren los perfiles de f) hacia d) y de f) hacia h), la intensidad y tamaño de la hipérbola se desvanece, característica observada anteriormente en la Figura 5.1 para el material de PVC. Es importante observar la similitud de la forma de las hipérbolas entre la imagen d) y la h), así como entre e) y g), debido a la simetría de la toma de los perfiles con respecto al centro f). A diferencia de las hipérbolas de las imágenes de la Figura 5.1, para la tubería de PE se delinear al menos 3 hipérbolas, menos espaciadas entre ellas.

Se debe mencionar que, en la Figura 5.3, es posible destacar el fondo del tanque que se demarca en una amplia área, en las imágenes desde b) hasta j), entre los *samples* 200 y 350, de la misma manera que se presenta en la Figura 5.1.

En la Figura 5.4 se presentan los resultados para los contrastes en sentido longitudinal de los ensayos con tubería de PE.

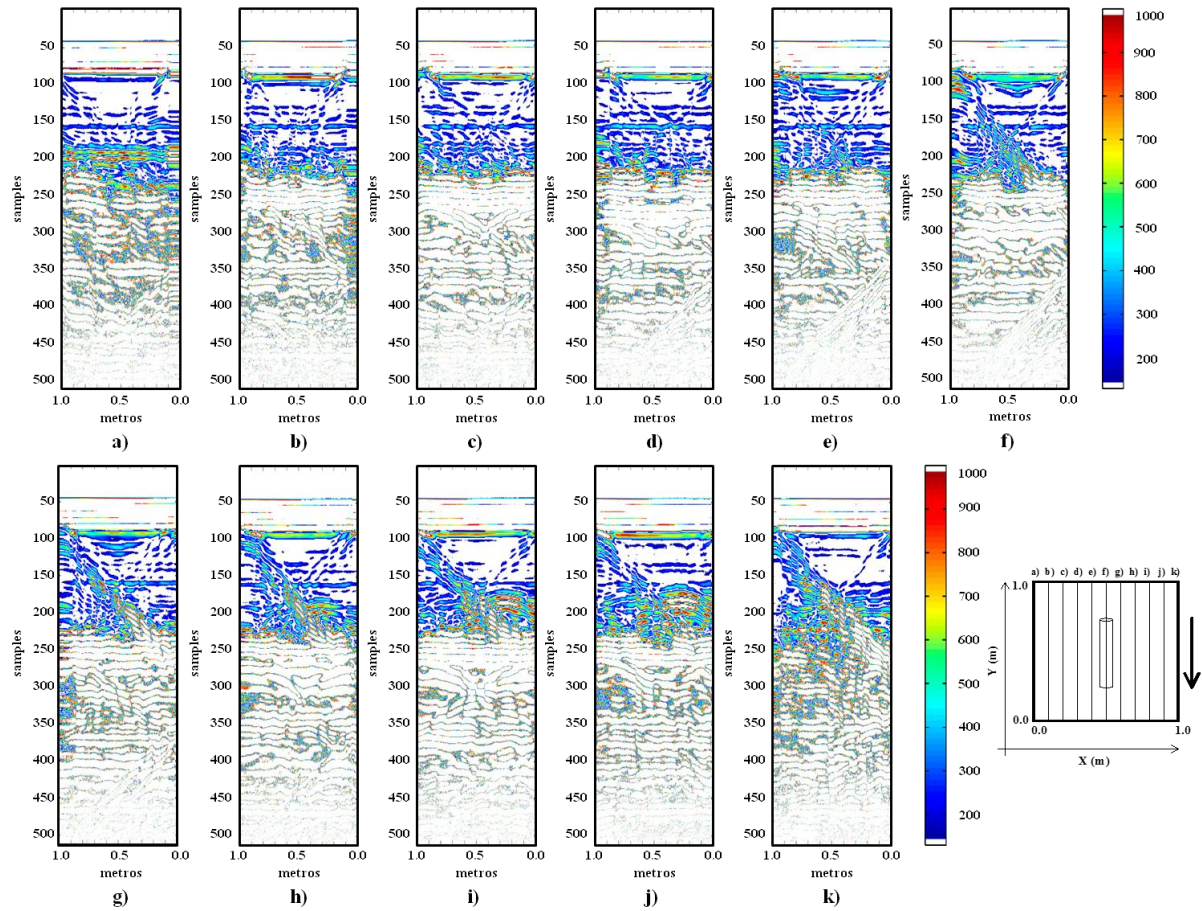


Figura 5.4. Perfiles longitudinales. Tubería de PE. Contraste

En la Figura 5.4, en las imágenes desde e) hasta g), se puede observar una formación de líneas horizontales bien definidas, entre 100 y 150 *samples*, y en el centro de la imagen entre 0.30 y 0.80m, aproximadamente. Esta formación corresponde a la tubería de PE y coincide con la profundidad a la que se encuentran las hipérbolas, así como con la longitud de la tubería instalada. La imagen f) corresponde al corte longitudinal de la tubería, mientras que las e) y g) corresponden a los perfiles más próximos a ella.

Por otra parte, se debe mencionar que aunque la forma diagonal, observada en imágenes anteriores, atribuida al tanque metálico cercano, sigue apareciendo, se observa menor intensidad en su demarcación en comparación con lo observado en la Figura 5.2.

5.4 Contrastes de Imágenes de GPR. Referencia contra tubería de AC

En la Figura 5.5 se presentan los resultados del contraste para los perfiles de AC, para el sentido transversal.

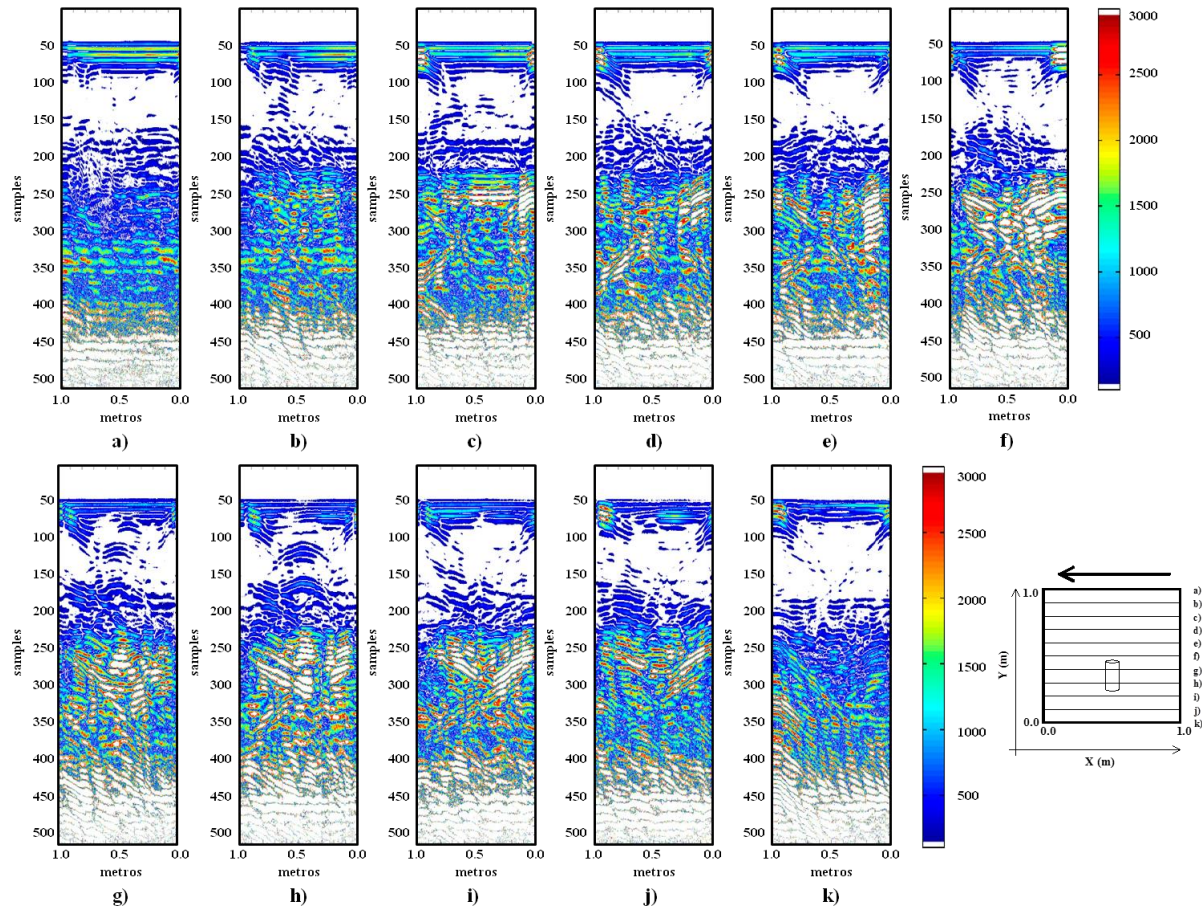


Figura 5.5. Perfiles transversales. Tubería de AC. Contraste

Se observa en la Figura 5.5, en los perfiles g) y h), la formación de varias hipérbolas muy próximas entre sí (al menos 4), entre los *samples* 100 y 150. Adicionalmente, se distingue entre 150 y 200 *samples* una segunda formación de hipérbolas. Ambas formaciones las podemos localizar en el centro de la imagen y coinciden con la ubicación de la tubería enterrada. De la misma manera, se puede destacar en la imagen f) la demarcación de algunos trazos de las primeras hipérbolas, así como que en la imagen i) se logra ver el grupo más inferior de las hipérbolas mencionadas. Es importante mencionar que esta tubería presenta una incrustación en su interior, por lo que con toda probabilidad el segundo conjunto de hipérbolas se debe a esta característica. Además, la tubería presenta una longitud irregular, y esto puede deberse a que en los extremos de la tubería, imágenes f) e i), alguno de los conjuntos de hipérbolas no se aprecien. Adicionalmente, se debe mencionar que la

consolidación de hipérbolas (intensidad y forma) es mayor que la obtenida para los materiales plásticos (Figura 5.1 – PVC y Figura 5.3 – PE).

En estas imágenes se puede notar que la zona que en imágenes previas identificábamos como el fondo del tanque, aunque en esta imagen sigue demarcándose su forma, presenta una intensidad decreciente. Esto resulta claro al comparar las imágenes con las respectivas imágenes para los materiales de PVC y PE. Esto muestra la influencia que puede llegar a tener el material no solo en la identificación del objeto en sí mismo, sino también en su discriminación de los elementos circundantes.

En la Figura 5.6 se presentan los resultados de los contrastes para los perfiles longitudinales de los ensayos con tubería de AC.

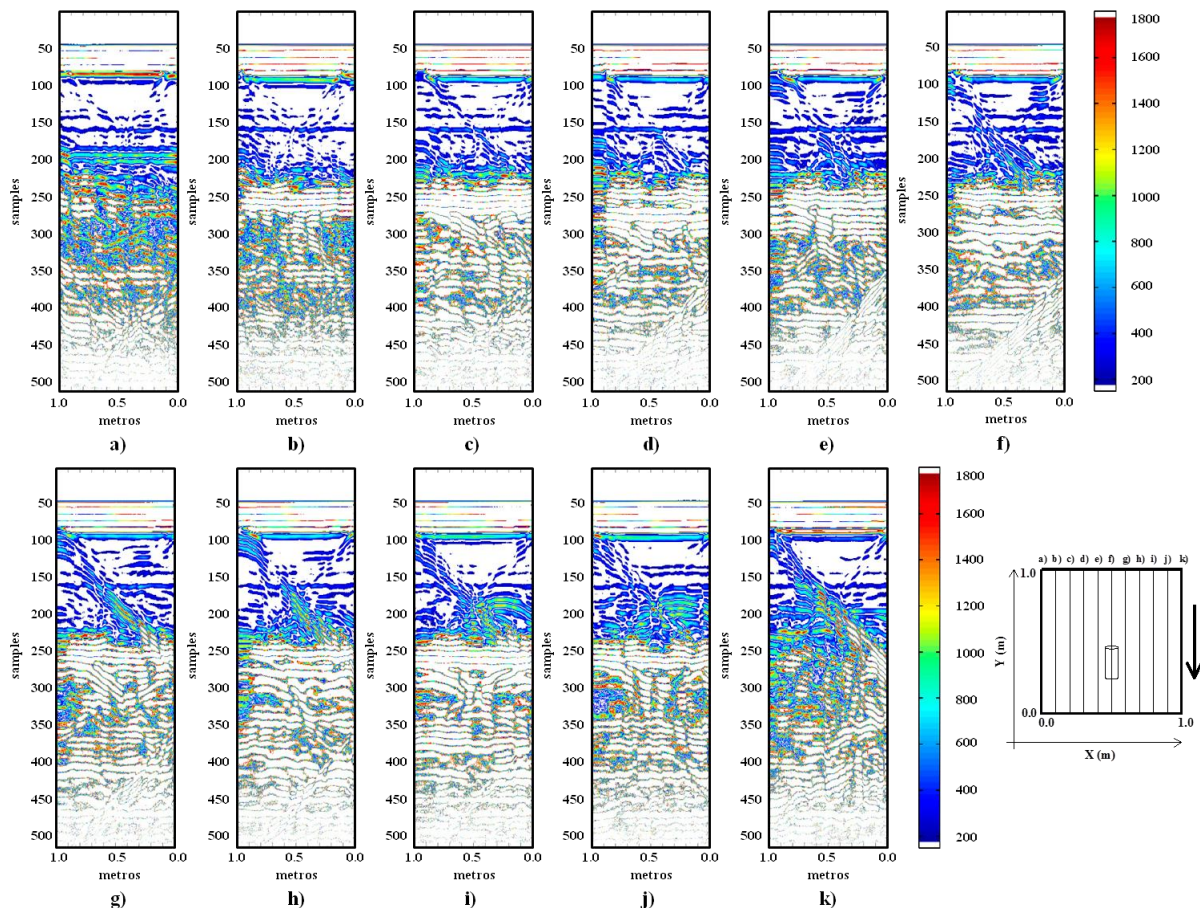


Figura 5.6. Perfiles longitudinales. Tubería de AC. Contraste

Por otra parte, en la Figura 5.6 se observa, en las imágenes desde e) hasta h), entre 100 y 150 *samples*, una formación de líneas horizontales, aproximadamente entre 0.20 y 0.50 m, de manera que la localización de esta formación coincide con la ubicación en el espacio real de la tubería enterrada.

Además es posible notar una formación de líneas que atraviesan diagonalmente las imágenes c) hasta h). Esta formación desciende de la esquina superior izquierda y continúa hasta llegar a 250 *samples*. También es posible ver el fondo del tanque, aunque no tan claro como en las figuras anteriores, y esto se debe al material de la tubería que es más reflexivo que los plásticos, siendo su intensidad de color mayor con respecto a estos. Así, las características hiperbólicas son más fácilmente apreciables en AC que en materiales plásticos. Esto ocasiona que los objetos que se encuentren situados por debajo del nivel de la tubería no sean demarcados claramente y no sean fácilmente apreciables en la imagen.

5.5 Contrastes de Imágenes de GPR. Referencia contra tubería Fund

En la Figura 5.7 se muestran los resultados de los contrastes para la tubería de fundición dúctil, para los perfiles transversales.

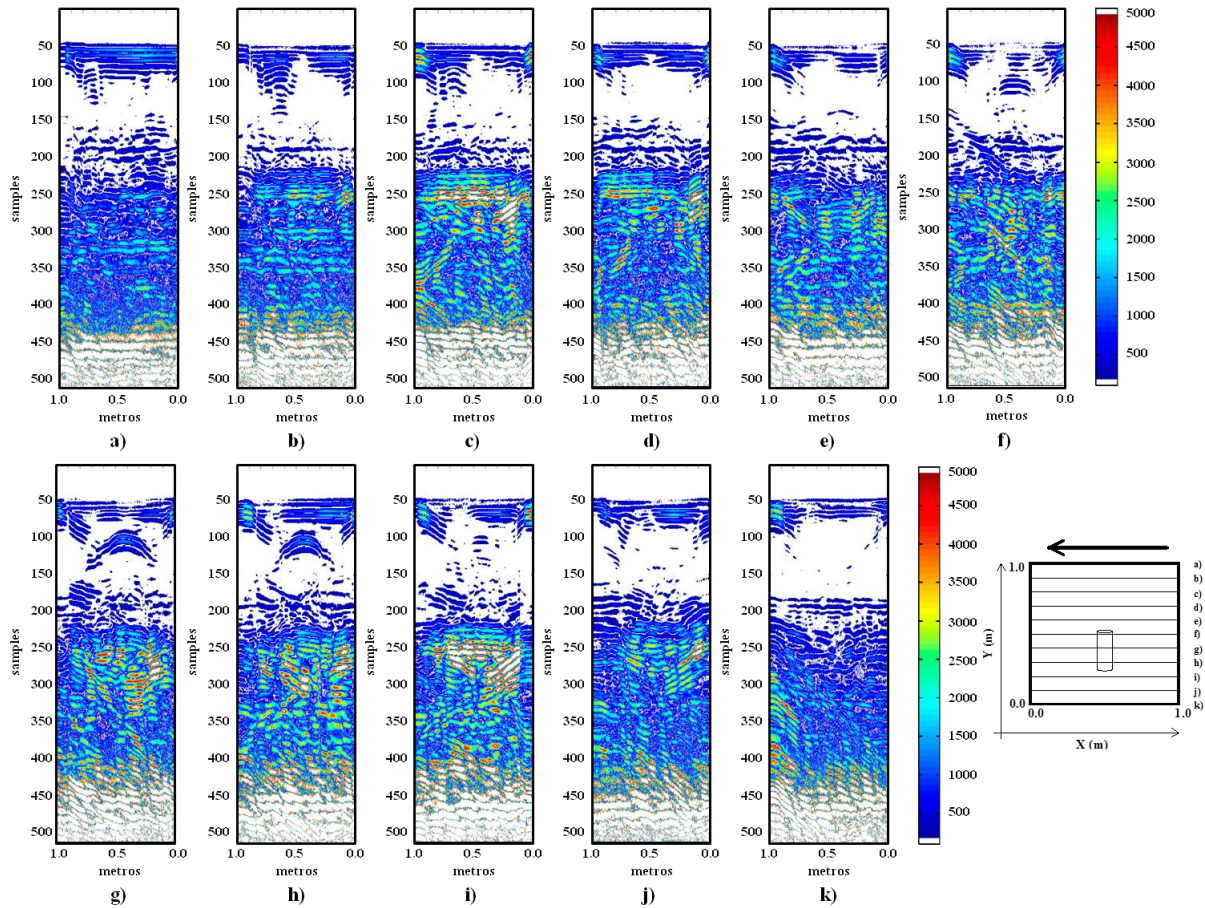


Figura 5.7. Perfiles transversales. Tubería Fund. Contraste

En la Figura 5.7, en los perfiles desde f) hasta i), se puede destacar la demarcación de hipérbolas entre 100 y 150 *samples*, que representan la tubería enterrada. Se puede observar, en la imagen f), que el conjunto de hipérbolas que se demarcan no presentan un delineado tan intenso como el observado en las imágenes g) y h). Esto puede ser el resultado de que este perfil de la tubería pudo haber sido capturado muy próximo al extremo de la misma, cortándola fuera del punto central del haz de energía emitido por la antena. Por otra parte, las hipérbolas de la imagen i) muestran que la tubería no es atravesada transversalmente, sino que el perfil fue tomado cercano a ella y el GPR alcanzó a capturar las reflexiones del material. Igualmente, en las imágenes g) y h), el conjunto de imágenes es fácil de notar; en estos perfiles tenemos la seguridad de que la tubería ha sido atravesada; nos lo indica la intensidad del color de las mismas. Por otra parte, el fondo del tanque no se aprecia con facilidad, al igual que en las imágenes de AC (Figura 5.5), donde se presenta de manera similar. La razón es que cuanto más reflexivo es el material de la tubería menos se aprecia el fondo del tanque.

En la Figura 5.8 se presentan los resultados de los contrastes de los ensayos con tubería Fund para sus cortes longitudinales.

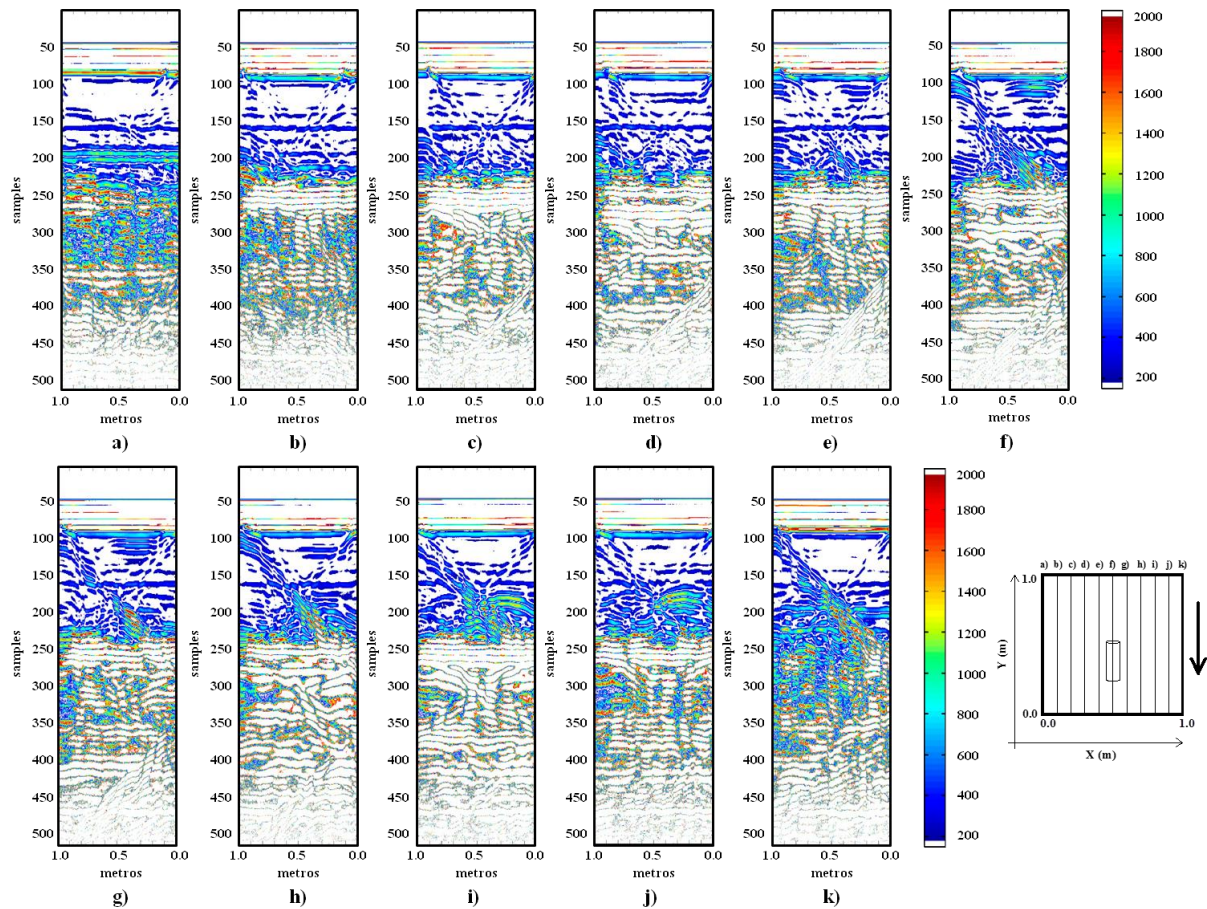


Figura 5.8. Perfiles longitudinales. Tubería Fund. Contraste

De igual forma, para la Figura 5.8, destacamos las imágenes desde e) hasta h), en las cuales se demarca una formación horizontal que indica la presencia de la tubería, localizada entre 0 y 0.50m y entre 100 y 150 *samples*. Destacando la intensidad de color que presenta la imagen f) es posible decir que este perfil es el que corta longitudinalmente a la tubería. De igual manera, se puede decir que la imagen g) representa un perfil muy próximo a la tubería, mientras que las imágenes e) y h) son los perfiles más lejanos de la misma. Como en todas las imágenes longitudinales, se vuelve a presentar la línea diagonal que atraviesa la imagen, con las mismas características.

También es posible demarcar, en las imágenes i) y j), la presencia de hipérbolas entre 200 y 250 *samples*. Esta formación ya había sido identificada en las imágenes de referencia (sección

4.3) como una posible piedra, siendo adicionalmente observada en los mismos perfiles y en la misma posición de los cortes longitudinales de los contrastes realizados para los diferentes materiales. Esta formación podría provocar una confusión en el momento de su interpretación de no contarse con las imágenes de referencia.

5.6 Extracción y análisis de características encontradas para cada material en los contrastes

En este apartado se presenta el análisis de las características particulares encontradas tras el proceso de contraste aplicado para cada tubería enterrada. A partir de los resultados obtenidos de los contrastes de las imágenes en bruto se obtuvo la Figura 5.9. En esta figura, para cada material de tubería, se muestran los rangos de color máximo y mínimo utilizados para facilitar la visualización de las características de interés de las tuberías en estas imágenes.

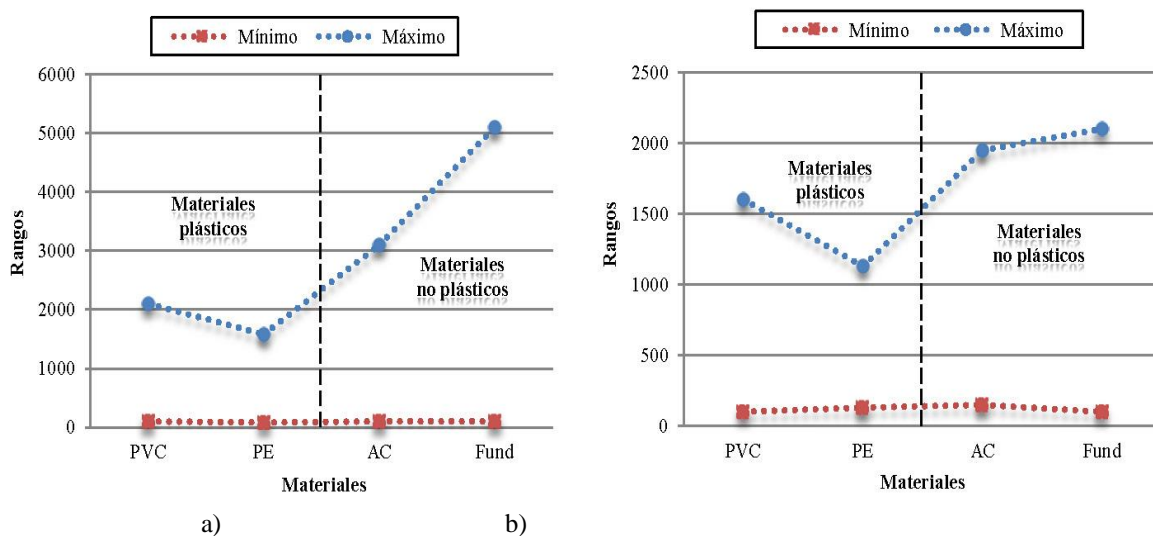


Figura 5.9. Rangos de color para cada material: a) perfiles transversales, b) perfiles longitudinales

Para entender la Figura 5.9, se debe recordar que los contrastes presentan la diferencia entre las diferentes matrices con tubería con respecto a la referencia. Por tanto, el valor obtenido representará qué tanto cambió la imagen con la colocación de la tubería en el tanque. Es así cómo en la Figura 5.9, tanto para los perfiles transversales como los longitudinales, se puede observar que los rangos mínimos se encuentran muy cercanos al cero. Esta es la razón por la

cual siempre al identificar las diferentes formas en las imágenes en bruto solo se obtiene información parcial de los objetos enterrados. Esto es debido a que la tendencia de los operarios es a buscar las hipérbolas más demarcadas en las imágenes. Con lo cual se descartan los rangos mínimos, por la poca demarcación de las anomalías, desconociendo que estos también contienen información que puede ser muy relevante para la identificación de objetos.

Por otra parte, los rangos máximos utilizados permiten ver la marcada diferencia que se presenta, respecto de la referencia, para los materiales plásticos y los materiales no plásticos. Se debe mencionar que, aunque los valores máximos de los perfiles transversales en materiales no plásticos distan significativamente de los perfiles longitudinales de los no plásticos, la tendencia entre materiales sigue siendo la misma. Esto centra la dificultad de encontrar las tuberías en imágenes de GPR de la siguiente manera $PE > PVC > AC > Fund$, tanto en cortes transversales como en longitudinales. En cualquier caso, es mucho más complejo identificar las tuberías en imágenes en bruto longitudinales que en transversales. Esto nos indica que los materiales no plásticos presentan características electromagnéticas “altas” (respecto a los plásticos) que nos permiten observar la intensidad del contraste suelo-tubería-suelo, favoreciendo la visualización (hipérbolas) de estas tuberías. También nos indica que los materiales plásticos son más difíciles de visualizar porque sus características electromagnéticas son muy parecidas a las del suelo que las rodea, razón por la cual los valores para poder destacar tales hipérbolas en las imágenes contrastadas son tan bajos respecto a los de los materiales no plásticos.

Esta comparación de los rangos máximos y mínimos de las imágenes para los diferentes materiales nos permite establecer que, aunque la selección de rangos de la escala de color facilita la identificación, es insuficiente para la extracción de características, y debe ser complementada con la identificación de formas u otra metodología que favorezca el estudio de las interacciones entre los valores.

Por otra parte, después de haber sido analizadas las imágenes, fueron extraídos los contornos (formas) de las tuberías enterradas para cada material. Las analizamos cada una a continuación, y los resultados se presentan en la Figura 5.10.

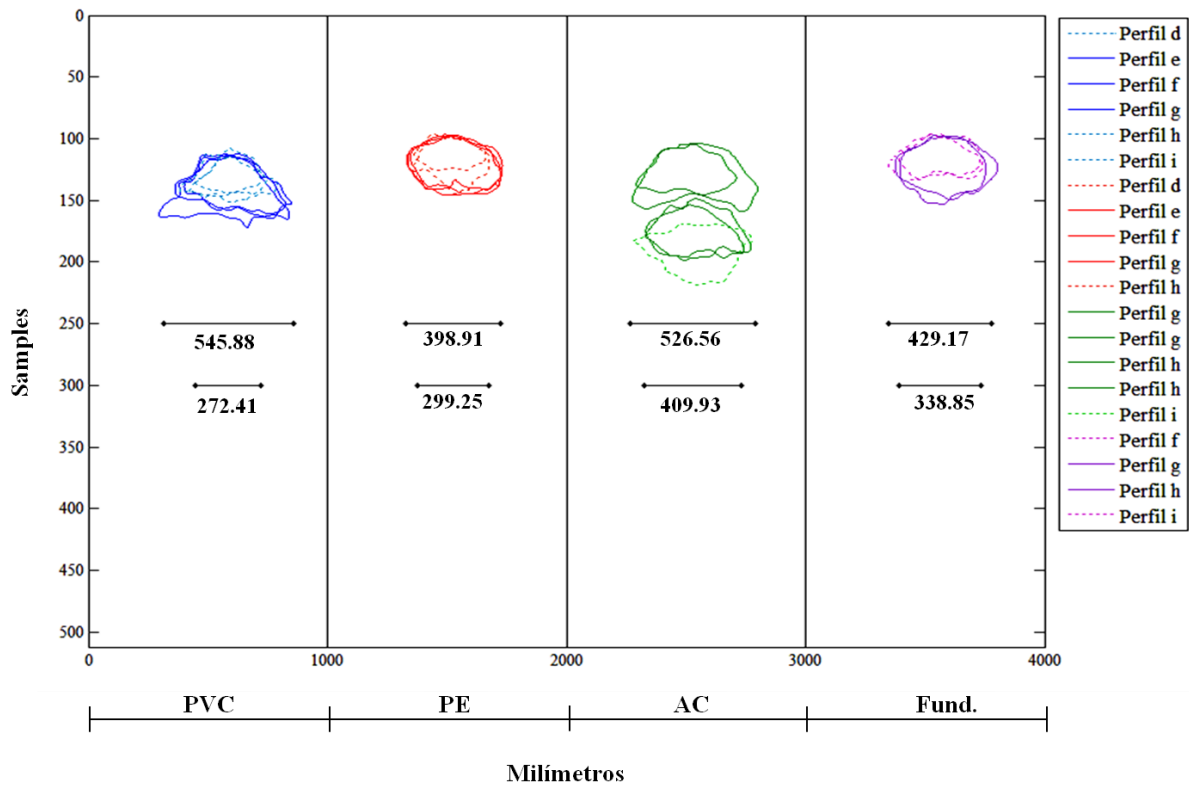


Figura 5.10. Formas encontradas en las imágenes resultantes de los contrastes

En la Figura 5.10 se muestran los cuatro estados del tanque (4 tuberías enterradas) conjuntamente, para facilitar la comparación entre las diferentes formas encontradas en las imágenes de los contrastes. Por otra parte, es importante decir que el eje horizontal es representado en milímetros (distancia) y el eje vertical en *samples* (tiempo), que al no corresponder a la misma escala, ni variable de medición, hace que las tuberías encontradas presenten formas irregulares. Sin embargo, sí que presentan formas cerradas que nos dan una idea de la posición y la forma de la tubería. Por otra parte, es importante mencionar que al observar detenidamente los contornos delimitados para cada tubería, encontramos características particulares que nos aportan información de cada material.

Se puede observar que, para cada material, las formas encontradas presentan continuidad entre ellas, ya que presentan parecida tendencia irregular, independientemente de su tamaño. También es posible ver, dado que se cuenta con una métrica adecuada, que el centro de todas las tuberías (en distancia –mm) corresponde al centro del tanque. Las diferencias en profundidad, por su parte, para cada material, están muy próximas entre sí. Esto es extensible

al caso de comparar los contornos de tuberías obtenidos para los diferentes materiales. Puede observarse que, aunque la profundidad no es exacta, la misma es muy similar en todos los casos (*sample* 100). Esto permitirá relacionar el tiempo de penetración de la onda con la profundidad a clave de la tubería enterrada. También se debe mencionar que una de las causas por las cuales esta profundidad inicial no es exactamente igual, es que la profundidad de enterramiento es aproximada (a 21 cm).

También es importante señalar que en esta figura se muestran los contornos de las tuberías, diferenciando entre aquellas que cortan la tubería por la parte más próxima al centro (delimitada con una línea continua), y las que cortan la tubería por sus extremos o bien que simplemente no la tocan (con línea punteada). Analizando las formas encontradas para cada tubería, observamos que los contornos en línea continua presentan una gran similitud entre sí en cuanto a forma y tamaño. Incluso se puede observar que cuanto más cercanos sean los cortes al centro de la tubería, estos presentan una deformación mayor. También se observa en esta figura la forma más grande y más distorsionada de la tubería que corresponde al corte más central de esta. Asimismo, podemos observar que en algunos casos hay formas que se superponen debido al parecido entre ellas.

Por otra parte, observando los contornos delimitados por las líneas punteadas, es posible notar la gran diferencia que presentan respecto a las formas delimitadas por las líneas continuas. Estas formas presentan características parecidas entre ellas, ya que son más pequeñas y su forma, por lo general, es muy similar.

Analizando cada tubería, encontramos que para la tubería de PVC se observan formas que, en general, tienden a alargarse hacia uno o ambos costados en su parte inferior. Particularmente, las formas de este material se hacen presentes entre 110 y 170 *samples* en el sentido del eje *y*, y para el sentido del eje *x* se hacen notar entre 300 y 850mm aproximadamente. Con esto podemos decir que, en general, las formas correspondientes a PVC presentan una longitud máxima de 550mm y una longitud mínima de 270mm. En cuanto a la deformación vertical encontramos que varía mucho dependiendo del perfil. Sin embargo, para este material encontramos que la deformación vertical la encontramos entre 110 y 170 *samples* aproximadamente.

Además, para la tubería de PE, se puede ver gran similitud entre las distintas formas, que se asimilan claramente a elipses. Podemos ver que las figuras presentan una longitud máxima de

400mm y una longitud mínima de 300mm y que se extienden en profundidad, presentando una deformación entre 100 y 150 *samples*, aproximadamente.

Por otra parte, al observar las formas que se demarcan para la tubería de asbesto cemento, encontramos dos formas que se delinear particularmente para este material. Consideramos que la primera forma encontrada corresponde a la tubería, y que la segunda se debe a la incrustación con la que cuenta la tubería. Las formas encontradas presentan una longitud máxima de 530mm y una longitud mínima de 400mm, así como una deformación vertical entre 105 y 220 *samples*.

Observando las formas que corresponden a la tubería de fundición dúctil, podemos decir que la forma irregular que se presenta es muy parecida a una elipse. También podemos observar que las formas de este material son muy similares al PE. Sin embargo, una característica particular de las formas correspondientes a este material es que son más grandes que las del PE, tanto en sentido del eje *x* como en el del *y*. Por otra parte, podemos destacar que estas formas presentan una longitud máxima de 430mm y una longitud mínima de 340mm, además de una deformación vertical entre 100 y 150 *samples*, aproximadamente.

Vistas las características particulares que se presentan para cada material, podemos decir que los materiales que mayor deformación presentan, en el sentido del eje *x*, son la tubería de PVC y la tubería de asbesto cemento.

En la Figura 5.11 se presenta un contorno promedio de cada material.

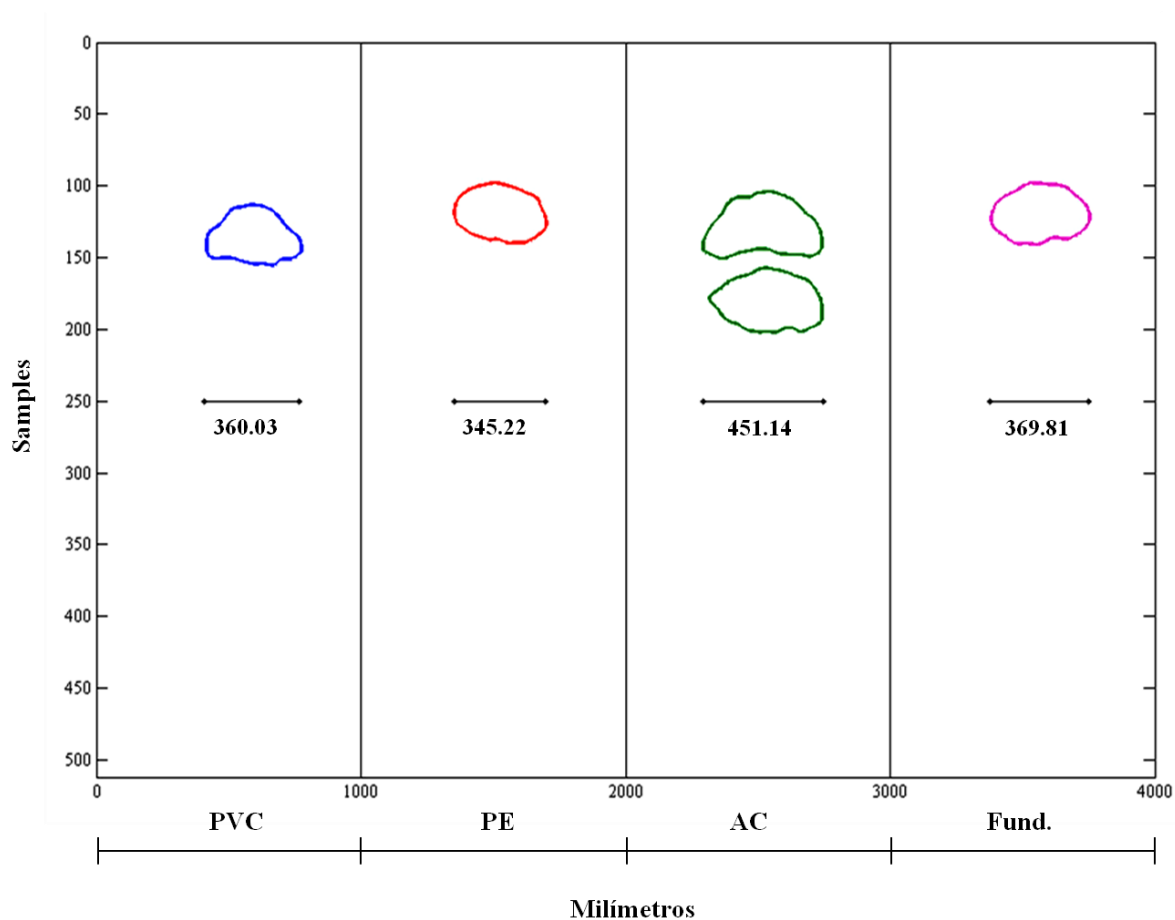


Figura 5.11. Formas promedio

Es posible observar que las formas de PE y fundición dúctil presentan gran parecido en tamaño y forma. En cuanto a la forma de PVC podemos destacar que en tamaño es similar a PE y fundición dúctil, pero la forma tan irregular presenta más parecido a la de asbesto-cemento. Adicionalmente, se puede notar que el material que más deformación presenta es el asbesto-cemento tanto en términos de forma como de tamaño.

Con el objetivo de demostrar que con estos parámetros es posible reconstruir en 3D las respectivas configuraciones para cada tubería ensayada, se presenta la Figura 5.12.

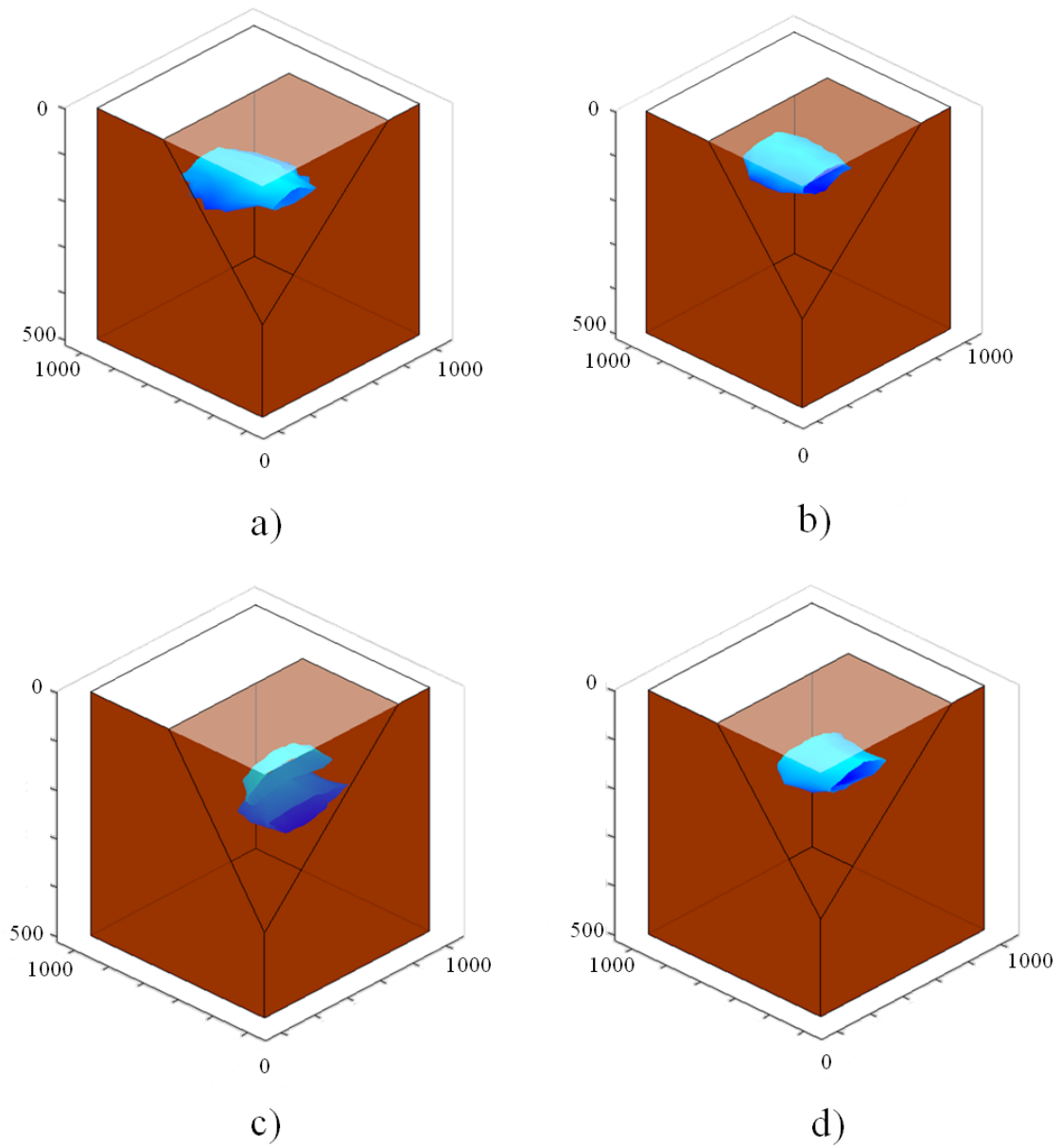


Figura 5.12. Reconstrucción de tuberías en modelos 3D: a) tubería de PVC, b) tubería de PE, c) tubería de AC, d) tubería Fund

CAPITULO VI

CONCLUSIONES, TRABAJOS FUTUROS Y APORTACIONES EN HIDRÁULICA URBANA

6.1 Introducción

En este capítulo se presentan las conclusiones más relevantes obtenidas con la realización de este trabajo. De igual manera, se proponen algunas líneas de investigación que pueden dar continuidad al trabajo desarrollado. Un resumen de las principales aportaciones que este trabajo ha proporcionado, en campos como la hidráulica urbana (siendo este el principal objetivo) y en otros más generales, cierra este capítulo.

El objetivo principal de la tesina fue evaluar la viabilidad de la extracción de patrones mediante imágenes de GPR. Esto se consigue mediante el planteamiento de una metodología que permita avanzar hacia la localización automática de tuberías mediante el uso del GPR como técnica no destructiva. Se pretendía con este trabajo que los patrones encontrados y la metodología en sí misma fueran el punto de partida para la generación de un sistema capaz de reconocer e identificar tuberías de manera no invasiva en los SAA. Con lo cual se busca localizar trazados y características de tuberías en los SAA, al tener en cuenta que el conocimiento de estos favorece la eficiencia de la gestión técnica de los mismos.

Para ello, fueron realizados ensayos de laboratorio con el fin de obtener imágenes de GPR de tuberías comúnmente instaladas en los SAA, las cuales fueron sometidas a un análisis exhaustivo. En ellas se buscaba identificar la máxima cantidad de información que permitiese reconstruir la configuración planteada para cada uno de los ensayos, independientemente de la dificultad que la interpretación representara. Este análisis se realizó haciendo especial énfasis en los objetos de interés, siendo en nuestro caso estos objetos las tuberías instaladas.

Posteriormente, en este documento, se planteó una metodología para la identificación, en imágenes de GPR, de patrones de las tuberías instaladas en los SAA. La potencia de esta herramienta metodológica se basaba en la simplicidad de la misma, ya que puede ser fácilmente implementada y no requiere instrumentos adicionales de alto coste. Tal metodología consiste en un proceso de redimensionamiento (en distancia) de imágenes capturadas con GPR y un contraste con una referencia de las imágenes con tuberías. Si bien es cierto que en los SAA no es posible tener una referencia, tal como se plantea en este documento, que permita la obtención de las tuberías en las imágenes de GPR, también lo es que reconocer e identificar los patrones en imágenes de GPR en ensayos de laboratorio suministrará parámetros cuantificables que faciliten el entrenamiento de sistemas inteligentes, que identifiquen los mismos y por tanto detecten las tuberías. Esto sin que sea necesario el uso de dichas referencias, o bien planteando la construcción de algún sistema que genere imágenes de referencias sintéticas que faciliten la identificación de las tuberías en las imágenes de GPR.

El sistema de redimensionamiento planteado fue basado en la detección del desplazamiento de la antena de GPR, mediante un sistema de visión global, empleando una cámara web fija. Este sistema fue implementado y aplicado en las imágenes de GPR capturadas y esto permitió extraer las diferencias (contrastes) entre las imágenes de referencia y las imágenes de tuberías. Este redimensionamiento, adicionalmente, permitió la ubicación espacial de los elementos a identificar, con el propósito de facilitar el entendimiento de los mismos mediante imágenes 3D. Los resultados de la implementación de este redimensionamiento fueron satisfactorios al proporcionar, a bajo coste, ubicaciones espaciales adecuadas. Tras el desarrollo del trabajo y todo lo que una investigación conlleva, encontramos que las interpretaciones convencionales de las imágenes de GPR, en el mejor de los casos, son llevadas a cabo mediante técnicas de visualización por parte de un operador, quien se apoya en estos métodos para mejorar la calidad de las imágenes y obtener una interpretación más acertada de lo que en ella se pueda encontrar. Sin embargo, no deja de ser un método que depende de las habilidades del operador, lo que trae como consecuencia que la interpretación no se realice bajo criterios objetivos, ya que dependen de la experiencia del operador. Es de esta manera cómo las interpretaciones de una misma imagen pueden variar con la experiencia del operario e inclusive para el mismo operario en el tiempo. Es por ello que en el presente trabajo se persigue desarrollar una herramienta que permita, a los operarios de la red, la interpretación

objetiva de estas imágenes sin necesidad de que cuenten con habilidades especiales o una amplia experiencia en el manejo de GPR.

6.2 Conclusiones, imágenes en bruto

Por otra parte, retomando los ensayos, destacamos que han sido realizados 5 ensayos mediante prospección con GPR sobre un tanque en laboratorio, donde han sido enterradas cuatro tuberías de diferentes materiales (PVC, PE, Asbesto-cemento y Fundición dúctil), comúnmente empleados en los SAA. Tras realizar el análisis e interpretación de las imágenes en bruto se encontró que:

- La visualización de los datos en bruto es sumamente compleja para personal no familiarizado con este tipo de imágenes, siendo necesario un alto nivel de experiencia y habilidad para llevar a cabo las interpretaciones de imágenes de GPR que conduzcan a reconocimientos adecuados. Además, tales interpretaciones carecerán de objetividad, no proporcionarán exhaustividad respecto de la información contenida, y no serán, en muchos casos, repetibles en el tiempo. Esto, sin duda, no permite explotar todo el potencial que puede brindar la herramienta GPR.
- Las tuberías de materiales plásticos (PVC y PE) presentan mayor dificultad de visualización en las imágenes en bruto de GPR, siendo, en algunos casos, no visibles. Este fenómeno se debe a que las características electromagnéticas del suelo que rodea a la tubería son del mismo orden de magnitud que las del material de las tuberías. Esto hace que presenten valores de amplitud de onda tan débiles que no permiten delimitar sus contornos en las imágenes de GPR.
- En el caso de tuberías no plásticas evaluadas en este trabajo (AC y Fund), se obtuvieron demarcaciones más claras, en comparación con los materiales plásticos. Esto permitió una identificación más contundente de las mismas. En el caso de la tubería de AC, también fue posible identificar la presencia de material en el interior de la tubería (incrustación calcárea).
- A pesar de la dificultad de visualización para los materiales plásticos, es posible la identificación de formas en los radargramas. La identificación de formas se puede dar para los materiales no plásticos (materiales reflexivos) debido al marcado contraste de intensidad de color, y también para los materiales plásticos; aunque para estos

materiales presentan menor contraste, es posible su demarcación; esto permite localizar las tuberías en las imágenes de GPR.

- En todos los ensayos con tuberías y en sentido longitudinal, independientemente de la dificultad, fue posible identificar formaciones, en algunos casos como hipérbolas alargadas, y en otros como líneas, asociadas a la tubería. Esto aparece como característica adicional a la tradicional identificación de formas de hipérbolas con ensayos que corten la tubería en sentido transversal.
- Adicionalmente, en las imágenes de los ensayos realizados se pudieron identificar ciertas características de contorno, tales como: la pared del tanque, el fondo del tanque, piedras y un tanque metálico contiguo, entre otros. Esto tiene importancia en el momento de ubicar las tuberías y entender su entorno circundante.
- Se obtuvo que, con la relación de las interpretaciones, es posible identificar los trazados de tuberías en SAA y hacerse una idea del diámetro que presentan. Aunque los mismos no presenten un alto grado de exactitud, estos resultados justifican y motivan el estudio realizado, que persigue posibilitar identificaciones más rápidas y menos subjetivas en imágenes de GPR.

6.3 Conclusiones. Contrastes

Después de haber realizado el redimensionamiento y, posteriormente, el contraste entre las imágenes de referencia en bruto y las imágenes de las tuberías en bruto, en este trabajo se obtuvieron imágenes que suministran información más clara y precisa sobre las tuberías instaladas. El procedimiento aplicado ha mejorado la visualización de las imágenes tanto para aquellos materiales débilmente reflexivos como para los altamente reflexivos, destacando las características de las tuberías en las imágenes. Con lo cual fue posible la identificación, extracción y comparación de los mismos. De los resultados obtenidos podemos destacar que:

- Para materiales plásticos como el PVC se presenta una mejora en la visualización, obteniendo mayor contraste, permitiendo resaltar mejor las características para esta tubería. Además para el PE, fue posible observar que presenta una mayor demarcación de las hipérbolas en comparación con las imágenes en bruto. Los resultados obtenidos para estas tuberías son de especial interés, ya que sus características electromagnéticas son del mismo orden de magnitud que las del suelo, razón por la cual en múltiples estudios se plantea la inviabilidad de detección de estos materiales.

- En los casos de las tuberías de materiales no plásticos (asbesto-cemento y fundición dúctil) ensayadas, los resultados mostraron que, aunque estos materiales ya eran visibles en las imágenes en bruto, el contraste mejora considerablemente la visibilidad. Esto es debido a que se demarcan claramente los perfiles de las formas propias (hipérbolas), en comparación con las imágenes en bruto. Con esto se evidenciaron algunas características que no era posible detectar en las imágenes en bruto.
- Además de proporcionar una mayor visualización de las tuberías, las imágenes de contraste permiten obtener información fundamental para establecer características propias de cada material. Debido a que para poder tener una visualización clara de lo que se busca es necesario establecer una escala de color adecuada, al elegir el rango de color, obtenemos rangos específicos para cada material. Estos rangos dan juego para establecer criterios que ayuden a la identificación de tuberías y su posterior caracterización.
- Por otra parte, tras analizar las imágenes de los contrastes, se observó la presencia de formas cerradas, las cuales, al ser extraídas y comparadas entre ellas, permitieron observar diferencias propias para cada tubería. Se pudo observar que las formas de PVC tienden a alargarse más en su parte inferior dando una forma parecida a un triángulo. Por otra parte las formas encontradas para PE y fundición dúctil fueron muy similares entre sí. Las formas para el material de AC presentan ciertas particularidades, ya que debido a la incrustación que presenta esta tubería, se demarcan dos formas bastante irregulares.
- De las formas obtenidas para todos los materiales, se puede decir adicionalmente que los mismos se presentan a una profundidad muy similar, con lo que establecer la profundidad a la cual se encuentran las tuberías instaladas resulta verosímil. En el caso del diámetro de las tuberías, se obtuvo que, dadas las características de medición, haz de energía cónico, así como del material, este diámetro puede ser más grande del instalado. Sin embargo, se considera que estableciendo una relación entre la profundidad obtenida y el diámetro medido, se puede llegar a obtener el diámetro real.
- Adicionalmente, se demostró que representar espacialmente (modelo 3D) las formas obtenidas brinda información que se aproxima a la realidad.
- Con estas características encontradas, es posible desarrollar una herramienta que, por medio de patrones, permita la localización y caracterización de tuberías utilizadas en los SAA, para facilitar la adecuada gestión de estos sistemas.

Finalmente, en general, podemos concluir que la metodología planteada ha sido adecuada, ya que se han obtenido resultados importantes que permiten dar un paso hacia el desarrollo de una herramienta que permita ser capaces de localizar y caracterizar tuberías. Además se observó una considerable mejora en la visualización de las características de las tuberías. Sobre todo se debe destacar que se logró una importante mejora en la visualización de los materiales plásticos que, debido a su composición, son difíciles de localizar con la técnica GPR. Por otra parte, se observa la aparición de diferentes formas de las tuberías, de acuerdo a su composición, por lo que su clasificación es posible. Y finalmente, la aplicación del método es sencilla y no depende del criterio de especialistas.

6.4 Desarrollos futuros

Desde el comienzo del trabajo se ha tenido claro que lo que se pretende es dar respuesta a la problemática referente al desconocimiento de los trazados de la red y la caracterización de sus componentes para SAA mediante la técnica GPR. En este trabajo se ha desarrollado una investigación referente a la viabilidad de extracción de características de tuberías presentes en imágenes de GPR. Teniendo en cuenta la metodología planteada y observando los resultados derivados de su aplicación se abren líneas de investigación referentes hacia el desarrollo de una herramienta que permita la clasificación automática de características de tuberías de los SAA por medio de sistemas inteligentes. Para esto se propone trabajar en aspectos como:

- Mejoramiento del sistema de redimensionamiento. Debido a los buenos resultados obtenidos con el sistema de redimensionamiento planteado en este documento, se plantea continuar por esta línea buscando un sistema completamente automático para la detección del movimiento de la antena. Además, deberán diseñarse algoritmos más avanzados para la identificación de objetos. También, se planteará, adicional a la identificación de colores, la identificación de formas, a fin de hacer más robustos los algoritmos.
- Evaluación del uso de radargramas sintéticos o el planteamiento de una imagen de prospección en aire, como imagen de referencia, para el contraste. Con esto se podría extender el método de manera directa a ensayos donde no se cuenta con imagen de referencia.

- Uso de los patrones de tuberías obtenidos en este trabajo en un sistema inteligente de clasificación de patrones.

6.5 Aportaciones en hidráulica urbana

Con los resultados obtenidos del trabajo realizado, se obtienen patrones que permiten avanzar hacia el desarrollo de una herramienta que permita la localización automática de tuberías de SAA, por medio de GPR como metodología no destructiva, siendo el resultado último favorecer a los SAA en la gestión técnica de sus activos. Esto, a bajo impacto económico y social.

Adicionalmente, con este trabajo, se aporta una herramienta para el estudio de no sólo tuberías, sino otras características y algunos fenómenos que puedan presentarse en los activos de los SAA. Esto se pone de manifiesto en trabajos ya iniciados o presentados, en calidad de autor o como colaborador por parte del autor de este documento. Entre otros aspectos, esta metodología puede ser empleada en aspectos como la construcción de modelos 3D de tuberías de SAA basados en imágenes de GPR (Ocaña-Levario et al., 2014), identificación de fugas en SAA mediante GPR (Ayala-Cabrera et al., 2013b), evolución temporal de fugas en SAA basados en imágenes de GPR (Ayala-Cabrera et al., 2014), creación de escenarios de realidad aumentada basados en GPR (Ayala-Cabrera et al., 2013c), por mencionar algunos ejemplos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aracena, D., Campos, P., Tozzi, C.L.** (2005). Comparación de técnicas de calibración de cámaras digitales. *Revista Facultad de Ingeniería-Universidad de Tarapacá*, 13(1), pp. 57-67.
- Ayala-Cabrera, D.** (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). Tesina de Máster. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Ayala-Cabrera, D., Pérez-García, R., Herrera, M., Izquierdo, J.** (2010). Visualización de tuberías plásticas en sistemas de abastecimiento de agua con imágenes de GPR. En: XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este (Uruguay).
- Ayala-Cabrera, D., Herrera, M., Izquierdo, J., Pérez-García, R.** (2011). Location of buried plastic pipes using multi-agent support based on GPR images. *Journal of Applied Geophysics*, vol.75(4), pp. 679-686.
- Ayala-Cabrera, D., Ocaña-Levario, S.J., Pérez -García, R., Izquierdo, J., Herrera, M.** (2013a). GPR y realidad aumentada: hacia la visualización automática de tuberías en SAA. En: IX Seminario euro latinoamericano de sistemas de ingeniería (SELASI), Noviembre 2013, Isla de Margarita, Republica Bolivariana de Venezuela.
- Ayala-Cabrera, D., Herrera, M., Izquierdo, J., Ocaña-Levario, S.J., Pérez-García, R.** (2013b). GPR-Based Water Leaks Models in Water Distribution Systems. *Sensors*, vol. 13, pp. 15912-15936.
- Ayala-Cabrera, D., Herrera, M., Izquierdo, J., Pérez-García, R., Ocaña-Levario, S.J.** (2013c). Dynamic management of water supply systems: A tool to build scenarios by merging GPR surveys and augmented reality. En: 8th International Conference of EWRA - Water Resources Management in an Interdisciplinary and Changing Context 2013, Junio de 2013, Porto, Portugal.
- Ayala-Cabrera, D., Izquierdo, J., Pérez-García, R., Ocaña-Levario, S.J.** (2014). Water leakage evolution base don GPR interpretations. En: Water Distribution Systems Analysis Conference, WDSA2014, 14-17 de Agosto 2014, Bari, Italia. (Aceptado).
- Ballester, P.G., Rodés, J.P.** (2012). Uso de la prospección geofísica mediante georradar para el levantamiento topográfico de redes de servicio urbanos. En: I Congreso de Ingeniería Municipal, cim2012, Octubre 2012, Barcelona, España.
- Bereciartua-Pérez, A., Picón-Ruiz, A.** (2011). Localización e identificación de activos soterrados mediante georadar y procesamiento de imagen. *DYNA Ingeniería e Industria*, vol. 86 (4), pp. 438-447.
- Biskup, K., Lorenzo, H., Arias, P.** (2005). Aplicabilidad del radar del subsuelo para el estudio de la zona no saturada del suelo: ejemplos en ambientes arenosos costeros. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, vol. 7, pp. 197-204.

- Bonomo, N., De la Vega, M.** (2010). El método del Georradar, URL http://gaia.df.uba.ar/Main_archivos/lineas.pdf. Visitada 02 de enero de 2014.
- Bouguet, J-Y.** (2014). Camera calibration toolbox for Matlab, http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/. Visitada 05 de marzo de 2014.
- Cist, D.B., Schutz, A.E.** (2001). State of the art for pipe & leak detection DEFC26-01NT41317. A low-cost GPR gas pipe & leak detector, Geophysical Survey Systems, Inc.
- Conyers, L.** (2005). Ground - Penetrating Radar. En Johnson, J.K., Remote sensing in archaeology: an explicitly North American perspective. Editorial University of Alabama Press, Alabama, UUEE, pp. 131-159.
- Dojack, L.** (2012). Ground penetrating radar theory, data collection, processing, and interpretation: a guide for archaeologists. URL: <https://circle.ubc.ca/bitstream/id/157474/Dojack%202012%20GPR%20Guide.pdf>, visitada 13 de febrero de 2014.
- García, A.** (2012). Planos de tierra. En García, A., Antenas verticales para bajas frecuencias (MF y HF). Editorial Marcombo, Barcelona, España, pp. 115-130.
- Garzón, M., Valente, J., Zapata, D., Barrientos, A.** (2013). An Aerial–Ground Robotic System for Navigation and Obstacle Mapping in Large Outdoor Areas. Sensors, vol. 13, pp. 1247-1267.
- Gonzales, G., Castillo, E.** (2010). Inspección de las dimensiones de objetos mediante procesamiento de imágenes. En: Encuentro de investigación en ingeniería eléctrica (ENINVIE 2010), Marzo 2010. Zacatecas, México.
- Göttshe, F.M.** (1997). Identification of cavities by extraction of characteristic parameters from ground probing radar reflection data. Tesis Doctoral. Christian-Albrechts Universität, zu Kiel. Kiel, Alemania.
- Lerner, R. M.** (1974). Ground Radar System. United States Patent #3831173. Assignee: Massachusetts Institute of Technology.
- Loulizi, A.** (2001). Development of Ground penetrating radar signal modeling and implementation for transportation infrastructure assessment. Tesis Doctoral. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia.
- Maas, Ch., Schmalzl, J.** (2013). Using pattern recognition to automatically localize reflection hyperbolas in data from ground penetrating radar. Computers & Geosciences, vol. 58, pp. 116-125.
- Martínez, S., Sisto, R.** (2009). Posicionamiento y Sensor Data Fusión. Trabajo de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad de la Republica. Montevideo, Uruguay.

- Moorman, B.J.** (2001). Ground-penetrating radar applications in paleolimnology. En Last, W.M., Smol, J.P., Tracking environmental Change Using Lake sediments: Physical and chemical techniques. Editorial Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 23-47.
- Ocaña-Levario, S.J., Ayala-Cabrera, D., Izquierdo, J., Pérez-García, R.** (2014). 3D model construction of water supply system pipes based on GPR images. En: 8th International Congress on Environmental Modelling and Software (iEMSs), Junio 15-19, 2014, San Diego, California, USA. (Aceptado).
- Ocaña-Levario, S.J., Ayala-Cabrera, D., Pérez-García, R., Izquierdo, J., Herrera, M.** (2013). Reconocimiento de patrones para la localización y caracterización de elementos plásticos de los sistemas de abastecimiento de agua mediante GPR. En: XII Simposio Iberoamericano sobre sistemas de abastecimiento de agua y drenaje urbano. Buenos Aires (Argentina).
- Pasolli, E., Melgani, F., Donelli, M.** (2009). A pattern recognition system for extracting buried object characteristics in GPR images. Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proc. of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2009), pp. 430-433.
- Rizo, P.** (2010). Water and wastewater pipe health monitoring: a review. Advances in Civil Engineering. doi:10.1155/2010/818597. Article ID 818597, 13 pages.
- Sánchez, K.** (2004). Aplicación de radar de penetración de suelos (GPR) para la caracterización geotécnica de suelos. Trabajo de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- Takahashi, K.** (2006). Detection and localization of subsurface objects by ground penetrating radar. Tesis Doctoral. Tohoku University. Japón.
- Tavera, M.** (2008). Aplicación del Georradar para la Mejora del Rendimiento de una Red Hídrica. Valencia. Tesina de Máster. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Tello, J.A.** (2010). Construcción y localización en tiempo real de un robot móvil vía odometría en el seguimiento de trayectorias mediante control automático. Tesina de Máster. Instituto Politécnico Nacional. México, D.F.
- Vega, P.G.** (2001). Radar de Subsuelo. Evaluación para Aplicaciones en Arqueología y en Patrimonio Histórico-Artístico. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Cataluña, España.