

XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje

“VISUALIZACIÓN DE FUGAS DE AGUA EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA MEDIANTE IMÁGENES DE GPR”

David Ayala Cabrera (1), Silvia J. Ocaña Levario (2), Rafael Pérez García (3), Joaquín Izquierdo (4), Manuel Herrera (5)

(1) (2) (3) (4) FluIng-IMM- Universitat Politècnica de València, C de Vera s/n, Edif. 5C, 46022 Valencia, España. e-mail: {daaycab, silocle, rperez, jizquier}@upv.es

(5) BATir Dép., Université libre de Bruxelles, Av. F. Roosevelt, 50, B-1050, Bruselas, Bélgica. e-mail:mherrera@ulb.ac.be

RESUMEN

En este documento se intenta abordar la problemática de las fugas en los sistemas de abastecimiento de agua a través del uso del GPR como método no destructivo. Para ello se realizan ensayos de laboratorio en los cuales se busca extraer características de las fugas de agua a partir de las imágenes de GPR. La extracción de características se realiza mediante la interpretación de las imágenes de GPR, con el apoyo de una combinación adecuada de métodos estadísticos y sistemas multi-agente. Los resultados de estas pruebas, su interpretación y sus análisis son presentados y discutidos en este documento.

Palabras claves: Georadar, ensayos no destructivos, fugas de agua, análisis y procesamiento de señales e imágenes, sistemas de abastecimiento de agua.

ABSTRACT

This work attempts to tackle water leakage in water supply systems through the use of GPR as a non-destructive method. The first step includes a series of laboratory tests to identify and extract water leak characteristics into GPR images. Then, the relevant characteristics are extracted by interpreting those images using various statistical and multi-agent tools. Finally, results, interpretations, analyses and conclusions of these tests are presented.

Key words: ground penetrating radar (GPR), non-destructive test, water leaks, signal and images processing and analysis, water supply systems

SOBRE EL AUTOR PRINCIPAL

David Ayala-Cabrera: es estudiante de doctorado en el Departamento de Ingeniería Hidráulica y del Medio Ambiente de la Universitat Politècnica de València y es miembro del grupo de investigación FluIng-IMM. Es Ingeniero Sanitario de la Universidad del Valle (Cali-Colombia) y Master en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente por parte de la Universitat Politècnica de València. Cuatro años de experiencia en diseños de proyectos municipales de distribución de agua y saneamiento (Colombia). Ha publicado varios artículos en revistas de alto impacto y participado en variados congresos a nivel nacional e internacional. Actualmente sus líneas de investigación se centran en la generación de herramientas metodológicas para el análisis de componentes de sistemas de abastecimiento de agua, mediante métodos no destructivos, por parte de operarios con baja o nula experiencia en el manejo de los mismos.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la detección de fugas de agua y el control de las mismas, es uno de los mayores problemas al que los sistemas de abastecimiento de agua (SAA) tienen que hacer frente en la gestión de las redes que componen el sistema. Se ha calculado que muchos SAA de todo el mundo pierden más del 40 por ciento del agua potable que se bombea al sistema de distribución debido a las fugas antes de que el agua llegue a los consumidores finales. Con la reducción de la cantidad de agua fugada en los SAA, se pueden minimizar las pérdidas económicas, incrementar la fiabilidad del sistema, así como satisfacer las necesidades del usuario, e incluso contar con una capacidad adicional en el caso de crecimiento de la demanda. Sin embargo, el acceso a información fiable sobre las fugas es una tarea compleja, siendo que, en muchos casos, las fugas son detectadas cuando los daños en la red son ya muy considerables, lo que trae consigo altos costes sociales y económicos. En este sentido, los métodos no destructivos, pueden ser una respuesta a esta problemática, con el fin de encontrar las fugas de agua cuando aún no son importantes, y resolver el problema, mediante la implementación de una estrategia integral de acción.

Entre las técnicas, no destructivas, más empleadas en la localización de fugas en SAA se encuentran: técnicas acústicas, técnica de termografía infrarroja, y la técnica de Georadar (Ground Penetrating Radar – GPR) (Demirci, *et al.*, 2012). Los métodos acústicos por su parte detectan la onda acústica generada por la fuga basándose, para la identificación de la fuga, en el análisis de correlación y velocidad de la onda del sonido emitido en la tubería inspeccionada. Este tipo de métodos, son ampliamente utilizados para identificar fugas en tuberías de metálicas llenas de líquido (Juliano, *et al.*, 2013). El principal inconveniente de los métodos anteriormente mencionados es su ineficiencia en la detección de fugas de agua en las tuberías no metálicas (por ejemplo, tuberías de PVC) (Bimpas, *et al.*, 2013). En los métodos infrarrojos se detecta el contraste térmico causado por la diferencia de temperatura entre el suelo y el agua. Sin embargo, estos métodos, aunque son fáciles de implementar, muestran error cuando no hay diferencias considerables de temperatura. Siendo no posible usar estas técnicas en el verano y el invierno, debido a la no existencia de diferencias importantes entre el suelo y el agua (Dong, *et al.*, 2011). El GPR, se muestra como una efectiva herramienta, no destructiva, que favorece la inspección de las redes al demarcar en imágenes (radargramas) los

contrastes del agua fugada y el suelo circundante, debido a las diferencias en sus características dieléctricas (Crocco, *et al.*, 2010).

El uso del GPR como método de localización puntual de fugas en SAA, se está difundiendo cada vez más en los últimos años. En este sentido, se encuentran trabajos realizados en campo como en Stampolidis (2003), realizado en tramos de tuberías urbanas. El pre-procesamiento de las imágenes obtenidas se realizó mediante Filtros Pasa Bajos. En este ensayo fue identificada la tubería de PVC (con fuga). Otro trabajo de campo representativo, lo presenta Hunaidi (1998). En este caso, una tubería plástica (PVC) fue perforada y enterrada en el terreno el análisis de esta imagen se realizó en imágenes en bruto. Se encuentran de igual manera trabajos en campo, con el uso de métodos combinados. Tal es el caso de Liu (2002), que combinó ensayos de GPR, con ensayos de potencial eléctrico y ensayos geoquímicos en la detección de fugas en tuberías sin presión y no metálicas. La identificación de la fuga, en este trabajo, fue realizada en las imágenes en bruto de GPR. Los ensayos de laboratorio, no han sido la excepción en la búsqueda de fugas mediante GPR. Encontrándose trabajos como Hyun (2007) y Hasan (2012), realizados en tuberías plásticas. Siendo empleado en su pre-procesado la remoción de fondo, filtrado de imágenes, respectivamente. Una combinación entre trabajos de medición realizados en campo y en laboratorio, se presenta por Tavera (2008). En este trabajo, se realizan diferentes ensayos, de fugas en tuberías de PVC y metálicas. Los métodos empleados en el pre-procesamiento de este trabajo fueron la migración de Kirchhoff y la transformada de Hilbert.

Estos ensayos, son prometedores en cuanto al uso de GPR en la búsqueda de fugas de SAA se refiere. Sin embargo, la mayoría de ellos se basan en la localización e interpretación de las hipérbolas generadas, ya sea en las imágenes en bruto obtenidas o en imágenes pre-procesadas. La identificación de fugas mediante imágenes de GPR, no es una actividad fácil y la misma requiere de un alto nivel de experiencia por parte del operario para llevarse a cabo. A esto se le suma la compleja disposición espacial del entramado de la red, junto con el constante crecimiento de la infraestructura del abastecimiento de las ciudades, que incrementan considerablemente la dificultad del análisis de sus resultados. Esto reduce el potencial e incrementa la necesidad de personal altamente cualificado para el uso e interpretación de los datos en el uso del GPR para la detección de fugas.

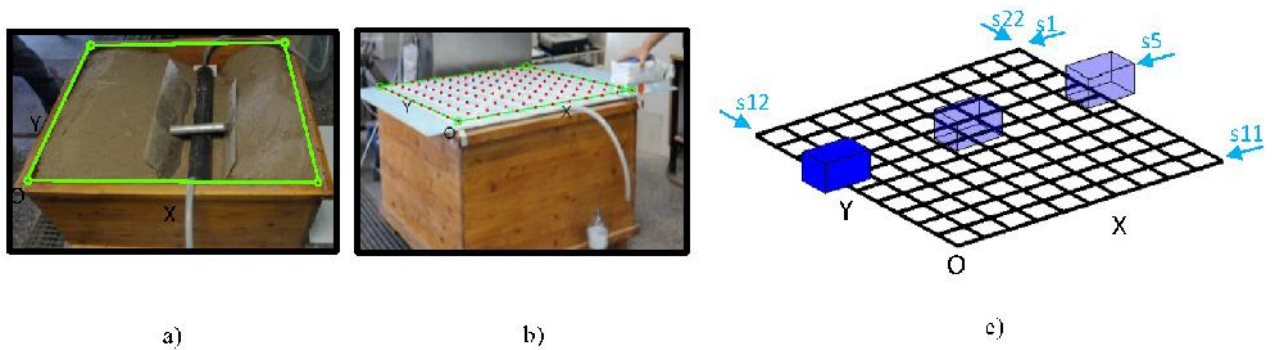


Figura 1. Configuración de los ensayos.

Es así como el presente trabajo intenta abordar esta problemática, con la evaluación de la viabilidad de implementación del GPR en la detección de fugas de agua. Para ello se realizan ensayos de laboratorio en los cuales se busca extraer características de las fugas de agua a partir de las imágenes de GPR. La extracción de características se realiza mediante la interpretación de las imágenes de GPR (método típico), con el apoyo de una combinación adecuada de métodos estadísticos y sistemas multi-agente. El objetivo final de estos procesos es extraer características que permitan posteriormente alimentar procesos automáticos inteligentes para la detección de fugas de agua en SAA mediante imágenes de GPR. Con lo cual se busca favorecer el uso por personal no altamente cualificado de este tipo de herramientas en la búsqueda de fugas de agua de los SAA, favoreciendo con ello la gestión de los mismos.

CAPTURA DE DATOS – PLANTEAMIENTO Y CONFIGURACIÓN DE LOS ENSAYOS

En esta sección se presentan la configuración de los ensayos realizados en laboratorio. En esta prueba se enterró una tubería comúnmente empleada en los SAA, en suelo seco en un tanque (ver, Figura 1.a). Las características de la tubería enterrada son: a) tubería de PVC, b) diámetro de 100mm, c) longitud de tubería 0.95m, d) perforación que simula la rotura para la fuga ubicada en la parte central y a un costado de la tubería, y e) dos conexiones de entrada (wip) y salida (wop) del agua, en sus extremos. El tanque empleado es de madera y presenta unas dimensiones de 1.0m x 1.0m x 0.70m, de volumen útil. Situada la tubería, se removieron los apoyos y la tubería fue cubierta con suelo seco. La superficie del tanque fue cubierta con una placa de polipropileno. Sobre esta placa se realizaron 22 trazados, correspondientes a 11 paralelos al eje x y 11 paralelos al eje y . Estos trazados se encuentran

espaciados entre sí 0.10m (ver, Figura 1.b). Estos 22 trazados conformarán la malla de muestreo (ver, Figura 1.c). Sobre cada trazado de esta malla, se realizó un deslizamiento de la antena de GPR. Cada imagen obtenida en cada deslizamiento de la antena, se denominó perfil en este documento (ver ejemplo, Figura 1.c, s_5). Adicionalmente se distinguirá entre perfiles horizontales y verticales, cuando los mismos, sigan trazados paralelos al eje x y y , respectivamente.

El equipo de GPR usado en cada prospección, corresponde a una antena monoestática comercial, con una frecuencia central de antena de 1.5GHz. Los parámetros del equipo empleados, corresponden a: 120 trazas/seg, 512 samples/traza y 20 ns/512 samples. Se realizaron un total de dos ensayos de 22 perfiles cada uno, siguiendo las características mencionadas anteriormente. Estos ensayos se diferenciaban entre sí, en que el primero fue sin agua en el interior de la tubería, ni agua fugada, y el segundo contenía agua en el interior de la tubería y agua fugada. Estos dos ensayos fueron llamados en este documento como estado inicial y final, respectivamente.

ANÁLISIS DE LOCALIZACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE HIPÉRBOLAS EN IMÁGENES EN BRUTO

En esta sección se plantea el análisis típico realizado en las imágenes en bruto de identificación de anomalías (en este caso fugas), mediante la localización e identificación de hipérbolas en las imágenes de GPR obtenidas en los ensayos, planteados conforme lo presentado en la sección anterior. Estos análisis son realizados en los perfiles horizontales y verticales del estado inicial y final de los ensayos.

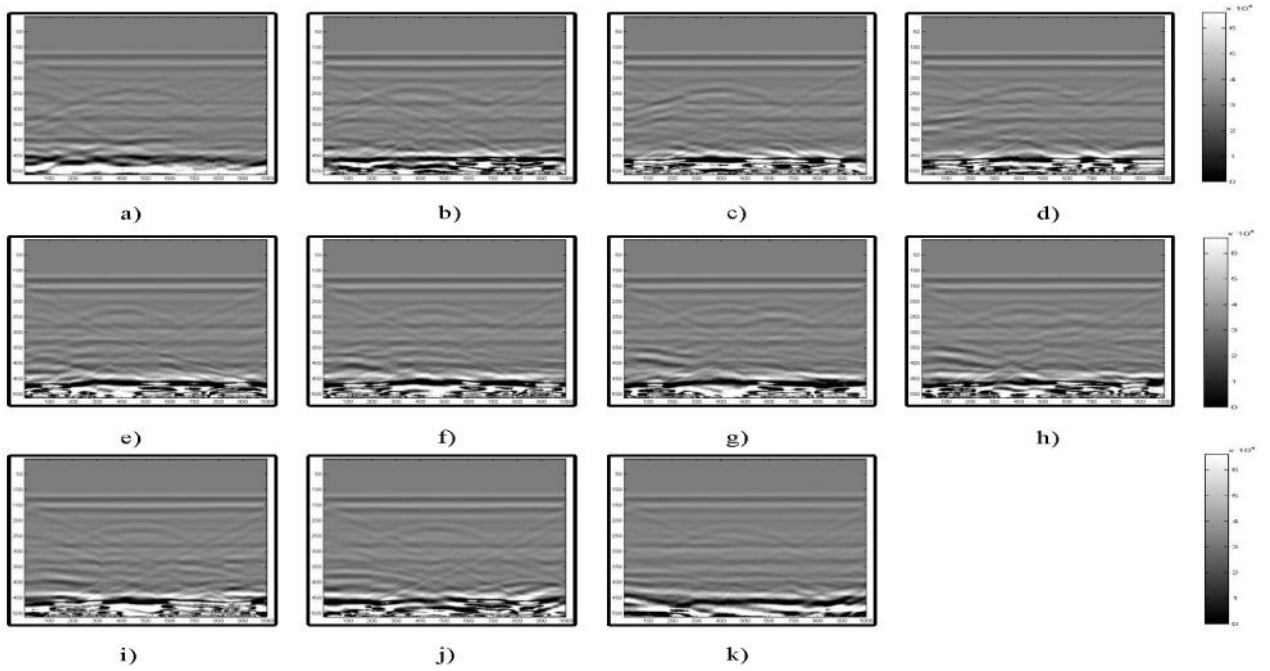


Figura 2. Perfiles horizontales - Imágenes en bruto del estado inicial.

Estado inicial - Imágenes en bruto

Las imágenes resultantes de los ensayos realizados en el laboratorio, para el estado inicial, de los perfiles horizontales y verticales, son presentadas en la Figura 2 y la Figura 3, respectivamente.

En la Figura 2, se puede observar en todas las imágenes presentadas, la aparición de una hipérbola cuyo centro para todas está ubicado aproximadamente en 0.6m. Esta ubicación coincide

con la ubicación en la configuración planteada de la tubería de PVC enterrada. En esta misma Figura en las partes f), g), h), se destaca una anomalía que presenta forma de hipérbola y que se encuentra localizada, al lado de la hipérbola identificada como la tubería enterrada. La nueva hipérbola hallada, incrementa su intensidad en Figura 2.g. En este caso, se sabe que esta anomalía, no puede representar la fuga, debido que nos encontramos en el estado inicial de los ensayos. Sin embargo, en un caso no controlado, esta formación podría dar lugar a confusión.

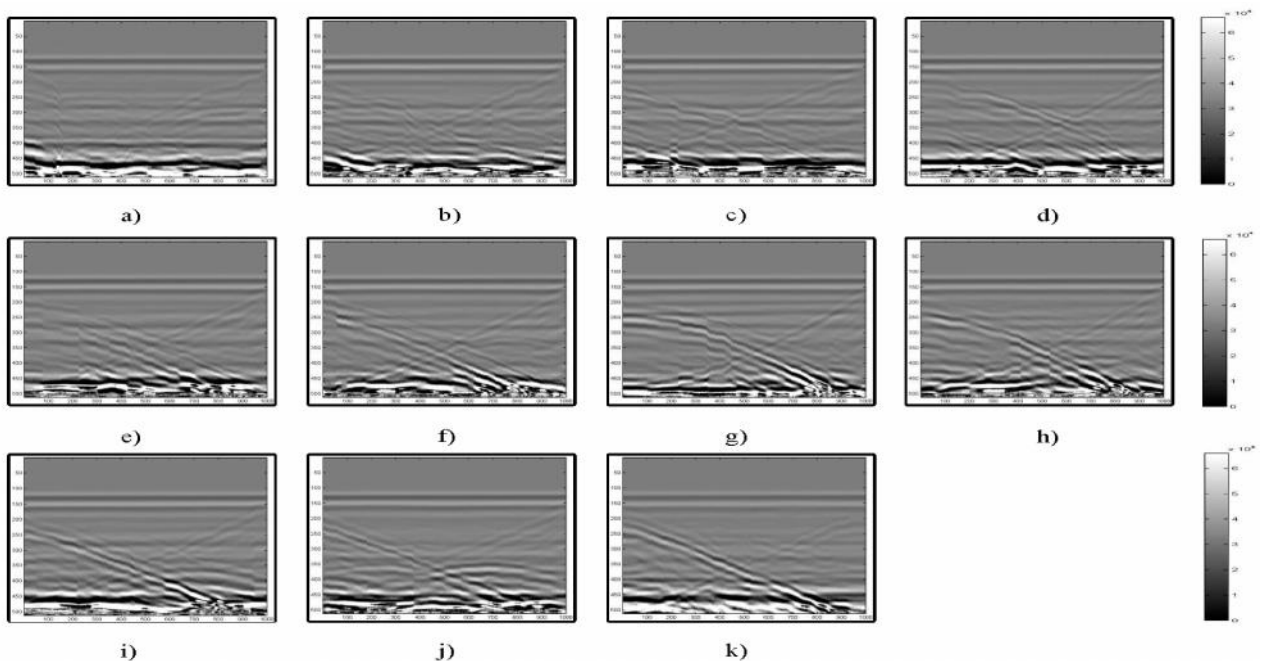


Figura 3. Perfiles verticales - Imágenes en bruto del estado inicial.

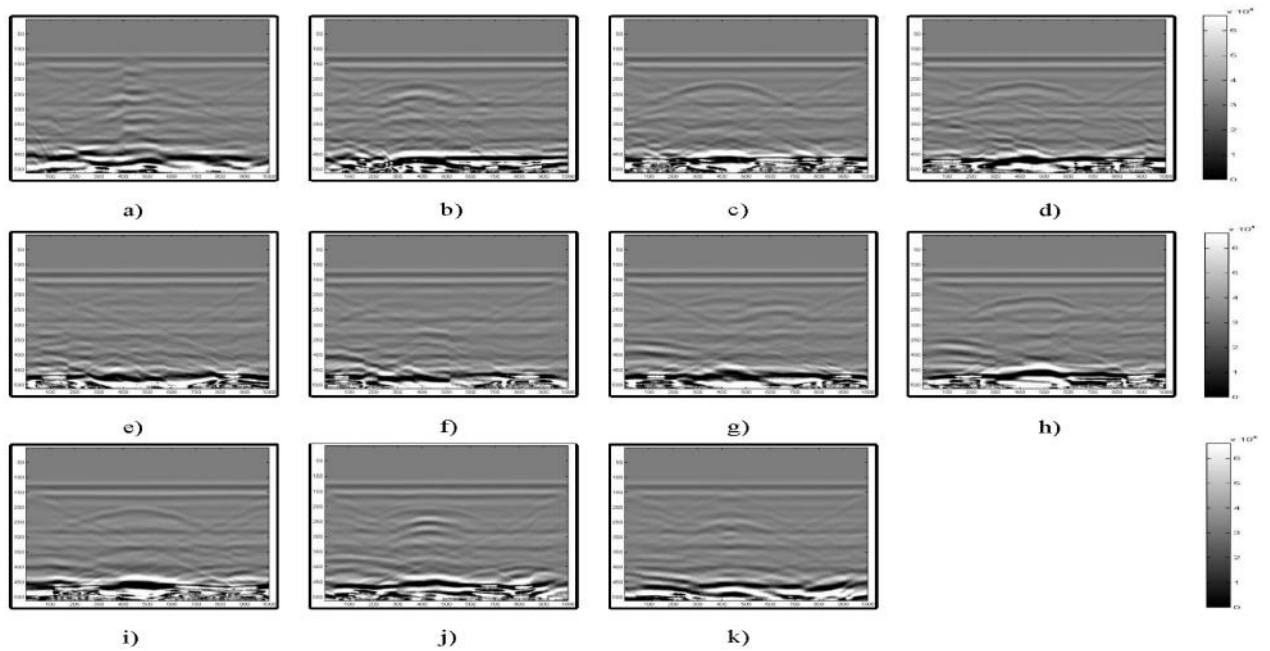


Figura 4. Perfiles horizontales - Imágenes en bruto del estado final.

En la Figura 3, se puede observar en todas las imágenes, como la hipérbola que representaba a la tubería en la Figura 2 ya no es presentada. Lo cual presenta coherencia con la configuración esquemática planteada para el ensayo. Sin embargo, en estas imágenes, observamos de igual manera las formaciones inclinadas (el triángulo), provenientes de las paredes del tanque, que se observaban en los perfiles horizontales (Figura 2). En todas las imágenes de la Figura 3, se puede observar una formación que atraviesa (en distancia) a cada una de las mismas. Siendo que en las partes desde a) hasta d), se presentan entre los samples 275 a 325, en la parte e) entre los samples 250 a 325, entre las partes

f) hasta h) entre los samples 225 a 275, en la parte i) entre los samples 275 a 325 y para la parte j) entre los samples 300 a 325. Esta formación podría corresponder a la respuesta que da la señal a la tubería de manera longitudinal.

Estado Final - Imágenes en bruto

Las imágenes resultantes de los ensayos realizados en el laboratorio, para el estado final, de los perfiles horizontales y verticales, son presentadas en la Figura 4 y la Figura 5, respectivamente.

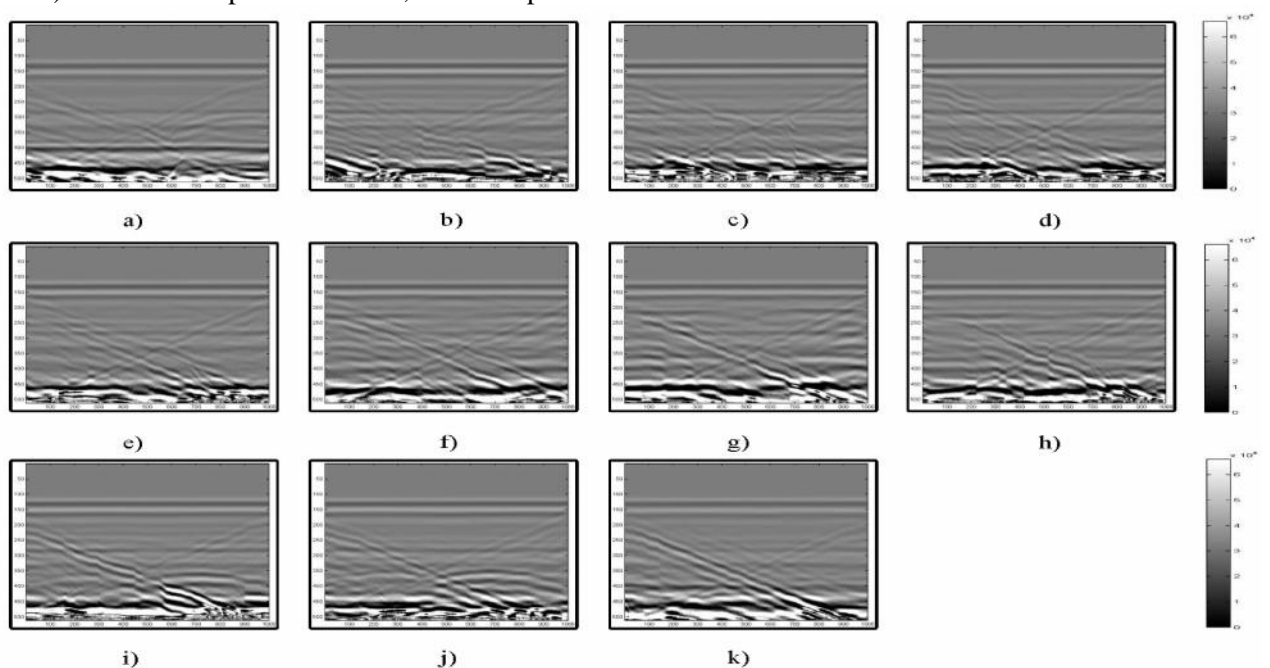


Figura 5. Perfiles verticales - Imágenes en bruto del estado final.

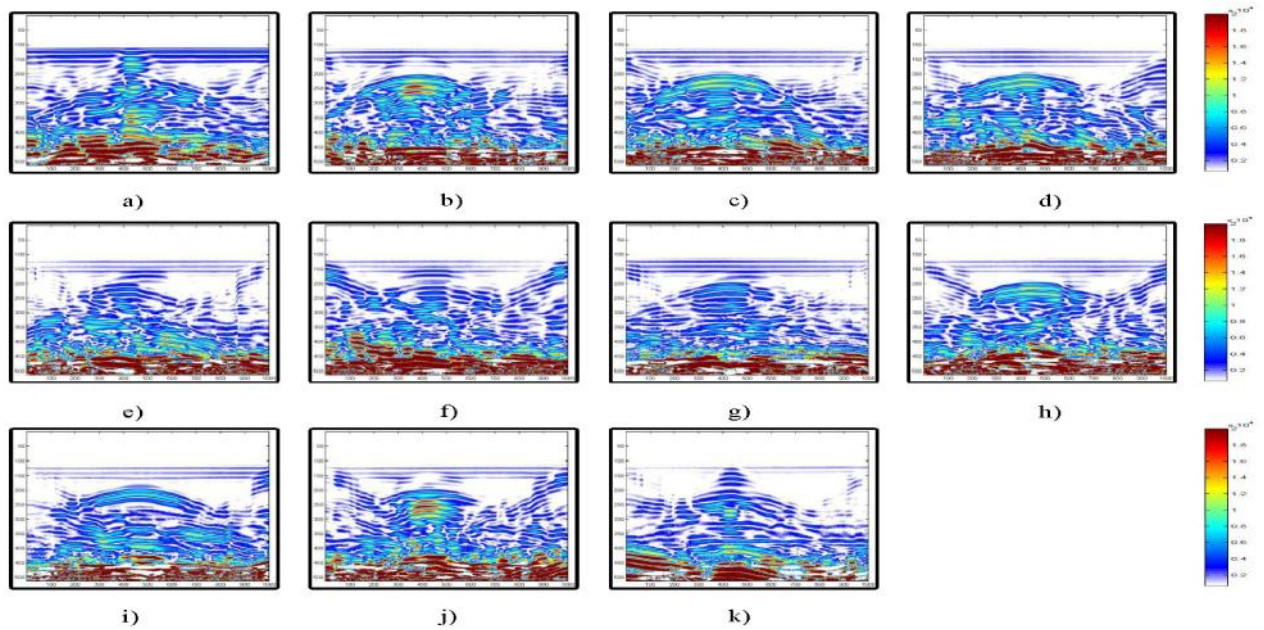


Figura 6. Perfiles horizontales - Contraste entre imágenes en bruto del estado inicial y final.

En la Figura 4, se puede observar en las imágenes a) y k) entre 0.5 y 0.6m, la aparición de una franja vertical que distorsiona a ambas imágenes. Este efecto se puede atribuir a la presencia de agua en wip y wop. Este efecto, que es más pronunciado en la parte a) de la Figura, se nota con mayor claridad al contrastar estas imágenes, con sus correspondientes en la Figura 2. Siendo, que en esa Figura, la zona ahora deformada, presentaba la conformación de la hipérbola que denotábamos como la tubería enterrada en el ensayo. En las imágenes b) y j) de la Figura 5, adicionalmente, se observa la aparición de una hipérbola adicional acogida por una hipérbola superior (hipérbola inicial de la tubería). Observando los perfiles desde b) hasta j), podemos decir que la hipérbola que habíamos tomado como la tubería, decrece en intensidad, conforme la posición de los perfiles se acerca más al punto de la fuga. Siendo así que para las imágenes e) y f), la demarcación de la hipérbola es casi invisible. Así, también podemos observar que la imagen f), se demarcan (muy tenuemente), dos hipérbolas donde inicialmente se demarcaba una. En la parte g) de la Figura, se observa la misma demarcación de una segunda hipérbola obtenida en el estado inicial (al lado de la hipérbola de la tubería). Esta segunda hipérbola, de no haberse contado con la imagen sin agua, seguramente se hubiese interpretado como una fuga. Lo cual nos muestra la necesidad de extraer patrones para la interpretación y detección de fugas en los sistemas de abastecimiento de agua y no cometer errores muy comunes en interpretación de campo. Ya que esta hipérbola adicional que se

presenta puede ser el resultado de cualquier objeto (como piedras) cercano a la tubería.

La Figura 5 por su parte, presenta características similares a las sus respectivas imágenes del estado inicial. Sin embargo, en las partes f) y g), se puede observar entre 0.5m y 0.4m (eje de la distancia) y 225samples y 275samples (eje de profundidad), una contracción de la zona que habíamos demarcado como la tubería (zona que atravesaba todos los perfiles). Esta contracción es mejor demarcada en la imagen g), que corresponde al perfil vertical, más próximo a la tubería. Siendo que la posición de la contracción concuerda con la ubicación del punto de fuga en el ensayo planteado. Después de estos múltiples análisis de los diferentes perfiles, horizontales y verticales de las fugas, observamos la

ANÁLISIS – CONTRASTE ENTRE IMÁGENES EN BRUTO DEL ESTADO INICIAL Y FINAL

En esta sección se plantea, dado que se cuenta con una métrica adecuada, el contraste entre el estado inicial y el estado final de los ensayos realizados para cada imagen en bruto. La Figura 6 y la Figura 7, presentan las diferencias en imágenes horizontales y verticales en bruto, respectivamente.

En la Figura 6, se puede observar en las imágenes, la adición del agua, que sería el factor diferente entre las imágenes del estado inicial y el estado final de los ensayos. Es así como en las partes a) y k) de la

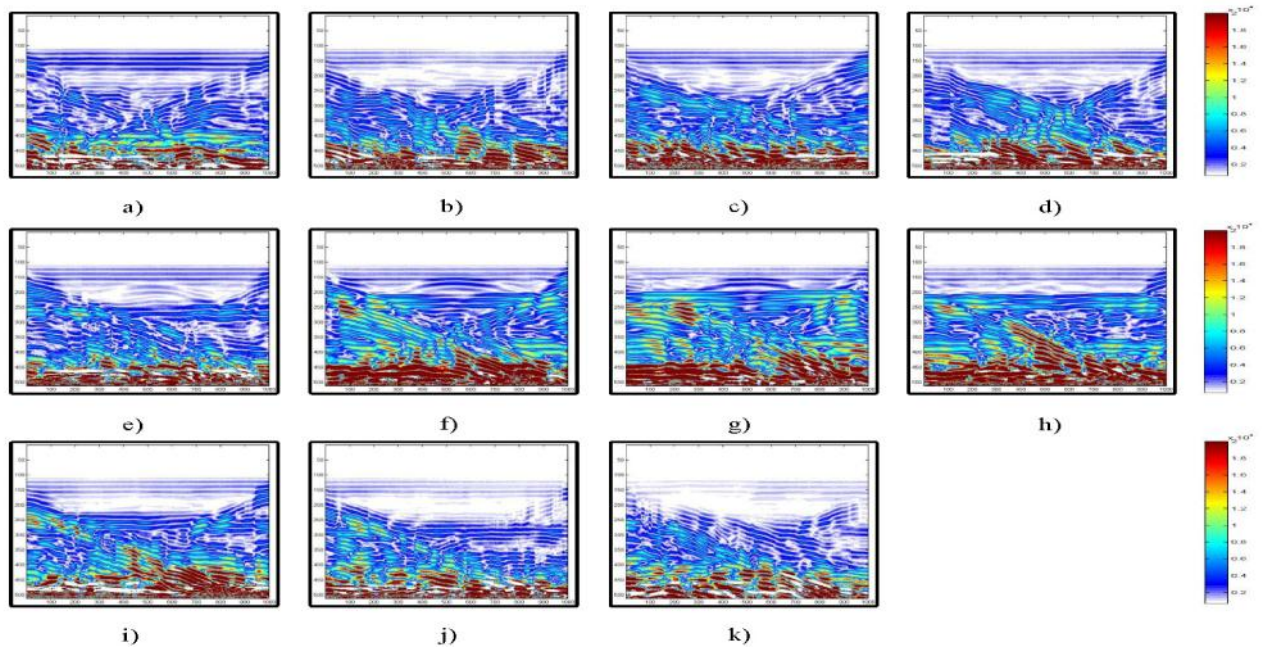


Figura 7. Perfiles verticales - Contraste entre imágenes en bruto del estado inicial y final.

figura, se puede observar el agua contenida en wip y wop. Entre las imágenes desde b) hasta j), se presenta el agua contenida en la tubería. Siendo en estas la parte más iluminada el remplazo del aire (contenido en la tubería) por el agua. Mostrando con esto, la diferencia de intensidad que demarca el material contenido en la tubería. Se observa de igual manera que la intensidad de color decrece conforme la ubicación de las imágenes se aproximan al perfil f) (perfil más próximo a la fuga). Por otra parte, en las imágenes desde e) hasta g), se puede observar entre 0.4m a 0.6m y entre 150samples y 200 samples, la formación de una hipérbola que no era fácilmente detectable en las respectivas imágenes en bruto y que se pasó por alto en las interpretaciones realizadas. Esta hipérbola, corresponde, conforme la

observación realizada in-situ, a la ascensión del agua fugada por capilaridad. Para las imágenes e) y f), se demarca con menor intensidad la forma del agua contenida en la tubería, en el costado derecho (de la imagen), lo cual indicaría que la fuga va en el sentido de izquierda a derecha. Esto es debido a que en esa zona, ya se encuentra una mezcla entre el suelo y el agua y esto produce una menor intensidad del color. Se observa también la disminución de la intensidad de color en las zonas demarcadas de la tubería, conforme se aproximan al punto de fuga (perfil f). Adicionalmente, debajo de todas las zonas demarcadas por el contraste se observa también deformación, lo cual es resultado de la convolución esperada, al tener en cuenta que las mediciones se realizan en profundidad.

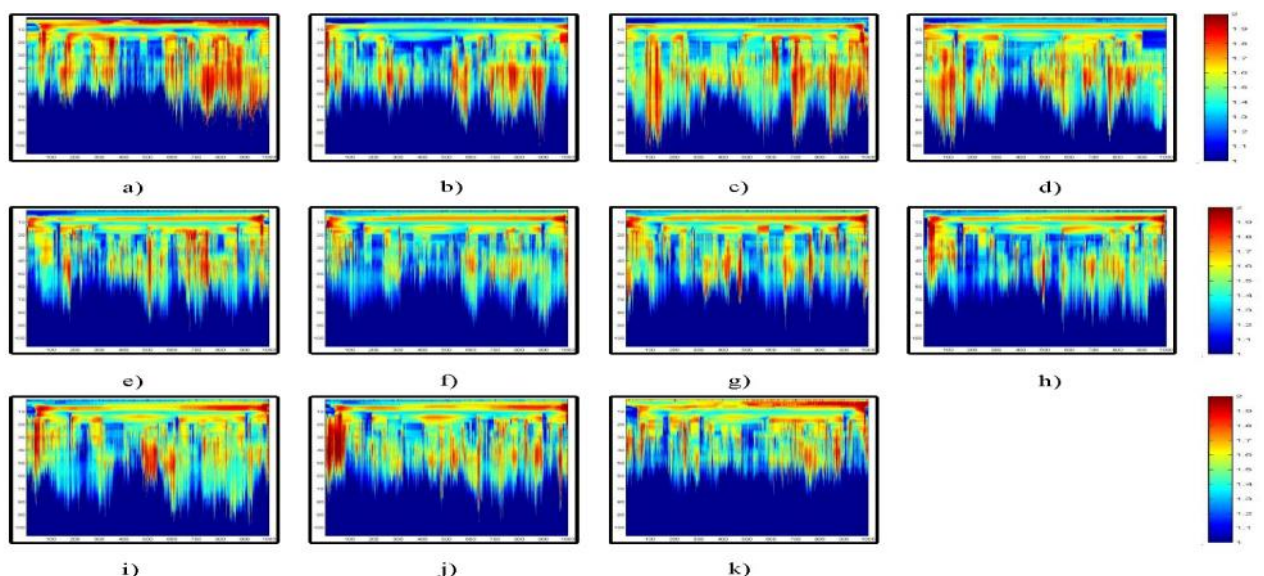


Figura 8. Perfiles horizontales - Imágenes pre-procesadas del estado inicial.

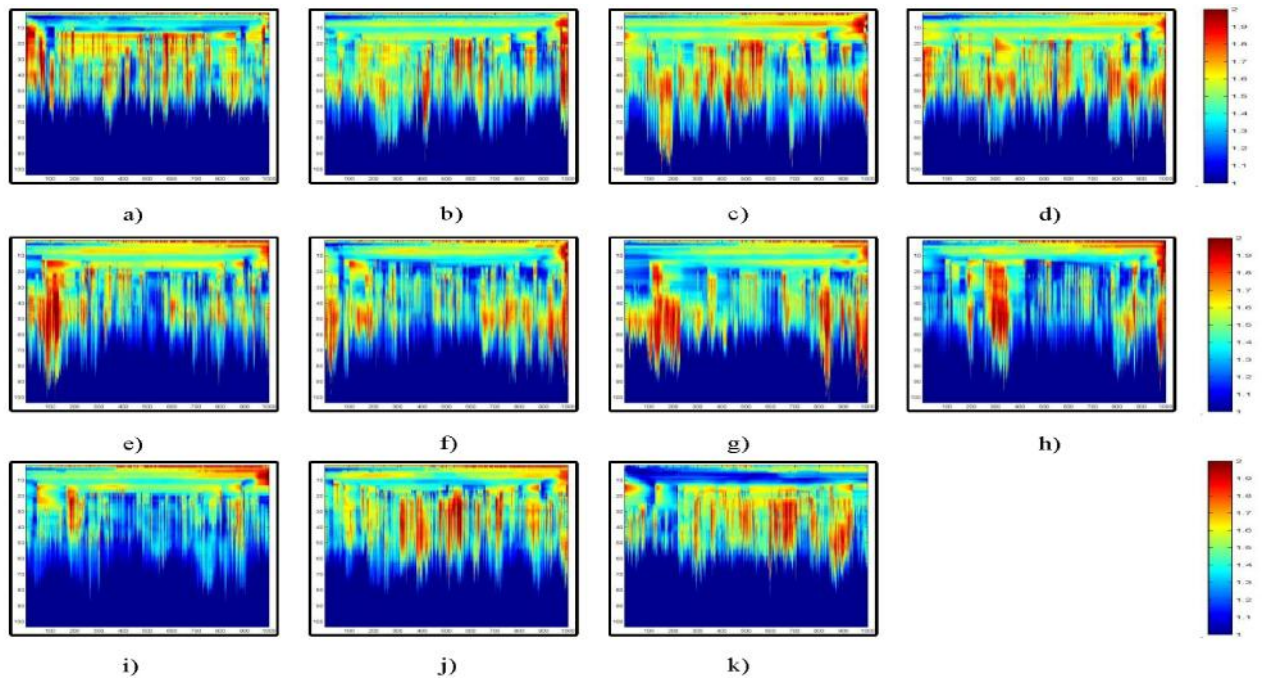


Figura 9. Perfiles verticales - Imágenes pre-procesadas del estado inicial.

En la Figura 7, se puede observar en la imagen g) (que es la más próxima a la tubería y al punto de fuga), un incremento en la intensidad de color en la franja que atraviesa casi en su totalidad al perfil. Esta franja comprendida entre los samples 200 a 250, retrata la adición del agua en la tubería. En esta misma imagen y para esta misma franja se puede observar el efecto descrito en la misma imagen del estado final, el efecto de contracción de la tubería en el punto de fuga. Siendo posible adicionalmente observar una hipérbola en su parte superior (característica que no fue posible observar en su respectiva imagen del estado final). De igual manera en h) (perfil cercano a la tubería y en el posible recorrido de la misma), la franja presenta una intensidad de color inferior que g) y superior a sus perfiles cercanos. Es así como esta franja se va desvaneciendo y disminuyendo su altura, en las direcciones desde i) hasta j) y desde f) hasta e).

Se observa de igual manera la aparición de una hipérbola en e), f) y g), que va ganando intensidad de color a medida que se acerca al punto de fuga (imagen g). Desde f) hacia e), la hipérbola, va perdiendo intensidad y aumentando en tamaño, como consecuencia del alejamiento al punto de fuga.

ANÁLISIS DE LOCALIZACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE ANOMALIAS EN IMÁGENES PRE-PROCESADAS

El análisis llevado a cabo anteriormente, se basa en las diferencias de intensidad demarcadas por la

amplitud de onda generada en las imágenes, tras el paso de la señal por los diferentes estratos del subsuelo prospectado. El análisis que llevaremos a cabo en esta sección se basa en el tiempo. Para ello se extraen los picos (valores máximos y mínimos) de las ondas generadas. En ellos se estudia la tendencia del recorrido de cada traza y es tomado el valor promedio de tiempo entre pico y pico. El principio es básico. Asumiendo que el terreno fuese homogéneo, cada pico obtenido, tendría correspondencia entre sí. Sin embargo, se debe tener en cuenta que aunque el material sea homogéneo, en la realidad los valores medidos serán diferentes, pero muy próximos entre sí. Es así como valores muy diferentes entre sí nos marcan que existe una anomalía. Estos picos fueron extraídos y numerados conforme su aparición en la traza. Luego fueron ubicados, en su respectivo punto de ubicación en distancia y rellenados con el valor final (512 en este trabajo), hasta completar una matriz. Para obtener esta matriz de manera rápida, se empleó el algoritmo planteado por Ayala-Cabrera (2013). En este algoritmo (del cual no entraremos en detalles), se obtienen los valores mencionados anteriormente mediante un sistema basado en la aplicación, en múltiples entidades (multi-agente) que desarrollan la actividad de buscar los picos, mediante la simulación de una carrera entre sí.

Obtenidas las matrices que contendrán los tiempos de los picos obtenidos en cada traza, se procede a numerar en cada fila los valores de tiempo obtenidos de mayor a menor. Siendo posteriormente normalizadas las filas de la matriz. Esto nos

permitirá quitar la diferencia creciente de tiempo entre las filas resaltando con mayor intensidad anomalías muy pequeñas y muy difíciles de observar en imágenes en bruto. Sin embargo, se debe tener cuidado con esta regularización, debido a que si bien las anomalías son resaltadas, las intensidad de las mismas es determinada conforme el terreno prospectado en cada perfil y la misma puede generar errores visuales para la interpretación. Pero aunque esto suceda, la interpretación basada en formas nos delimitará áreas y zonas de interés para facilitar análisis más complejos.

Estado inicial - Imágenes pre-procesadas

Las imágenes resultantes de los ensayos realizados en el laboratorio y pre-procesadas, para el estado inicial, de los perfiles horizontales y verticales, son presentadas en la Figura 8 y la Figura 9, respectivamente.

En la Figura 8, se puede observar la demarcación de una imagen con forma de elipse en la parte donde fue introducida la tubería. En cada imagen observamos de igual manera cómo la intensidad de color decrece desde el centro de la elipse hacia los extremos de la misma. De igual manera en las imágenes a) y k) se puede observar, encima de esta elipse, una figura adicional en forma cónica, la cual no se observaba en sus respectivas imágenes en bruto. Esta formación podría corresponder a las wip y wop. Adicionalmente, en todas las imágenes, con más o menos demarcación, se puede observar aproximadamente en la línea de tiempo 10, la formación de una figura horizontal que atraviesa a todas las imágenes y que en cada uno de sus dos extremos se une a una zona de intensidad que demarca una figura vertical. Siendo así que la

interpretación que le damos a la formación horizontal (de la imagen) como la placa de polipropileno empleadas para el deslizamiento de la antena durante la medición y a las formas verticales (en la imagen), como las paredes del tanque.

En la Figura 9, se puede observar cómo en las diferentes imágenes, existe relación entre las diferentes intensidades de color de cada perfil. Siendo demarcadas con mayor intensidad las mismas zonas características del tanque y la placa de medición, observadas en los perfiles horizontales pre-procesados. Sin embargo, de igual manera, se puede observar desde la imagen f) hasta h), la inclinación de este área que antes era horizontal. Y observamos la no aparición de la elipse que se presentaba en las imágenes anteriores, en la parte central.

Estado Final - Imágenes pre-procesadas

Las imágenes resultantes de los ensayos realizados en el laboratorio y pre-procesadas, para el estado final, de los perfiles horizontales y verticales, son presentadas en la Figuras 10 y la Figura 11, respectivamente.

En la Figura 10, se puede observar cómo la elipse observada en su correspondiente imagen del estado inicial gana para cada una de sus imágenes intensidad de color con la adición del agua en la tubería. Se observa de igual manera cómo para las imágenes e) y f), se disminuye dicha intensidad. Esta característica, que fue observada en los perfiles de la diferencia entre imágenes en bruto, se puede observar de manera más clara en las imágenes pre-procesadas.

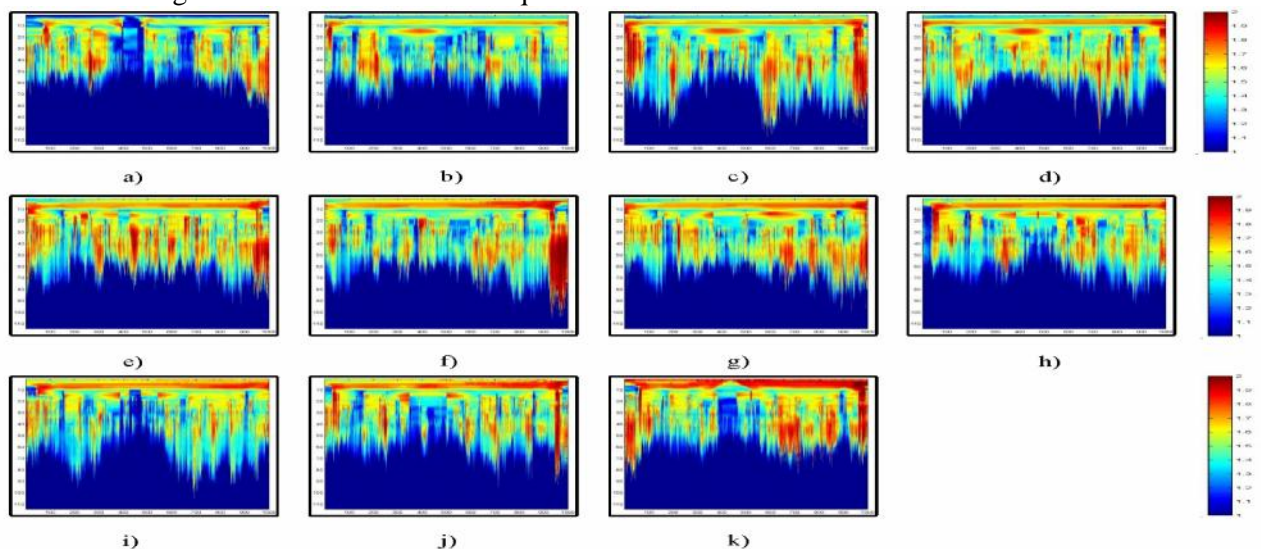


Figura 10. Perfiles horizontales - Imágenes pre-procesadas del estado final.

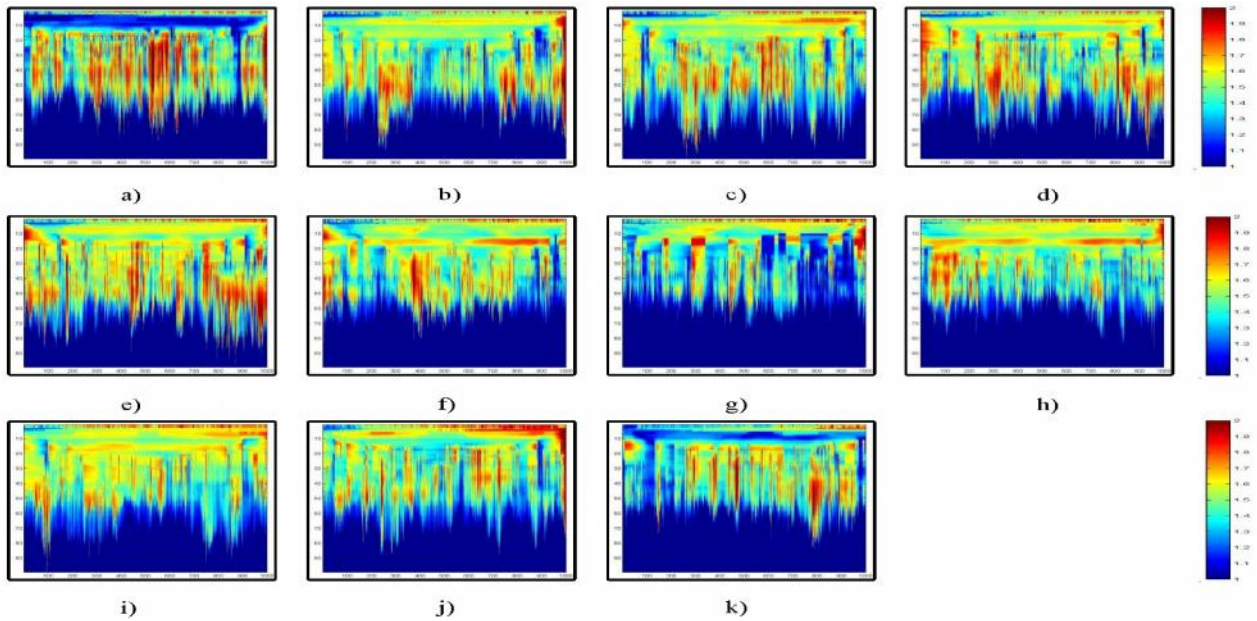


Figura 11. Perfiles verticales - Imágenes pre-procesadas del estado final.

De igual manera, se observa en las imágenes a) y k), cómo la intensidad de la formación cónica, se incrementa con la adición del agua. Y que, al igual que la adición del agua, solo era posible verla claramente en el contraste de imágenes en bruto, en estas imágenes, ya es posible identificarla. En las imágenes desde g) hasta k), se observa como la elipse central cede intensidad en dirección hacia 0m. Perdiendo intensidad en su parte central. Los contornos generados por el tanque y la placa de medición son mejor demarcados en estas imágenes.

En la Figura 11, se puede observar una discontinuidad de la intensidad del color en forma de elipse entre las imágenes e) hasta g). Esta discontinuidad incrementa de tamaño conforme se aproxima al perfil g) (sitio donde fue ubicada la

fuga). Se debe mencionar que esto no era observable en las correspondientes imágenes en bruto y que es similar a lo observado en la diferencia entre el estado inicial y final de las imágenes en bruto. Siendo así que es posible observarlo aquí desde las imágenes pre-procesadas.

ANÁLISIS – CONTRASTE ENTRE IMÁGENES PRE-PROCESADAS

En esta sección se lleva a cabo el contraste entre los perfiles pre-procesados, del estado inicial y final. En la Figura 12 y la Figura 13, se presenta el contraste entre los perfiles horizontales y verticales pre-procesados, respectivamente.

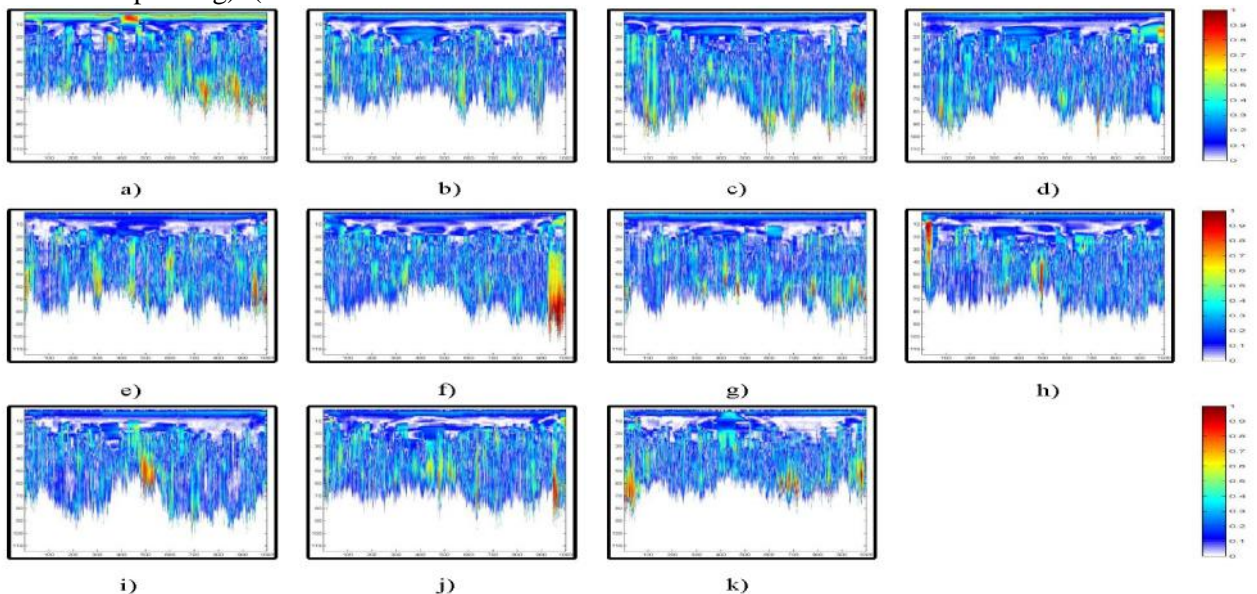


Figura 12. Perfiles horizontales - Contraste entre imágenes pre-procesadas.

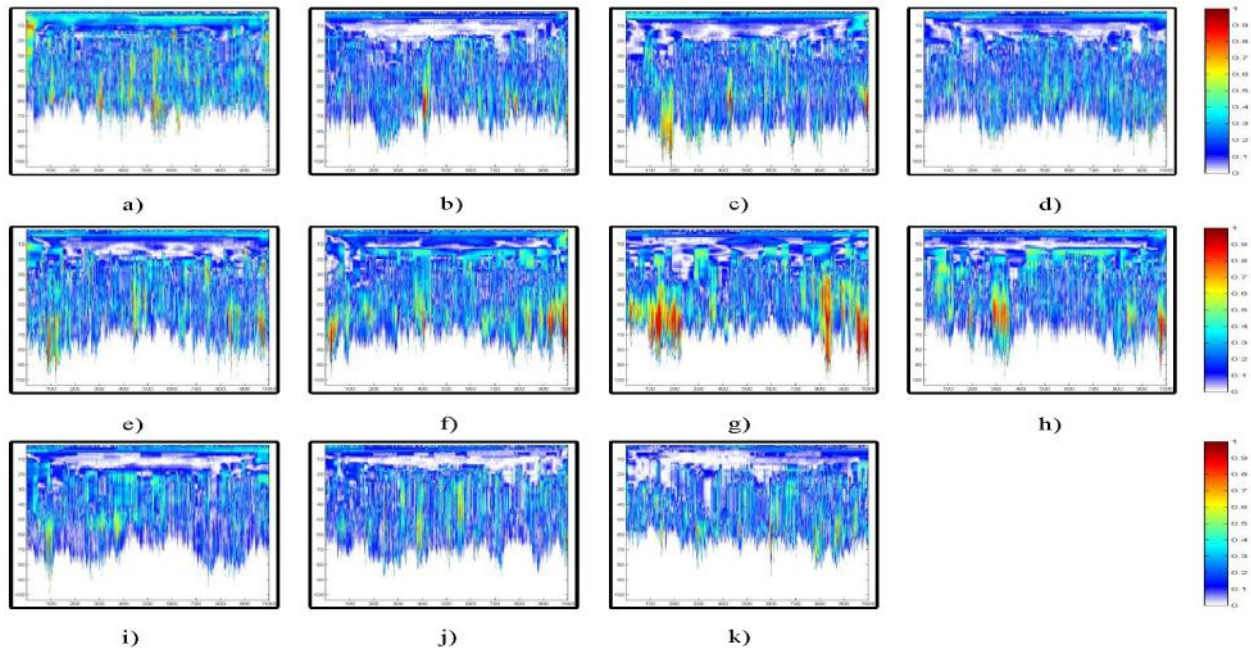


Figura 13. Perfiles verticales - Contraste entre imágenes pre-procesadas.

En la Figura 12, se puede observar en sus imágenes a) y k), la marcación que fue observada en las interpretaciones realizadas. Esta marca corresponde a la introducción de agua en wip y wop. Adicionalmente, para estas imágenes, se puede notar una anomalía en forma de elipse que la envuelve justo en su parte baja. Esta forma podría corresponder al agua presente en la tubería. Por otra parte se observa también en los diferentes perfiles la conformación de la elipse, cuyo centro presenta mayor intensidad hasta diluirse en los extremos. En estos perfiles encontramos cómo la intensidad del color disminuye en los perfiles a medida que se aproximan al perfil central (perfil con ubicación de la fuga). De igual manera se puede observar en las imágenes e) y g), la formación de una nueva elipse que se ubica justo encima de la elipse del agua contenida en la tubería. También observamos que en la imagen f), esta forma ya es una hipérbola que envuelve a la elipse de la zona de agua en la tubería. Esta forma que puede corresponder al agua que se ha fugado y que parte de ella ha ascendido por capilaridad hasta la superficie del terreno.

En la Figura 13, se puede observar en las imágenes e), f) y g), la generación de una forma de elipse que va incrementando su tamaño y consistencia, conforme se aproxima desde e) hasta g). Siendo que el perfil g), es el más próximo a la ubicación de la fuga.

COMPARACIÓN 3D DE ANALISIS DE CONTRASTES DE IMÁGENES EN BRUTO Y PRE-PROCESADAS

En esta sección se realiza la extracción de los contornos de las imágenes resultantes de los contrastes realizados anteriormente. Con estos contornos se plantean dos modelos 3D, de interpretaciones en contrastes en imágenes en bruto y de imágenes pre-procesadas del agua contenida en la tubería y agua fugada. En la Figura 14, se presentan los modelos 3D, mencionados.

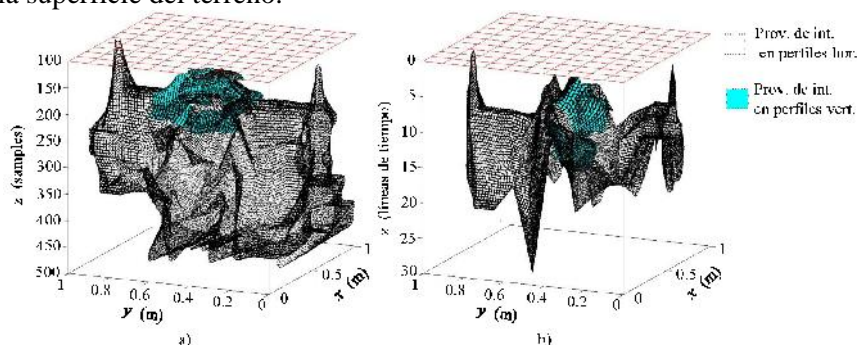


Figura 14. Comparación 3D de contrastes. a) imágenes en bruto, b) imágenes pre-procesadas.

Los modelos 3D obtenidos en la Figura 14, muestran concordancia con el planteamiento esquemático del ensayo. De esta misma manera, los modelos presentan relación entre sí, aun cuando su eje en profundidad es diferente. Esto es debido a que provienen de imágenes diferentes. En ellos se puede observar el agua en wip y wop, así como el agua en la tubería. La fuga es identificada de igual manera, siendo más consistente en b) que en a). Adicionalmente, muestran que es posible obtener resultados cuantificables (numéricamente) y además más comprensibles que las interpretaciones realizadas en las imágenes.

CONCLUSIONES

En este trabajo, se han realizado dos ensayos en condiciones de laboratorio de GPR. Estos ensayos correspondían a una tubería de PVC, sin agua en su interior y sin fuga, y con agua en su interior y con fuga. Los diferentes análisis mostraron la dificultad de realizar interpretaciones, en imágenes en bruto. Por otra parte, se obtuvo de estos ensayos, que los datos en bruto, contienen diferencias significativas al introducir agua en el medio (numéricamente hablando), que no son perceptibles fácilmente por interpretaciones típicas.

Por otro lado, este trabajo nos muestra, que la aplicación de metodologías apropiadas de pre-procesamiento, facilita la visualización de características no reflejadas en las imágenes en bruto. Con esto se facilita el trabajo de interpretación para personal no altamente cualificado en el uso de este tipo de herramientas. Adicionalmente, se debe mencionar que se obtienen en este tipo de pre-procesados, características que son cuantificables (numéricamente). Siendo que las mismas pueden ser la base, en procesos posteriores de clasificación automática de fugas, en SAA.

Finalmente, podemos concluir, que la reconstrucción del espacio medido en modelos 3D, facilita la interpretación de los resultados obtenidos.

BIBLIOGRAFÍA

- Demirci, S., Yigit, E., Eskidemir, I. H., Ozdemir, C. (2012). "Ground Penetrating Radar Imaging of Water Leaks From Buried Pipes Based on Back-Projection Method". *Journal NDT&E International* 47, pp. 35-42.
- Dong, L., Carnalla, S., Shinozuka, M. (2011). "Experimental and Analytical Study of Detecting Leakage of Water Pipes Using Ground-Penetrating Radar". En: Ninth International Workshop on Remote Sensing for Disaster Response, Stanford University, California, USA.
- Juliano, T., Meegoda, J., Watts, D. (2013). "Acoustic Emission Leak Detection on a Metal Pipeline Buried in Sandy Soil". *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 4 (3), pp. 149-155.
- Bimpas, M., Amditis, A., Uzunoglu, N. (2010). "Detection of Water Leaks in Supply Pipes Using Continuous Wave Sensor Operating at 2.45 GHz". *Journal of Applied Geophysics* 70, pp. 226-236.
- Crocco, L., Soldovieri, F., Millington, T., Cassidy, N.J. (2010). "Bistatic Tomographic GPR Imaging for Incipient Pipeline Leakage Evaluation". *Progress in Electromagnetics Research* 101, pp. 307-321.
- Stampolidis, A., Soupios, P., Vallianatos, F. (2003). "Detection of Leaks in Buried Plastic Water Distribution Pipes in Urban Places - A Case Study". En: 2nd International Workshop on Advanced GPR, Delft, Netherlands.
- Hunaidi, O., Giamou, P. (1998). "Ground-Penetrating Radar for Detection of Leaks in Buried Plastic Water Distribution Pipes". En: Seventh International Conference on Ground Penetrating Radar, Lawrence, USA.
- Liu, G., Jia, Y., Liu, H., Qiu, H., Qiu, D., Shan, H. (2002). "A Case Study to Detect the Leakage of Underground Pressureless Cement Sewage Water Pipe Using GPR, Electrical and Chemical Data". *Environ. Sci. Technol.* 36, pp. 1077-1085.
- Hyun, S.-Y., Jo, Y.-S., Oh, H.-C., Kim, S.-Y., Kim, Y.-S. (2007). "The Laboratory Scaled-Down Model of a Ground-Penetrating Radar for Leak Detection of Water Pipes". *Measurement Science and Technology* 18, pp. 2791-2799.
- Hasan, A. E. (2012). "The Use of Ground Penetrating Radar With a Frequency 1GHZ to Detect Water Leaks From Pipelines". En: Sixteenth International Water Technology Conference (IWTC16), Istanbul, Turkey.
- Tavera, M. (2008). *Aplicación de Georadar para la Mejora del Rendimiento de una Red Hídrica*. Tesis de Master, Universitat Politècnica de València, Valencia, España.
- Ayala-Cabrera, D., Izquierdo, J., Montalvo, I., Pérez-García, R. (2013). "Water Supply System Component Evaluation From GPR Radargrams Using a Multi-agent Approach". *Journal Mathematical and Computer Modelling* 57 (7-8), pp. 1927-1932.