

Localización e identificación de activos soterrados mediante georadar y procesamiento de imagen



Arantza Bereciartua-Pérez
Artzai Picón-Ruiz

Ingeniera Electrónica
Dr. Ingeniero Industrial

TECNALIA - Sistemas de Información e Interacción. Parque Tecnológico, Ed.202 - 48170 Zamudio (Bizkaia). Tfno: +34 946 440 400. aranzazu.bereciartua@tecnalia.com; artzai.picon@tecnalia.com

Recibido: 22/10/2010 • Aceptado: 14/03/2011

Location and identification of buried assets by means of georadar and image processing

ABSTRACT

- There is a growing industrial interest, covering from the sector of Engineering to the Environmental Management, among others, in the location of assets and anomalies in the subsoil in an efficient way and with a reduced error rate. It is aimed to increase the security and precision in the inspection of the subsoil by means of non-invasive and fast methods that could replace more traditional methods of direct digging.

Nowadays, there is a wide range of sensors that can be used. One of them is the georadar, Ground Penetrating Radar, from now on GPR, used in many different disciplines such as archaeology, hydrology, forensics, engineering and civil engineering, among others. The geophysical prospection with GPR is a technology capable of solving the problem inherent to the knowledge of the subsoil. It allows characterising perfectly the subsoil and the structures inside, in an efficient and accurate way, with a minimum impact.

As long as the technology goes forward, in many aspects of our life, it is possible to accomplish several tasks in a fast, efficient and automated way. Image processing has consolidated as a reliable technology installed in a wide number of applications for different problems. The high accuracy and resolution of the actual cameras, as long as with the fast communication protocols and the services of the computers make possible to solve difficult problems, usually hand-crafted in the near past. In this article, we present an image processing application whose aim is to locate and identify the buried assets that can be found in a subsoil survey. Therefore, image processing techniques are applied to interpret the electromagnetic signals coming from georadar.

First, the problem to be solved is shown, and some of the approaches to the problem are enumerated, which have been tackled during last years. Next, the proposed solution is thoroughly detailed together with their constituting elements, also the obtained results and the conclusions extracted from this work are exposed.

- **Key words:** image processing, pattern recognition, machine vision, image classifiers.

RESUMEN

Existe un creciente interés industrial, desde el sector de la ingeniería a la gestión medioambiental, pasando por muchos otros, en la localización de activos y anomalías en el subsuelo de manera eficiente y con una tasa reducida de error. Se pretende incrementar la seguridad y la precisión en la inspección del subsuelo mediante métodos lo menos invasivos y lo más rápidos posible que sustituyan procedimientos tradicionales de excavación directa.

Actualmente, existe una amplia variedad de sensores que pueden ser utilizados. Uno de ellos es el georadar, *Ground Penetrating Radar*, de ahora en adelante GPR, utilizado en múltiples disciplinas como la arqueología, hidrología, forense, ingeniería y obra civil, entre otras. La prospección geofísica con georadar es una tecnología capaz de solucionar el problema inherente al conocimiento del subsuelo. Permite caracterizar perfectamente el subsuelo y las estructuras existentes en él, de forma eficaz, precisa y con un impacto mínimo.

A medida que la tecnología avanza, en muchos aspectos de nuestra vida, es posible la realización de determinadas tareas de manera más rápida, eficiente y automatizada. El procesamiento de imágenes se ha consolidado como una tecnología cada vez más fiable implantada en un amplio número de aplicaciones que resuelven problemáticas diferentes. La precisión y elevada resolución que proporcionan las cámaras actualmente, junto con

los rápidos protocolos de comunicación y las prestaciones de los ordenadores posibilitan solucionar problemas difíciles, habitualmente hecho a mano en un pasado cercano.

En este artículo, se presenta una aplicación de procesamiento de imagen cuyo objetivo final es localizar e identificar los activos soterrados que pueden ser encontrados en una inspección del subsuelo. Para ello, se aplican técnicas de procesamiento de imagen para interpretar las señales electromagnéticas provenientes de un georadar.

Inicialmente, se describe la problemática a resolver, se enumeran algunos enfoques con los que se ha ido abordando en los últimos años. Se describe en detalle la solución propuesta junto con sus elementos constituyentes, así como se muestran los resultados obtenidos.

Palabras clave: procesamiento de imagen, reconocimiento de patrones, visión artificial, clasificadores.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe una amplia variedad de sensores que pueden ser utilizados en la prospección geofísica. Uno de ellos es el georadar, *Ground Penetrating Radar*, de ahora en adelante GPR, utilizado en múltiples disciplinas como la arqueología, hidrología, forense, ingeniería y obra civil. La prospección geofísica con georadar permite caracterizar el subsuelo y las estructuras existentes en él, de forma eficaz, precisa y con un impacto mínimo. El georadar basa su funcionamiento en la emisión y recepción de una señal electromagnética, el tiempo de vuelo indica la profundidad a la que ha llegado la señal y los cambios en la amplitud de la señal recibida dependen de los elementos que haya encontrado en su camino y que alteren su reflexión. De hecho, un elemento enterrado origina en la reflexión de la señal electromagnética una forma característica similar a una hipérbola [7].

Existen algunas compañías en el mercado que proporcionan soluciones software para la adquisición y procesamiento de los datos del georadar. Las utilidades disponibles para el procesamiento son relativamente sencillas (filtros, modificación de ganancias, aumento de contraste) y sólo pueden ser realizadas sobre la secuencia de señales adquiridas, es decir, sobre la imagen ya constituida. Esto implica, por un lado, que el usuario debe ser experto en la interpretación de las señales de georadar, y, por otro lado, que este procesamiento sea realizado off-line después de la captura, lo cual impide la identificación de elementos en el mismo momento en que el subsuelo es muestreado, aumentando la duración de la tarea de inspección. Sin embargo, ninguna de las aplicaciones realiza la inspección en el momento de la captura ni permite clasificar los activos.

El objetivo del trabajo de I+D realizado y que aquí se presenta es la realización de un software capaz de: 1) mejorar la visualización de los datos recibidos, minimizando los efectos de la atenuación de la señal y enfatizando la

información relevante; 2) localizar los activos soterrados y 3) identificar los activos asociándolos a unos tipos previamente definidos. La herramienta final a desarrollar persigue un objetivo aún más ambicioso, ya que pretende robustecer la información proveniente del georadar con la proporcionada por otros sensores, como son el Sistema de posicionamiento Global (GPS), Sistema de Información Geográfica (GIS), y combinándola con técnicas de procesamiento de imagen e inteligencia artificial.

El trabajo se ha realizado a partir de la inquietud de la empresa Wide World Geographic Services, que ha proporcionado todo su conocimiento geofísico y los medios materiales necesarios, como son el GPR, el GPS, y el GIS.

2. ALGUNAS TÉCNICAS EXISTENTES PARA LA DETECCIÓN DE ELEMENTOS SUBTERRÁNEOS

a. Gravímetros

El método de prospección gravimétrica está basado en el estudio de la variación del componente vertical del campo gravitatorio terrestre. El método gravimétrico mide las variaciones en el campo gravimétrico de la Tierra con el fin de localizar masas de mayor o menor densidad respecto al medio que lo rodea. Normalmente las medidas se realizan cerca de la superficie. Como las variaciones de densidad son bastante pequeñas, los instrumentos utilizados tienen que ser muy sensibles. Además es necesario controlar de manera precisa la elevación y latitud del terreno. Se utiliza fundamentalmente en exploración petrolera y, como método secundario, en exploración minera.

b. Magnetómetros

Se basan en la detección de variaciones del campo magnético local debidas a la presencia de estructuras subsuperficiales. Las anomalías que se miden son debidas a la imanación inducida o remanente de los materiales. Mide las propiedades magnéticas de los materiales. Las variaciones locales o anomalías en el campo magnético de la Tierra son debidas principalmente a concentraciones de material ferromagnético. Se utiliza en la detección de estructuras minerales. Es barato y útil para realizar pre-sondeos. Sin embargo, es muy sensible al ruido provocado por estructuras metálicas y no permite diferenciar entre diferentes elementos metálicos.

c. Sismógrafos

El método sísmico es artificial, es decir, necesita de una fuente generadora externa. Se basa en el cambio de las propiedades acústicas entre dos capas de diferentes materiales, que provocan la reflexión o refracción de las ondas que se inyectan. Es de gran exactitud, resolución y penetración, y se utiliza mayoritariamente en exploraciones petroleras, en la búsqueda de aguas subterráneas y en Ingeniería Civil. Permite obtener morfologías del subsuelo,

estado de compactación y fracturación de los materiales, medición de parámetros para ingeniería y geotecnia, etc.

d. Equipos de prospección eléctrica

Los métodos eléctricos exploran los potenciales eléctricos naturales y las propiedades eléctricas intrínsecas de los materiales como son la conductividad, la permeabilidad y la permitividad. Estos métodos utilizan las variaciones de las propiedades eléctricas, de las rocas y minerales, y más especialmente su resistividad. Generalmente, emplean un campo artificial eléctrico creado en la superficie por el paso de una corriente en el subsuelo.

e. Tomografía eléctrica

Como tomografía eléctrica se entiende la visualización de alguna propiedad eléctrica del subsuelo (resistividad o impedancia general), mediante secciones continuas, generalmente verticales. Esta metodología es intensiva y de alto detalle o resolución, pero muy laboriosa en la fase de colocación y adecuación de los electrodos.

3. LA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA CON GEORADAR

3.1. APLICACIONES

La prospección geofísica con georadar (Ground Penetrating Radar o GPR) es una tecnología que permite caracterizar perfectamente el subsuelo y las estructuras existentes en él, de forma eficaz, precisa y con un impacto mínimo [1].

Actualmente, existen distintas aplicaciones del GPR. No todas ellas han llegado al mismo nivel de desarrollo y tienen aún muchas limitaciones. Algunas son:

- Medición de espesores en firmes. Útil para la auscultación de carreteras y puentes.
- Estudio de anomalías en estructuras. Permite detectar variación de las propiedades electromagnéticas de los materiales.
- Ingeniería Civil. Previo a la realización de obras en el entorno, es muy recomendable comprobar el estado de las estructuras circundantes.
- Localización de estructuras enterradas en el subsuelo.
- Catastro de redes urbanas. Se puede generar un mapa cartográfico de la red de tuberías existentes en zona urbana, evitándose muchos problemas a la hora de hacer cualquier intervención.
- Geología. Localización de menas de minerales y de diferentes estratos en el terreno.
- Arqueología y restauración. Se emplea para la localización de cambios de material (grietas o existencias de elementos enterrados).
- Inspección de línea de ferrocarril. Localización de puntos de menor espesor para la prevención de accidentes.

- Preservación del Medioambiente. La inspección de terrenos con GPR permite la localización de tuberías o minas abandonadas. Se pueden identificar también áreas especialmente contaminadas.
- Determinación del espesor de hielo.

3.2. FUNDAMENTO DE FUNCIONAMIENTO, SISTEMAS EXISTENTES Y LIMITACIONES

El funcionamiento se basa en la emisión de impulsos electromagnéticos de radiofrecuencia de muy corta duración (entre 1 ns y 10 ns) que penetran en el suelo y se transmiten a través de los estratos. Parte de esta energía emitida se refleja, registrándose mediante una antena receptora cuando la onda encuentra heterogeneidades en las propiedades eléctricas de los materiales que atraviesa, mientras que otra parte continua transmitiéndose a profundidades mayores.

La señal reflejada es detectada por el receptor, en la unidad de control se amplifica y posteriormente se procesa. El resultado es un perfil vertical continuo del subsuelo o de la estructura, en la 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, es decir “tiempo doble”. Cada una de estas señales se denomina radargrama. Para calcular la profundidad, se miden los tiempos transcurridos entre la emisión y recepción de las señales, pudiendo determinarse también la extensión de la superficie reflectante una vez conocida la velocidad media de propagación de las ondas en los distintos medios. La profundidad que alcanzan las ondas está condicionada por la conductividad eléctrica de los materiales que atraviesan. También depende de la frecuencia de las ondas emitidas por la antena emisora, de forma que la profundidad de investigación es mayor cuanto más baja sea la frecuencia. El tamaño mínimo de los objetos enterrados que pueden identificarse depende de la frecuencia utilizada y de la distancia entre los puntos de medición. Dicha identificación será más exacta cuanto mayor sea la frecuencia de onda y menor sea la distancia entre los puntos de medición.

Las señales recepcionadas en un sistema GPR dependen en gran medida de las propiedades del suelo y de su composición. Cada medio posee unas características electromagnéticas propias, que son: la permitividad o constante dieléctrica relativa (ϵ), la permeabilidad magnética relativa (μ) y la conductividad eléctrica (σ). A su vez estas propiedades electromagnéticas de los medios se ven afectadas por diversos factores tales como la composición del suelo, existencia de fluidos (agua, gas, petróleo), intervalo de frecuencias empleadas en la emisión de ondas electromagnéticas al medio en los trabajos, condiciones térmicas y de presión.[7]

Existen algunas compañías en el mercado que proporcionan soluciones software para la adquisición y procesamiento de los datos del georadar, como Mala Geoscience (<http://www.malags.com>), Geophysical Survey Systems (<http://www.geophysical.com/>), Sensor and Software (<http://www.sensoft.ca/>) o IDS

(<http://www.idscompany.it/>). Sin embargo, las utilidades disponibles para el procesamiento son relativamente sencillas (filtros, modificación de ganancias, aumento de contraste) y sólo pueden ser realizadas sobre la secuencia de señales adquiridas, es decir, sobre la imagen ya constituida. Esto implica, por un lado, que el usuario debe ser experto en la interpretación de las señales de georadar, ya que él es el que selecciona y combina las utilidades de visualización, y por otro lado, que este procesamiento sea realizado off-line, después de la captura, lo cual impide la identificación de elementos en el mismo momento en que el subsuelo es muestreado.

Otra de las dificultades añadidas es la atenuación de la señal electromagnética. Esto depende de la naturaleza del suelo inspeccionado, que realiza una mayor o menor absorción de la señal, y de la frecuencia de la antena seleccionada para la realización de la inspección. Este hecho dificulta aún más la localización de los posibles elementos que puedan encontrarse en el subsuelo.

A partir de esta situación, se detecta la necesidad de disponer de un software que facilite el trabajo del geólogo o geofísico. Se han identificado algunas investigaciones previas en la localización de activos mediante diferentes tecnologías. Inicialmente, estaba claramente enfocado a la detección automática de minas y los primeros estudios provienen de Estados Unidos, extendiéndose luego a otra serie de aplicaciones civiles, arqueológicas o de ingeniería civil. Se han realizado diferentes enfoques empleando bien tecnologías de procesamiento de imagen, de procesamiento digital de señal o de reconocimiento de patrones [1, 3, 4, 8, 9, 10,12].

4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO

4.1. APORTACIÓN DEL NUEVO SISTEMA

Los sistemas y desarrollos existentes tienen limitaciones:

- La visualización de datos provenientes de georadar en pantalla on-line tiene un procesamiento muy sencillo (aplicación de filtros o ganancias). Procesamientos más depurados on-line no son posibles. Es necesario el trabajo de oficina posterior para adecuar los archivos y poder visualizar los elementos encontrados.
- No hay ningún módulo de procesamiento que identifique la existencia de elementos automáticamente.
- No hay ningún módulo que, una vez identificada la presencia de algún elemento, incluso con supervisión de usuario, sea capaz de asociarlo a un activo concreto: tanque, tubería, cavidad, etc.
- La inclusión de técnicas de procesamiento de imagen y de inteligencia artificial es mínima.

El presente desarrollo es, por tanto, novedoso, no habiéndose encontrado nada similar en el mercado. Sus principales características son:

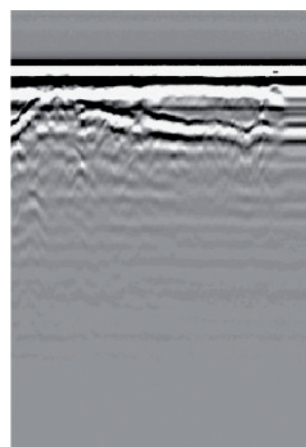
- captura de perfiles y procesamiento que mejora la visualización, minimizando la atenuación de la señal y el ruido en las capturas, principalmente a mayores profundidades.
- localización automática de los objetos enterrados.
- identificación de dichos objetos localizados, es decir, clasificación de los mismos en grupos.
- realización en tiempo real de los pasos anteriores, facilitando información al momento,
- posibilidad de que personal sin formación especializada en geofísica o tratamiento de señal pueda utilizar el aparato, dado que es el propio sistema el que realiza automáticamente el procesamiento de los datos y muestra al usuario los elementos identificados en el subsuelo.

Por tanto, la aportación en el ámbito de la I+D en el área de las prospección geofísica es notable.

5. SEÑAL PROVENIENTE DEL GEORADAR

Una de las dificultades mayores que implica la prospección por GPR es la correcta interpretación de los perfiles obtenidos. Esta es la imagen constituida a partir de cada uno de los radargramas proporcionados por el GPR a lo largo del tiempo de captura (imagen obtenida con RAMAC GPR y software Ground Vision, serán referidos más adelante).

La Fig. 2 representa un radargrama en bruto. De la composición de todos los radargramas en una inspección resulta una imagen como la que se muestra en la Fig.1. Si analizamos dicha imagen, se puede apreciar lo siguiente:



- La superficie horizontal es el cambio de medio aire / suelo, con el espesor de la capa de asfalto.
- La diferente escala de grises en los puntos son los diferentes picos de amplitud.
- La señal comienza a atenuarse muy pronto.
- Se intuyen formas curvas que contrastan con las horizontales. Sin embargo, no se sabe con seguridad si están ni a qué corresponden.

Fig. 1: Imagen obtenida con el georadar

En la parte izquierda de la imagen se intuyen las hipérbolas, pero su perfil es vago. La onda emitida es absorbida en parte por el medio, de manera que a determinada profundidad no se obtiene ningún reflejo. A mayor frecuencia de la onda emitida, menor penetración.

La solución propuesta aglutina los siguientes pasos:

1. Mejora de la imagen inicial. En las pruebas preliminares realizadas se comprobó que es posible aplicar técnicas de procesamiento de imagen para extraer más información de la señal proveniente de georadar, minimizando el efecto de la atenuación de la señal electromagnética, que, como se puede observar en la Figura 1, impide la visualización de lo que existe a determinada profundidad, por lo que se hace necesario diseñar técnicas de filtrado y enfatizado de la señal que permita eliminar el ruido ocasionado por reverberaciones y resalte los elementos de interés.

2. Localización de elementos de interés. Una vez mejorada la calidad de la imagen substancialmente, se puede proceder a la localización de otros elementos mediante técnicas de reconocimiento de patrones.

3. Identificación de la hipérbola de difracción que describe dicho elemento de interés. Una vez se haya localizado el elemento, signo de que existe algún activo soterrado, se puede identificar la curva que mejor describe la hipérbola en cada caso, es decir calcular los coeficientes a , b , g .

4. Selección del vector de entrada para la clasificación. Con estas y otra serie de características extraíbles de las imágenes, se seleccionan las más representativas.

5. Diseño de un clasificador (distribución gaussiana multivariante, GMM, SVM, métodos no paramétricos). En el caso de necesitar técnicas avanzadas como las dos últimas mencionadas, se aplicará entrenamiento supervisado (asociación de salidas a entradas establecida por el usuario). Será necesario para ello tener una amplia gama de perfiles de diferentes elementos (tuberías, tanques, cavidades, bolsas de agua...), para poder cubrir el mayor espectro posible de posibilidades.

6. PROCESAMIENTO DE LA IMAGEN DE ENTRADA

El primer paso consiste en la correcta lectura de los datos en bruto obtenidos por el sistema georadar con el software *Ground Vision*. Estos datos, se encuentran en formato RAMAC. Al medir con *Ground Vision* se generan 2 ficheros, un fichero de datos (.rd3) y un fichero cabecera (.rad). De toda esta información, para la reconstrucción se emplea el número de muestras (samples) y de trazas (traces), que se asimilan a las filas y columnas de la imagen reconstruida, respectivamente.

Fijándonos en una traza solamente, se observa que la señal recibida no proporciona información a partir de un punto determinado. He aquí una traza cualquiera:

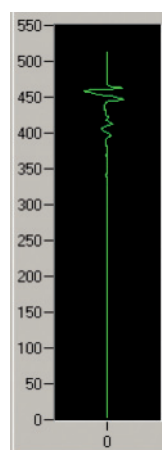


Fig. 2: Taza obtenida de Ground Vision

En la Figura 2, se aprecia que a partir de cierto punto la amplitud de la señal recibida es prácticamente imperceptible, y, en este caso, se corresponde con 1 m de profundidad. En cada traza esto puede producirse a una profundidad diferente dependiendo mucho del tipo de suelo y grado de humedad.

El método de amplificación de la señal no es trivial, debe producir una señal fácilmente observable, y debe aumentar la relación señal / ruido. Es probable que el método amplifique también los ruidos existentes en la señal, y, por ello, será necesaria la aplicación posterior de filtros.

Se propone la amplificación de la señal de manera proporcional a la inversa de la amplitud existente entre un pico y un valle consecutivos. Llamaremos a este valor amplitud instantánea. El problema de este método radica en la complejidad para obtener los valores de picos y valles con exactitud, por lo que se propone calcular la envolvente del valor absoluto de la función, cuyos valores serán proporcionales al valor de la amplitud instantánea de la señal. Para un perfil, se calcula la envolvente para cada traza y se utiliza la envolvente media para calcular la función de amplificación. Se realiza el cálculo de las envolventes de todas las trazas en el perfil. A partir de estas envolventes se obtiene la envolvente media. Se toma la inversa de la media de las envolventes como función correctora de las amplitudes. Al aplicar la función correctora se obtiene una mejora en la imagen:

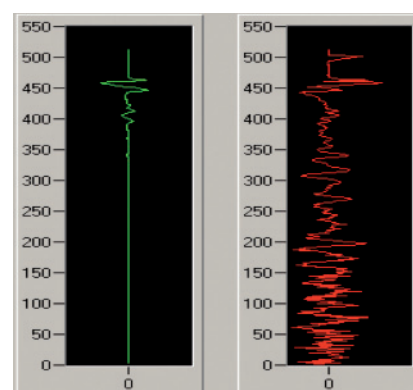


Fig.3: Taza sin corregir y corregida

En las zonas más profundas, la señal amplificada presenta más ruido, con lo que posteriormente será necesario aplicar filtros correctores a esta imagen. Sin embargo, con este tratamiento, la imagen resultante de la superposición de todas las trazas ya ha mejorado con respecto a la inicial.

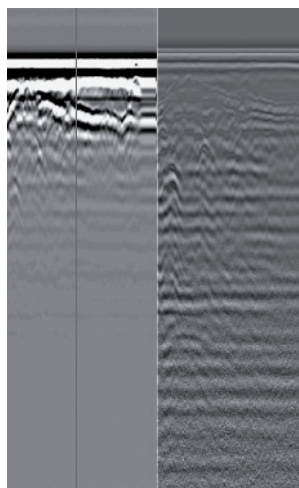


Fig. 4: Imagen inicial y con amplificación de señal

A continuación se realiza un filtro de media para la eliminación de las líneas horizontales y un enfatizado de la imagen. La imagen resultante tras todo el proceso presenta la mejoría que se puede observar a continuación:

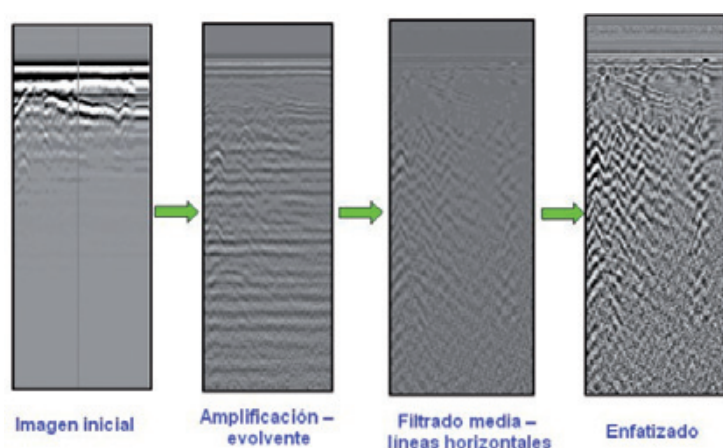


Fig. 5: Mejora sustancial de la imagen tras aplicar el algoritmo

7. LOCALIZACIÓN DE LOS ACTIVOS

Una vez que se obtiene una imagen de suficiente calidad, se debe proceder a la localización automática de hipérbolas, que indica la presencia de activos soterrados.

El reconocimiento de patrones, empleado en muchas aplicaciones de visión artificial, consiste en la selección de una región determinada, que se identifica como patrón, y a continuación la búsqueda de esa plantilla en otras imágenes.

En pruebas preliminares se han empleado herramientas software comerciales para el reconocimiento de patrones, como son IMAQ o Halcon, cuyos resultados fueron limitados. Es por ello que se ha optado por la aplicación de métodos de clasificación avanzados como Support Vector Machine (SVM) para la resolución de problemas complejos. SVM es un potente algoritmo con fuertes fundamentos teóricos [5]. El principio de SVM es construir un hiperplano óptimo para la separación de clases en el caso de separación lineal. En el caso de separación no lineal, SVM emplea un kernel, que se usa para transformar el espacio inicial en un nuevo espacio de características en el cual la separación sea lineal. Pertenece al grupo de los clasificadores generalistas lineales. Al tratarse de un método de aprendizaje supervisado, es necesaria una fase previa de entrenamiento proporcionando muestras del abanico de elementos a clasificar. Es importante para el correcto entrenamiento que la serie de ejemplos proporcionada cubra toda la casuística y con un número de muestras homogéneo para cada situación. Las principales ventajas de SVM consta en ser buenos clasificadores lineales y no lineales, son válidos para la clasificación de ejemplos con dimensiones elevadas, se adaptan a conjuntos de entrenamiento pequeños y son capaces de generalizar bien.

Se muestra a continuación un ejemplo con los resultados obtenidos.

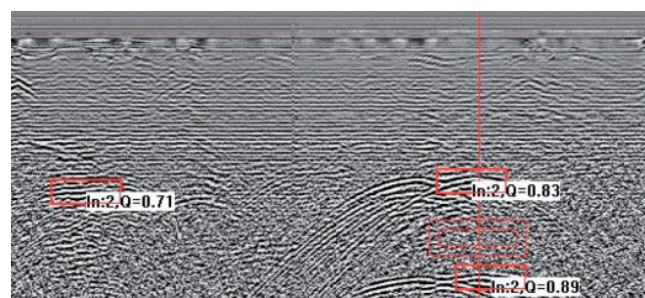


Fig. 6: Resultados de localización de activos

8. EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS

Hasta ahora se ha conseguido localizar hipérbolas. Una vez que la hipérbola está ubicada en la imagen y tenemos una coordenada (x, y) de su centro, se dibuja un rectángulo que delimite el elemento encontrado. A partir de él, se debe estimar la hipérbola que mejor describe esa región y sus parámetros característicos. Sea por ejemplo:

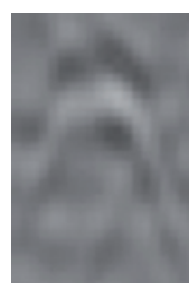


Fig. 7: Figura a partir de la cual se va a estimar la hipérbola

Para ello, se va a emplear el método de ajuste por mínimos cuadrados. La ecuación de la hipérbola a ajustar es la siguiente:

$$Y = \alpha + \beta + (x-\gamma)^2$$

Es preciso un nuevo algoritmo de procesamiento de imagen, cuya secuencia se muestra a continuación:

Imagen inicial	Enfatzado	Umbralizado-threshold	Filtrado
			

Fig.8: Secuencia de procesado

La hipérbola localizada se observa en la siguiente figura:

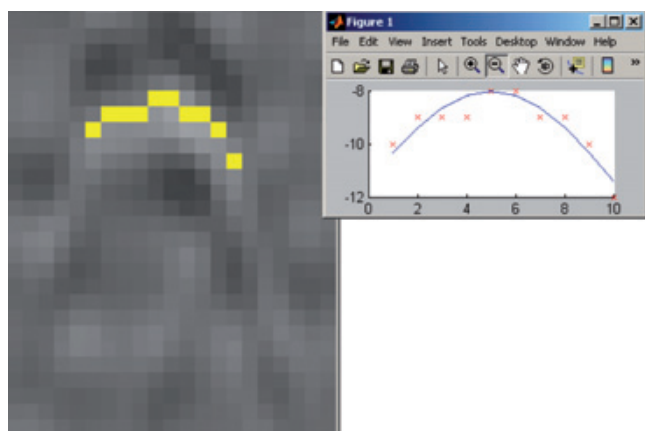


Fig. 9: Hipérbola extraída

Para cada una de las adquisiciones se ha obtenido una curva de hipérbola diferente; esto es, distintos a, b, g. Además de los parámetros de la hipérbola se pretende obtener la máxima información posible de la imagen que permita su clasificación correcta. En conclusión, los parámetros del vector de entrada son siete: alfa, beta, gamma, error de ajuste de la hipérbola, número de reverberaciones, distancia media entre las reverberaciones y anchura media de las reverberaciones.

9. IDENTIFICACIÓN DE LOS ACTIVOS

Existen varios métodos de clasificación más o menos complejos según la naturaleza y dificultad del problema. El más sencillo es el que emplea la distancia Euclídea, clasificando el elemento objeto de estudio como perteneciente a la clase con la que presenta menor distancia. Existen otros métodos, de base estadística, como la distancia de Mahalanobis[3], que además de la distancia Euclídea considera la distribución

gaussiana de la clase. Otros métodos más complejos emplean técnicas de inteligencia artificial, como son las redes neuronales o los sistemas neuro-fuzzy[2]. También es importante reseñar que en situaciones complejas en las que se requiera clasificar y donde existan un elevado número de

variables, es conveniente la reducción del número de dimensiones del vector de entrada y por tanto, del espacio en el que se clasifica. El método más extendido para llevar a cabo esta reducción es el método de PCA o Análisis de Componentes Principales, basado en la obtención de la matriz diagonalizada con los autovalores y los autovectores[6]. Se pueden seleccionar aquellos que representan el 95% de la información y emplear el nuevo sistema de referencia para la clasificación que maximizará la separación de clases.

En el caso concreto que nos ocupa se van a emplear métodos estadísticos, en concreto, la distancia de Mahalanobis como método de clasificación (si las clases son separables, es comprensible y fiable). Dado que el vector de entrada es de 7 variables, se considera lo suficientemente razonable para no aplicar reducción por PCA o similar. Una vez implementado, se ha validado la bondad del método, siendo los resultados muy satisfactorios como se verá en un apartado posterior.

10. SISTEMA INTEGRADO

El software desarrollado para la mejora de la calidad de la imagen, la detección automática de los activos y la clasificación en un tipo determinado se incluye en una aplicación final que además integra el control del GPR, y sincroniza la adquisición de datos con un GPS y un sistema de georeferenciación, siendo Google Maps en la versión actual, y será el GIS Esri en la versión final. Los datos adquiridos y los resultados son almacenados en bases de datos para poder tener registrado todo el proceso.

La interfaz de usuario de la aplicación final es la siguiente:

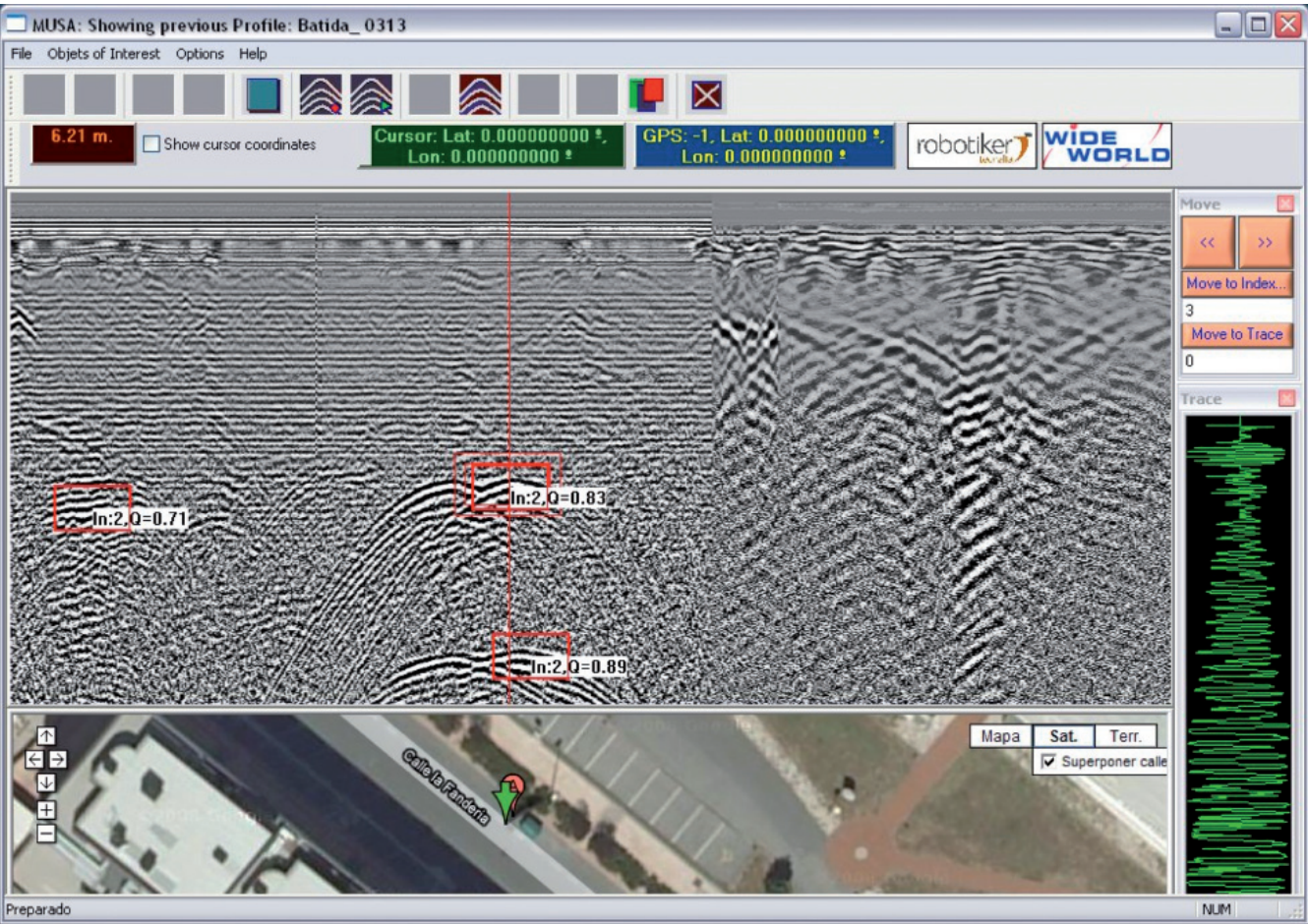


Fig. 10: Interfaz de usuario del software integrado.

11. RESULTADOS OBTENIDOS

El software realizado automatiza todo el proceso, es decir, reconstruye la imagen con las trazas capturadas del georadar, las procesa para minimizar el efecto de la atenuación de la señal y eliminar el ruido causado por las reverberaciones de la misma, localiza las hipérbolas (activos), y extrae su ecuación característica mediante ajuste por mínimos cuadrados, procesa la región de la hipérbola para obtener el resto de parámetros característicos del vector de entrada y aplica el clasificador para identificar el activo en sí.

Se ha validado la bondad de la solución propuesta a través de su aplicación a una colección de ficheros de capturas realizadas con el georadar. Los activos a clasificar presentes en dichas captaciones pertenecen a tres grandes bloques: cavidades, tuberías recubiertas con capa de arena y tuberías sin capa de arena. Se ha realizado las batidas con diferentes frecuencias de captura en el georadar (250 MHz, 500 MHz, 800 MHz).

Debido a que la frecuencia de adquisición de las señales de georadar es también un dato de entrada que se conoce a priori, se ha separado la clasificación por frecuencias. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente Tabla.

Clase	% correcto	
	Frecuencia	
Cavidad	250	100 %
	500	100 %
	800	100 %
Tubería con capa de arena	250	81.82 %
	500	92.85 %
	800	25 %
Tubería sin capa de arena	250	85.71 %
	500	83.33 %
	800	50 %

Tabla 1: Resultados de clasificación.

Las causas de que el porcentaje sea menor para tuberías en comparación al éxito rotundo para cavidades es debido principalmente a que existe muy poco contraste entre las hipérbolas de tuberías y el fondo, de manera que el proceso automático, en su tratamiento no logra sacar información

MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

Existen varios métodos y equipos para la prospección geofísica. Algunos de ellos se describen brevemente a continuación:

- **Gravímetros:** están basados en el estudio de la variación del componente vertical del campo gravitatorio terrestre, y mide las variaciones en el campo gravimétrico de la tierra con el fin de localizar masas de mayor o menor densidad que el medio que lo rodea. Se emplea fundamentalmente en exploración petrolera y como método secundario en exploración minera.
- **Magnetómetros:** se basan en la detección de variaciones del campo magnético local debidas a la presencia de estructuras subsuperficiales. Las anomalías que se miden son debidas a la imanación inducida o remanente de los materiales. Se emplea en la detección de estructuras minerales, se emplea para realizar pre-sondeos, sin embargo es muy sensible al ruido provocado por estructuras metálicas y no permite diferenciar entre diferentes elementos metálicos.
- **Sismógrafos:** se basa en el cambio de las propiedades acústicas entre dos capas de diferentes materiales, que provocan la reflexión o refracción de las ondas que se han inyectado (necesita una fuente generadora externa). Se emplea en exploraciones petroleras, en la búsqueda de aguas subterráneas y en ingeniería civil.
- **Equipos de prospección eléctrica:** exploran los potenciales eléctricos naturales y las propiedades eléctricas intrínsecas de los materiales como son la conductividad, la permeabilidad y la permitividad. Estos métodos utilizan las variaciones de las propiedades eléctricas, de rocas y minerales, y en concreto su resistividad. Generalmente, emplean un campo artificial eléctrico creado en la superficie por el paso de una corriente en el subsuelo. Existen varios métodos dentro de esta categoría como son medida de Resistividades, sondaje eléctrico vertical y tomografía eléctrica, siendo este último uno de lo más empleados. Mediante secciones continuas, generalmente verticales se colocan unos electrodos, a partir de los cuales y del paso de corriente se puede medir alguna propiedad eléctrica del subsuelo (resistividad o impedancia general) proporcionando alto nivel de detalle.

En cada caso concreto es posible que estos métodos sean suficientes o por el contrario se queden cortos y sea necesario complementar la información con otros. El georadar resulta un método de prospección muy interesante dado que se genera mapas del subsuelo a partir de la reconstrucción de la onda electromagnética reflejada, apreciándose los terrenos uniformes y aquellos objetos soterrados caracterizados por las hipérbolas generadas en su reflexión.

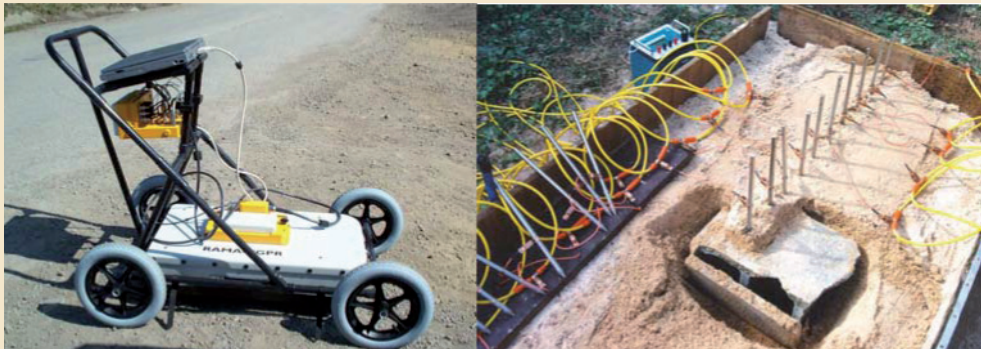


Figura 1: Equipos de Prospección Geofísica: georadar (izquierda) y disposición de electrodos para tomografía eléctrica (laboratorio de geología aplicada de la Universidad de Burgos)

que clasificar. Este efecto se ve magnificado al aumentar la frecuencia (mayor frecuencia en la señal, mayor resolución en la imagen pero menor penetración, lo que implica menos reverberaciones en algunos casos y por tanto, pérdida de datos).

Los resultados de la clasificación son buenos, aunque mejorarían notablemente si el elemento estuviera en suelo de caliza, como en el caso de cavidades o en otro donde el contraste de la señal fuera mayor. La naturaleza del suelo influye sobre manera en la transmisión de la señal y en la amplitud de la onda de reflexión que se produce al incidir sobre el activo y que es recogida por la unidad receptora del georadar.

12. CONCLUSIONES

Como resultado de todo el trabajo aquí presentado se obtienen las siguientes conclusiones:

- **Mejora de la calidad de la imagen.** La señal obtenida por el equipo de georadar aparece a veces debilitada, siendo esto ocasionado por la absorción del medio. Este fenómeno se ve agravado por el aumento de la frecuencia de emisión (más resolución y menos penetración). Es necesario amplificar la señal mediante técnicas de procesamiento de señal digital. Se ha probado multiplicando la amplitud de la onda por la inversa de la media de la envolvente de todas las trazas

para cada imagen. Los resultados obtenidos han sido satisfactorios, logrando extraer mucha más información. Se ha demostrado que amplificando la señal tal y como se ha descrito, filtrando ruidos y líneas horizontales y enfatizándola, se consiguen visualizar las hipérbolas más claramente y facilitar su búsqueda por software de manera automática.

- **Localización del activo.** Una vez localizado el activo, se ha demostrado que es posible hallar los puntos que conforman su hipérbola, y ajustarlos a la ecuación de la hipérbola que mejor los describe mediante mínimos cuadrados. Los parámetros que caracterizan el elemento son la frecuencia de captura, los descriptores de la hipérbola aproximada (alfa, beta, gamma, error), el número de reverberaciones de la señal, la anchura media de las reverberaciones y la distancia media entre las reverberaciones. Se ha realizado un programa que realiza todas las tareas de procesamiento automáticamente y que permite el tratamiento de todas las imágenes de manera repetitiva, fiable y rápida.
- **Caracterización del activo.** Se ha probado la viabilidad de la clasificación mediante métodos estadísticos. Los resultados de la clasificación son bastante buenos, en torno al 80-90 % para las frecuencias menores (250 y 500 MHz) en el caso de las tuberías con y sin capa de arena. La misma señal electromagnética en suelos diferentes ocasiona diferentes respuestas ya que el comportamiento y la amplitud de la señal reflejada se ve alterada.
- **Manejo del sistema por personal sin conocimiento elevado en geofísica o tratamiento de señal.** Permite que personal sin formación especializada de geofísico o tratamiento de señal pueda utilizar el aparato, dado que es el propio sistema el que realiza automáticamente el procesamiento de los datos y muestra al usuario los elementos identificados en el subsuelo y su ubicación.
- **No se ha apreciado ningún cambio en la respuesta de la señal electromagnética recibida por el georadar que haya podido ser alterada por campos eléctricos o magnéticos generados por activos soterrados eléctricos, como manojos de cables. Su presencia no ha influido en la correcta detección de elementos.**

En definitiva, a partir de una imagen difusa construida por un conjunto de ondas electromagnéticas emitidas sobre el subsuelo, se ha conseguido:

1. Mejorar la imagen para poder visualizar discontinuidades y alteraciones en su propagación que descubran la presencia de activos, minimizando el efecto de atenuación de la señal, sobre todo con la frecuencia y ruidos;
2. Localizar automáticamente los activos soterrados, que se manifiestan en la generación de una hipérbola de difracción en las ondas electromagnéticas recibidas;

3. Clasificar cada activo mediante la extracción de un vector de características y aplicación de la distancia de Mahalanobis en una de las 3 clases disponibles, con notable éxito.

REFERENCIAS

- [1] Al- Nuaimy W, Huang Y, Nakhkash, M, et al. "Automatic detection of buried utilities and solid objects with GPR using neural networks and pattern recognition", *Journal of Applied Geophysics*, 2000. Vol. 43, p. 157-165.
- [2] Andina D. *Computational Intelligence*. 1st edition. Springer. Febrero 2007. ISBN: 978-0387-37450-5.
- [3] Bishop C. M. *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer. 2006. Capítulo 12. ISBN: 978-0387-31073-2.
- [4] Brooks J, Van Kempen L, and Sahli H. "A Primary Study in Adaptive Reduction and Buried Minelike Target Enhancement From GPR Data," *Proc. SPIE, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets*. Agosto 2000. Vol. 4038, p. 1138-1192, Orlando, Florida, USA.
- [5] Capineri L, Grande P, Temple J. A. G. "Advanced image-processing technique for real-time interpretation of ground-penetrating radar images." *International Journal of Imaging Systems and Technology*. 1998. Vol. 9, Issue 1, p. 51-59.
- [6] Cortes C, Vapnik V. "Support-Vector Networks", *Machine Learning*, 1995. Vol. 20, 1995. p. 273 - 297.
- [7] Jolliffe I.T. *Principal Component Analysis*. 2nd ed. Springer, 2002. ISBN: 978-0-387-95442-4.
- [8] Lázaro Salinas R. "Prospección del subsuelo mediante ondas radar. Fundamentos y principales aplicaciones en Ingeniería Geológica." Director: Albert Casas. Departamento de Geoquímica, Petrología y prospección Geológica, universidad de Barcelona, 1995.
- [9] Ligthart E. "Landmine detection 3D GPR Imaging". Graduation project IRCTR-A-022-03, October 2003. International Research Centre of Telecommunications-transmission and Radar. Faculty of Electrical Engineering, mathematics and Computer Science. Delf University of Technology. Netherlands.
- [10] Orlando L, Soldovier F. "Two different approaches for georadar data processing: A case study in archaeological prospecting". *Journal of Applied Geophysics*. Marzo 2008. Vol. 64, Issues 1-2, p. 1-13.
- [11] Paik, Joonki, Lee, Cheolha, Abidi, Mongi. "Image processing - based mine detection techniques using multiple sensors: a review". *Subsurface Sensing Technologies and Applications: an international journal*. July 2002. Vol. 3, n° 3, p. 153-202.
- [12] Pajares G, de la Cruz J M. *Visión por computador*. RA-MA Editorial, 2001, ISBN: 84-7897-472-5.
- [13] Sytnik O. V., Gorohovatsky A. V. "Signal processing algorithms in identification of subsurface objects." *Radioelectronics and Communications Systems*. 2007. Vol. 50, Number 10, p. 557-563.