

RADAR DE SUBSUELO PARA EL ESTUDIO NO DESTRUCTIVO DE ESTRUCTURAS HISTÓRICAS: ¿QUE INFORMACIÓN APORTA?

GPR IN CULTURAL HERITAGE NON-DESTRUCTIVE EVALUATION: WHAT INFORMATION PROVIDES THIS TECHNIQUE?

V. Pérez-Gracia¹, S. Santos Assunção¹, L.G. Pujades²

¹. Dpt. de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería. EUETIB/CEIB. Universidad Politécnica de Catalunya.

² Dpt. de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Catalunya.

Resumen

Los ensayos no destructivos en estructuras históricas con radar de subsuelo (GPR) son cada vez más frecuentes. Proporcionan información sobre elementos internos de la estructura, mostrando su situación y, en ocasiones, confirmando su existencia. También permiten definir la distribución de diferentes materiales interiores al medio, como se puede ver en el ejemplo mostrado en este artículo. Aunque su uso habitual es para determinar posición y profundidad de elementos embebidos en un medio, el radar de subsuelo es una herramienta que también se puede utilizar para obtener una información más extensa y detallada de dicho medio. En estudios de patrimonio, un análisis de gran interés es la determinación de sectores afectados por el agua. Además de definir zonas en las que puede haberse presentado un problema de humedad, ¿es posible conocer aproximadamente el contenido de agua presente en un muro o en otras estructuras? En este trabajo se presentan algunos resultados experimentales en los que se analiza la amplitud, la frecuencia y la velocidad de la señal, comparándolos con medidas del contenido de agua y con modelos teóricos. Los resultados parecen indicar que algunos parámetros de la señal que proporciona este método no destructivo puede utilizarse para estimar la humedad del medio.

Palabras clave: radar de subsuelo, ensayos no destructivos, patrimonio, humedad

Abstract

Nondestructive testing in historic structures by means of ground penetrating radar (GPR) are becoming more and more frequent applications. They provide information about internal elements of the structure. Radar data allows to determine the position

and depth to the target and, in some cases, is a useful tool to confirm the inner objects existence. In some evaluations GPR is applied in order to determine the internal distribution of materials in structures or subsoil. Although GPR is commonly used to determine position and depth to the inner targets, it is also an effective method in order to obtain extensive and detailed information of the medium. In Cultural Heritage applications could be useful to define zones affected by humidity. GPR provides this information, but besides defining moist sectors, is it possible to estimate approximately the water content in walls and other structures? In this work, some experimental tests are showed in order to define the method capability to determine approximately the water content in a medium. Frequencies, amplitudes and velocities measured from radar data obtained under lab conditions are analyzed and compared with experimental measurements of water content. Radar data are also compared to different theoretical models. Results seem to indicate that some signal parameters could be used in order to estimate humidity in a relatively easy way.

Palabras clave (Keywords): *ground-penetrating radar, non-destructive testing, cultural heritage, water content.*

1. INTRODUCCIÓN

El radar de subsuelo es una técnica de prospección geofísica que puede utilizarse en diferentes campos como ensayo no destructivo. Está basada en la detección de señales electromagnéticas que se reflejan en discontinuidades internas del medio. Estas señales las produce una antena emisora que se sitúa sobre la superficie del medio. La distribución de las propiedades electromagnéticas del medio caracteriza la propagación de la señal por su interior. En los contactos entre zonas que presentan un cierto contraste entre estos parámetros electromagnéticos parte de la energía incidente se refleja, propagándose hacia la superficie, y parte de la energía continúa hacia el interior del medio tras producirse un cambio en su trayectoria. La energía reflejada que se propaga hacia la superficie es captada por una antena receptora situada también sobre la superficie. El porcentaje de energía reflejada, los ángulos de reflexión y de refracción y la velocidad de la señal están condicionados, entre otros factores, por los parámetros electromagnéticos de los medios en contacto. El resultado de este proceso es una imagen final que muestra pseudosecciones del interior del medio y que facilita la localización de elementos embebidos siempre que se cumplan al menos cinco condiciones: (1) El medio debe ser parcialmente “transparente” al campo electromagnético, para permitir la propagación de la señal por su interior; (2) El contraste entre las propiedades electromagnéticas de los materiales en contacto debe ser suficiente para permitir que la onda reflejada tenga una amplitud superior al ruido de fondo de la señal; (3) El tamaño del elemento embebido ha de ser suficiente para que la antena pueda detectarlo como una anomalía; (4) La profundidad a la que se encuentra el elemento anómalo debe ser inferior a la distancia límite para la cual la atenuación de la señal no permite su visualización y posterior identificación por tener amplitud similar a la del ruido de fondo; (5) La relación entre señal y ruido ha de ser

suficientemente buena como para poder identificar las anomalías y discernirlas del ruido (ya sea interno o externo) de fondo.

2. IMÁGENES DE ELEMENTOS ANÓMALOS EN EL MEDIO

El radar de subsuelo se aplica como ensayo no destructivo al estudio de patrimonio y de yacimientos arqueológicos, ya que se suelen cumplir las condiciones antes mencionadas. Habitualmente se obtiene información considerando el tiempo de propagación de la señal y determinando la distancia o profundidad a los elementos o zonas anómalas mediante la velocidad de propagación de la señal (por ejemplo, [1] y [2]). En estos casos, el registro de radar resulta ser una “pseudoimagen” bidimensional del subsuelo o del interior del medio que muestra un corte del mismo. Las anomalías registradas son reflexiones de la señal que se corresponden con discontinuidades bruscas de los parámetros electromagnéticos del medio (figura 1). Estas anomalías en el registro proporcionan información acerca de la existencia de diferentes materiales o de cambios en las propiedades físicas de un mismo material (variaciones en el contenido de agua, existencia de zonas fisuradas o disgregadas, cambios en la compactación, etc.). El análisis de las señales permite estimar la profundidad a la que se encuentra el reflector. De este modo se pueden localizar zonas dañadas ([3]), zonas afectadas por humedad ([4]), existencia de estructuras subyacentes a edificaciones ([5]; [6]), o bien elementos estructurales internos al medio ([2]; [7]). La adquisición de datos de radar en mallas finas permite también interpolar los registros y obtener representaciones tridimensionales del medio y superficies paralelas definidas por intervalos de tiempos de propagación, en las que se puede observar la distribución geométrica de las anomalías ([8]). Los modelos 3D así definidos muestran las amplitudes que superan un cierto rango preseleccionado. La resolución obtenida dependerá, entre otros factores, de la separación entre perfiles y del número de muestras que se adquieran cada metro.

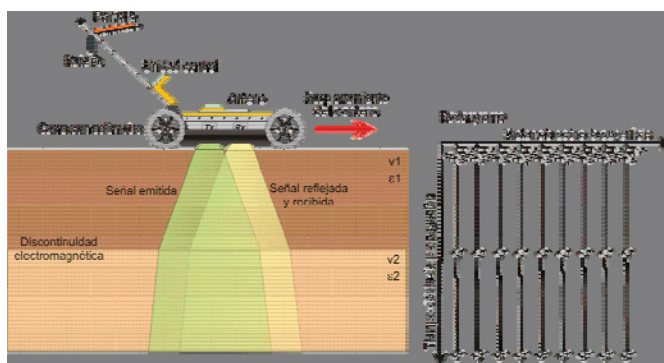


Fig. 1. Esquema del funcionamiento de un radar de subsuelo.

En la figura 2 puede verse una representación tridimensional de un yacimiento arqueológico.

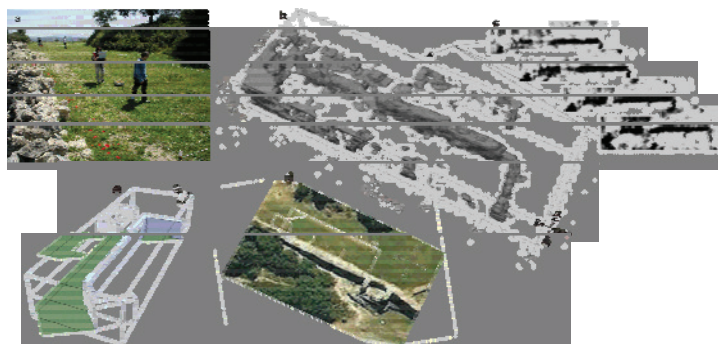


Fig. 2. Obtención de imágenes 3D de anomalías. a) Adquisición de datos. b) Imagen 3D de amplitudes por encima de un umbral del 65% del máximo valor. c) Superficies obtenidas tras la interpolación de perfiles. d) Situación de las anomalías sobre una fotografía aérea. e) Posible interpretación de los reflectores.

El estudio se realizó en un emplazamiento arqueológico parcialmente excavado. El suelo era un terreno arcilloso de topografía suave, sobre el que se realizaron perfiles paralelos, separados 50 cm entre sí, con una antena de frecuencia central 200 MHz. Para la adquisición de datos se aplicó una ventana temporal de 100 ns, y un muestreo de 2 trazas por centímetro. Para obtener los registros se efectuó una superposición de 4 trazas (stacking). La estimación de la velocidad promedio de la onda en el medio, calculada mediante las hipérbolas de reflexión, proporcionó un valor de unos 8 cm/ns. El procesado de los registros y la obtención de las imágenes tridimensionales se hizo mediante el programa GPRslice (Geophysical Archaeometry Laboratory). Principalmente consistió en una corrección de línea base, una amplificación exponencial de la señal, un filtro paso banda y la posterior interpolación entre señales utilizando ventanas temporales de 3 ns. Mediante esta interpolación se obtuvieron secciones de amplitud, es decir, imágenes horizontales de las amplitudes registradas, elevadas al cuadrado, promediadas en cada ventana. El resultado permite visualizar la geometría de los reflectores internos del medio. En el ejemplo mostrado en la figura 2 estos reflectores se asocian con materiales constructivos (piedra). La geometría de las amplitudes parece indicar la existencia de una construcción de grandes dimensiones y otras construcciones más pequeñas y más superficiales.

3. CAMBIOS EN LA VELOCIDAD. ¿QUÉ INFORMACIÓN APORTAN?

Como se ha comentado, la velocidad de propagación de la señal permite definir la profundidad a la que se localiza un reflector. Ahora bien, esta velocidad puede proporcionar otros detalles adicionales sobre el medio por el que se ha propagado la señal. Los suelos y muchos materiales utilizados en construcción (roca, hormigón, etc.) son medios heterogéneos que se pueden considerar compuestos por tres fases: gaseosa, líquida y sólida. La primera suele ser aire, la segunda agua y la tercera son los

diferentes componentes minerales. La composición de las distintas fases determina las propiedades electromagnéticas de los suelos que, a su vez, definen la velocidad a la que propaga la onda electromagnética. El parámetro que mayor efecto tiene sobre la velocidad es la permitividad dieléctrica relativa que, para la mayor parte de los minerales, puede considerarse entre 4 y 7 ([9]). Este parámetro, en el caso del aire, tiene un valor de 1, mientras que el agua presenta un valor promedio de 81. Estas grandes diferencias hacen que uno de los factores más importantes que define el valor de la permitividad dieléctrica relativa de un medio es su contenido en agua. Por lo tanto, cambios en la velocidad pueden indicar variaciones en la humedad de un medio. Diferentes modelos relacionan la permitividad dieléctrica con el contenido de agua y con la porosidad. Posiblemente el más utilizado sea el modelo CRIM (Complex refraction index model), definido en la ecuación 1. Este modelo considera tres fases: sólida (con permitividad dieléctrica ϵ_s), líquida (de permitividad dieléctrica relativa ϵ_w) y gaseosa (de permitividad dieléctrica relativa ϵ_a). Relaciona la permitividad dieléctrica relativa del medio (ϵ_r) con las de sus fases componentes, con la porosidad (n) y con el contenido volumétrico de agua (θ):

$$\sqrt{\epsilon_r} = (n - \theta)\sqrt{\epsilon_a} + \theta\sqrt{\epsilon_w} + (1 - n)\sqrt{\epsilon_s} \quad (1)$$

Otra relación es la propuesta por Topp (1980) [10]. Se trata de una fórmula empírica, obtenida tras analizar diversos suelos, que relaciona el contenido volumétrico de agua del medio con la permitividad dieléctrica promedio:

$$\epsilon_r = 3.03 + 9.3\theta + 146\theta^2 - 76.7\theta^3 \quad (2)$$

Se realizó un estudio experimental con GPR para relacionar empíricamente el contenido de agua con la velocidad de la señal, medida a partir del tiempo doble de propagación en muestras de espesor conocido. Para ello se determinó la velocidad de propagación de la señal en diferentes muestras (caracterizadas, cada una de ellas, por un grado de saturación y una porosidad), sobre las que se realizaron diferentes ensayos o tomas de datos, situando el reflector a distintas profundidades. La velocidad considerada para cada muestra fue el promedio de todas las obtenidas en cada uno de los distintos ensayos. Algunos resultados obtenidos sobre una misma muestra, se presentan en la figura 3. La permitividad dieléctrica relativa se calculó a partir de la velocidad de propagación de la señal (v) y de la velocidad en el vacío ($c = 30 \text{ cm/ns}$) mediante la relación simplificada:

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (3)$$

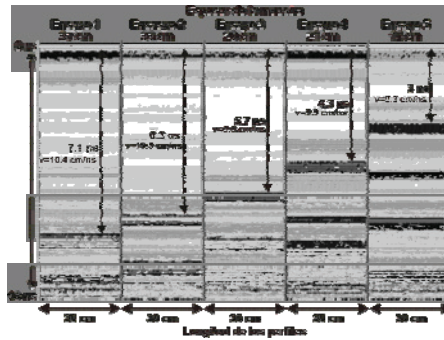


Fig. 3. Radargramas obtenidos en diferentes ensayos sobre la misma muestra (caracterizada por un grado de saturación de 0.36, una porosidad de 0.41 y un contenido de agua de 0.15). La velocidad promedio de propagación es de 9.9 ± 0.6 cm/ns.

Los resultados de todas las medidas realizadas se resumen en la gráfica de la figura 4, en la cual se anotan los puntos experimentales y las curvas obtenidas mediante la relación empírica de Topp y el modelo CRIM.

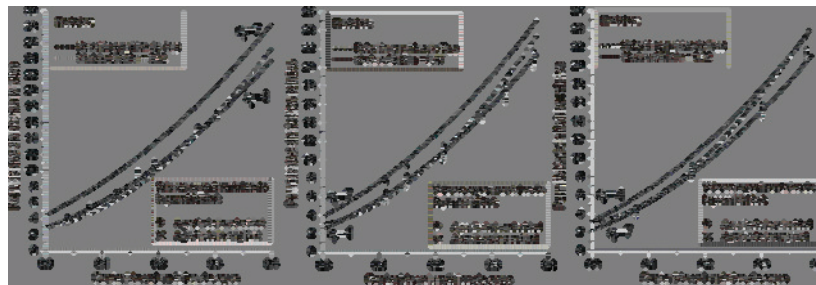


Fig. 4. Comparación entre los resultados experimentales y los modelos.

En este último caso se han considerado los valores de 4 y de 7 para la permitividad dieléctrica relativa de la fase sólida (en las gráficas de la figura 4 se representa con dos curvas de trazo continuo). Puede verse que el aumento de la permitividad dieléctrica relativa se asocia principalmente con el aumento del contenido de agua, afectado en menor medida la porosidad. Para valores elevados de la porosidad, los puntos experimentales están próximos a las curvas resultantes del modelo CRIM en el caso de una permitividad dieléctrica relativa de la fase sólida de 4, incluso en el caso de contenidos de agua elevados (valores superiores a 0.25).

4. AMPLITUD DE LA SEÑAL Y PROPIEDADES DEL MATERIAL

La amplitud de la onda registrada por una antena depende de la distancia recorrida, de los coeficientes de reflexión y de refracción asociados a los contactos que ha atravesado durante su propagación, de la absorción del medio y de la dispersión

producida a lo largo de su trayectoria. La energía de una onda es proporcional al cuadrado de la amplitud registrada. La atenuación relacionada únicamente con la distancia recorrida es la llamada dispersión geométrica. Relaciona la variación de energía en cada punto del frente de ondas conforme éste avanza. Los coeficientes de refracción y reflexión dependen del contraste entre los parámetros electromagnéticos del medio, principalmente de la permitividad dieléctrica relativa. Un mayor contraste equivale a un porcentaje más elevado de energía reflejada, respecto de la energía que incide en el contacto. Este efecto produce que la energía transmitida vaya disminuyendo conforme la onda atraviesa discontinuidades electromagnéticas. La dispersión se produce cuando en el medio existen reflectores cuyo tamaño es del orden de la longitud de onda de la señal. En este caso la energía incidente se disipa en diferentes direcciones, produciéndose una atenuación de la señal. La absorción del medio se produce cuando parte de la energía se transforma en calor durante la propagación de la onda. Este fenómeno está fuertemente asociado con la conductividad del medio.

El análisis de la amplitud de la onda directa puede proporcionar información, por lo tanto, acerca de características del medio. Sin embargo, no es posible separar completamente los mecanismos de atenuación. Uno de los análisis más sencillos que puede realizarse utilizando la amplitud de la señal es el relacionar la energía procedente de una primera reflexión en la superficie del medio manteniendo la antena a una cierta distancia. Este procedimiento permite estimar la permitividad dieléctrica relativa de la zona más superficial del medio. Para ello se compara la amplitud debida a la reflexión en dicha superficie (A_s) con la amplitud obtenida de la reflexión en una superficie metálica suficientemente extensa (A_M). En este segundo caso el coeficiente de reflexión es la unidad, lo que indica que la totalidad de la energía incidente es reflejada en la discontinuidad. La diferencia entre las amplitudes de la onda reflejada (figura 5), permite valorar la permitividad dieléctrica relativa:

$$\varepsilon_r = \left(\frac{A_M + A_s}{A_M - A_s} \right)^2 \quad (4)$$

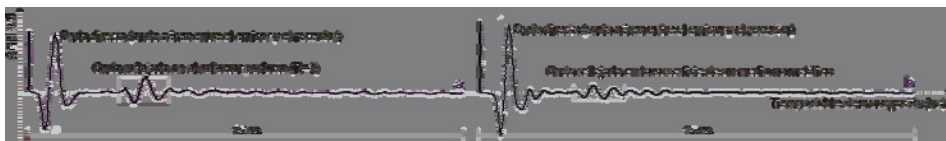


Figura 5. Trazas obtenidas situando la antena a 50 cm de un reflector metálico (a) y de la superficie de un medio no metálico (b). La relación entre amplitudes proporciona información sobre la permitividad dieléctrica del medio no metálico.

El estudio de la amplitud procedente de reflexiones internas del medio permite valorar el coeficiente de atenuación (α) asociado al mismo. Este coeficiente puede simplificarse en el caso de un medio de pequeñas pérdidas ($\sigma \ll \omega\varepsilon$), resultando

proporcional a la permitividad dieléctrica relativa, a la permeabilidad del vacío (μ_0) y a la conductividad del material (σ):

$$\alpha \approx \frac{1}{2} \sigma \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_r}} \quad (5)$$

La relación entre el coeficiente de atenuación y la conductividad indica que el primero es altamente dependiente del contenido en agua del medio. Para obtener una estimación del coeficiente de atenuación α hay que considerar también la atenuación de la amplitud (A) debida a la dispersión geométrica del frente de ondas, caracterizado por un coeficiente β que suele ser cercano a la unidad:

$$A = A_0 r^{-\beta} e^{-\alpha r} \quad (6)$$

Donde A_0 es una amplitud de referencia (amplitud inicial) y r es la longitud de la trayectoria de la onda. La figura 6 muestra la relación entre la amplitud (relativa a la amplitud de la onda directa), medida en dB, respecto del grado de saturación.

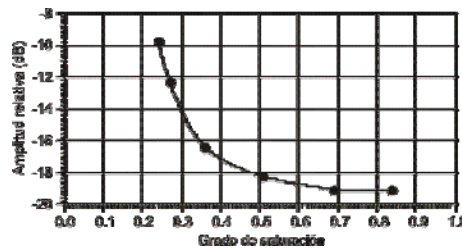


Figura 6. Relación entre la amplitud de la señal y el grado de saturación del medio.

Al calcular el coeficiente de atenuación experimentalmente mediante gráficas similares a la mostrada en la figura 6 y compararlo con el obtenido teóricamente utilizando la ecuación 5, el primero suele ser algo mayor que el segundo. Este efecto es debido a la imposibilidad de separar la atenuación debida a la dispersión y a la absorción. La ecuación 5 considera únicamente esta última, mientras que en los ensayos experimentales se obtiene el resultado de los dos efectos.

5. LA FRECUENCIA DE LA SEÑAL REGISTRADA

Los equipos de GPR que existen actualmente en el mercado generan pulsos magnéticos consistentes, habitualmente, en tres medios periodos. La frecuencia central y el ancho de banda de una señal se pueden determinar calculando su transformada de Fourier. Los medios materiales actúan, en general, como un filtro paso bajas. Pero también puede observarse experimentalmente que hay una cierta relación entre el espectro de frecuencias de la señal y el grado de saturación del medio. En la figura 7a se presentan las gráficas obtenidas en tres muestras de suelo diferenciadas en su grado de saturación.

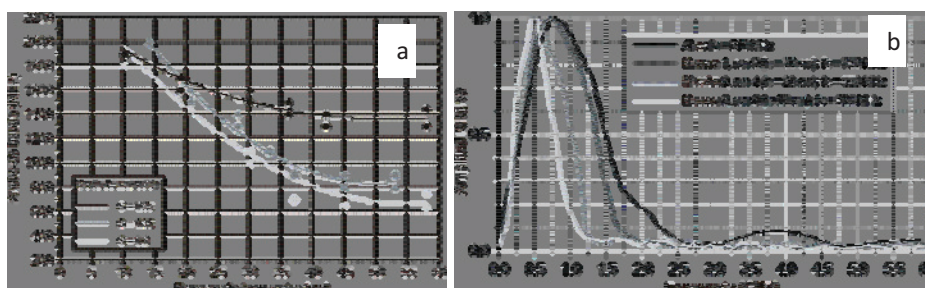


Fig. 7. (a) Relación entre el ancho de banda, el espesor de la muestra y el grado de saturación. (b) Espectros de amplitud de señales obtenidas en muestras del mismo espesor.

En cada una de ellas se aprecia como el ancho de banda, medido para un decaimiento de 10 dB, disminuye al aumentar el espesor de la muestra. También se aprecian comportamientos diferentes en función del grado de saturación. Un efecto similar ocurre con la frecuencia central, que se desplaza hacia las bajas frecuencias al aumentar la profundidad de la muestra. Este efecto es proporcional al contenido de agua de dicha muestra. Tanto el efecto sobre el ancho de banda como sobre la frecuencia central se puede observar en los espectros de amplitud dibujados en la gráfica de la figura 7b. Estos espectros se han obtenido para señales registradas en muestras del mismo espesor pero con distinto contenido de agua. El desplazamiento hacia las bajas frecuencias es relevante en los registros sobre muestras con mayor grado de saturación. Lo mismo ocurre con el estrechamiento de la banda de frecuencias de la señal. Sin embargo, el trabajar con frecuencias tiene una dificultad asociada: es difícil separar las contribuciones frecuenciales que provienen de diferentes reflectores y de de otras fuentes emisoras.

6. CONCLUSIONES

El radar de subsuelo es un método de estudio no destructivo que puede utilizarse como apoyo en estudios estructurales. Permite situar en el interior del medio zonas anómalas e, incluso, definir aproximadamente la geometría de las mismas. Sin embargo ésta no es la única información que puede proporcionar, ya que el estudio exhaustivo de la señal permite inferir características y propiedades del medio analizado. El parámetro físico que afecta en mayor medida a la señal de radar es el contenido en agua. Es posible, por lo tanto, realizar una estimación del grado de saturación de un medio únicamente analizando las señales registradas con un radar de subsuelo. Sin embargo, se trata de una medida indirecta, por lo que no es posible realizar valoraciones exactas. Por otro lado, los parámetros obtenidos con GPR deben aplicarse a un modelo. Los ensayos muestran una buena correspondencia entre los datos experimentales y los obtenidos en dos modelos, sobre todo para contenidos de agua por encima del 0.25.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se ha financiado parcialmente con el proyecto CGL-2008-00869/BTE del Ministerio de Ciencia y Tecnología de España.

7. REFERENCIAS

- [1] D.B. Apel, V. Dzelic: "Evaluation of high frequency ground penetrating radar (GPR) in mapping strata of dolomite and limestone rocks for ripping technique", *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment* 19(4), 2005, 260 – 275.
- [2] V. Perez-Gracia, O. Caselles, J. Clapés, R. Osorio, J.A. Canas, L.G. Pujades: "Radar exploration applied to historical buildings: A case study of the Marques de Llió palace, in Barcelona (Spain)", *Engineering Failure Analysis* 16, 2009, 1039–1050.
- [3] H. Lorenzo, V. Cuéllar, M.C. Hernández: "Close range radar remote sensing of concrete degradation in a textile factory floor", *Journal of Applied Geophysics* 47, 2001, 327–336.
- [4] [4] V. Perez-Gracia, F. Garcia Garcia, I. Rodríguez Abad: "GPR evaluation of the damage found in the reinforced concrete base of a block of flats: A case study", *NDT&E International* 41, 2008, 341–353.
- [5] V. Perez-Gracia, J.A. Canas, L.G. Pujades, J. Clapés, O. Caselles, F. García, R. Osorio: "GPR survey to confirm the location of ancient structures under the Valencian Cathedral (Spain)", *Journal of Applied Geophysics* 43, 2000, 167–174.
- [6] G. Barone, C. Branca, S. Gresta, S. Imposa, A. Leone, D. Majolino: "Geoarcheometric and geophysical methodologies applied to the study of cultural heritage: "St. Agata la Vetere" in Catania (Sicily, Italy)", *Journal of Cultural Heritage* 5, 2004, 263–271.
- [7] M. Solla, H. Lorenzo, F.I. Rial, A. Novo: "GPR assessment of the medieval arch bridge of San Antón, Galicia, Spain", *Archaeological prospection* 17, 2010, 223-232.
- [8] D. Goodman, Y. Nishimura, J.D. Rogers: "GPR Time Slices in Archaeological Prospection", *Archaeological Prospection* 2, 1995, 85-89.
- [9] S. Hubbard, K. Grote, Y. Rubin: "Mapping the volumetric soil water content of a California vineyard using high-frequency GPR ground wave data", *The Leading Edge* 21, 2002, 552–559.
- [10] G.C. Topp, J.L. Davis, A.P. Annan: "Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines", *Water Resources Research* 16, 1980, 574-582.