

USOS Y APLICACIONES DE EQUIPO DE RADAR DE PENETRACIÓN (GPR) EN EL ÁMBITO DE LA INGENIERÍA CIVIL. MODELOS PRÁCTICOS Y NUMÉRICOS PARA INTERPRETACIÓN DE SEÑALES

USES AND APPLICATIONS OF GROUND PENETRATING RADAR (GPR) IN THE AREA OF CIVIL ENGINEERING. PRACTICAL AND NUMERICAL MODELS FOR THE INTERPRETATION OF SIGNALS

Martín A. Cedolini^a, Ricardo D. Quinteros^{a, b}

^aFacultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, Salta, Argentina,
martinalejandrocedolini@gmail.com, <http://www.ing.unsa.edu.ar>

^b INIQUI-CONICET. Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, Salta, Argentina,
rdquinteros@ing.unsa.edu.ar, <https://salta-jujuy.conicet.gov.ar/iniqui/>

Palabras clave: Georadar, GPR, Radar de Penetración, Modelos Numéricos, Señales.

Resumen. La técnica del georadar o Radar de penetración terrestre (GPR *Ground Penetrating Radar* por sus siglas en inglés) consiste en un método de prospección no destructivo con una amplia aplicación en diversas áreas de ciencias tales como la arqueología, geología, ingeniería, agronomía, geofísica, etc. En el área de la Ingeniería Civil, se destaca su uso en la inspección y diagnóstico de diversas estructuras de edificación, materiales de la construcción y suelo entre otros. Su principio general se basa en la transmisión de ondas electromagnéticas en cierto rango de frecuencia en los materiales que son reflejadas en las superficies donde existe un contraste dieléctrico. La respuesta del material, constituida por esas ondas reflejadas, es registrada procesada y analizada con el propósito de caracterizar y estudiar el medio de propagación. En el presente trabajo se detallan los múltiples usos y aplicaciones de esta técnica en el área de la Ingeniería Civil, con ejemplos prácticos producto de trabajos de campo con mediciones de diversas tipologías estructurales y materiales. En el mismo sentido, se presenta una herramienta numérica tendiente a la interpretación automática de las señales obtenidas con el propósito de optimizar el análisis de las muestras relevadas.

Keywords: Radar, GPR, Numerical Models, Signals.

Abstract. The Ground Penetrating Radar (GPR) technique consists of a non-destructive prospecting method with wide application in various areas of science such as archaeology, geology, engineering, agronomy, geophysics, etc. In the area of Civil Engineering, it stands out the use in the inspection and diagnosis of various building structures, construction materials and soil, among others. Its general principle is based on the transmission of electromagnetic waves in a certain frequency range in materials that are reflected on surfaces where there is a dielectric contrast. The response of the material, constituted by these reflected waves, is recorded, processed and analyzed with the purpose of characterizing and studying the propagation medium. In the present work, the multiple uses and applications of this technique in the area of Civil Engineering are detailed, with practical examples resulting from field work with the detection of various structural and material typologies. It is also presented a numerical tool aimed at the automatic interpretation of the signals obtained with the purpose of optimizing the analysis of the relevant samples.

1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA TÉCNICA DE GPR

El radar de subsuelo o georadar (*Ground Penetration Radar*, GPR) es un método de prospección geofísico basado en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas (EM), por lo que su funcionalidad es similar a la de un radar convencional aunque enfocado en un medio sólido el cual por lo general presenta una heterogeneidad o discontinuidad marcada que producen fenómenos de onda como refracción, reflexión y difracción, que son detectados por la antena receptora. Estas discontinuidades son cambios bruscos de los parámetros electromagnéticos, es decir, conductividad, permitividad eléctrica y permeabilidad magnética, todas relacionadas entre sí, por lo que sólo se define la permitividad dieléctrica al momento de la adquisición de datos, autodefiniéndose los restantes parámetros.

El equipo de georadar usado en este trabajo es el SIR-3000 fabricado por *Geophysical Survey Systems, Inc.* el cual se compone tres partes (Figura 1).

Antena: Compuesta por el emisor y el receptor de las ondas EM. Existen diferentes tipos de



Figura 1: Equipo SIR-3000 de GSSI

antenas, en función a su frecuencia media. Dependiendo de la profundidad del estudio que se quiera realizar se seleccionará la antena con la frecuencia adecuada, a mayor frecuencia menor profundidad y viceversa. Las altas frecuencias van en demérito de la profundidad, favoreciendo la resolución, de mayor importancia cuando se requiere identificar objetos, inclusiones, fallas u otras anomalías superficiales en el medio; las bajas frecuencias nos permiten analizar lechos de mayor profundidad, pero desfavoreciendo la resolución del radargrama.

Odómetro: Es el encargado de marcar la distancia recorrida enviando su señal a la unidad central lo que permite establecer en qué momento la antena debe enviar un pulso de onda al medio. Se calibra sólo una vez para cada antena. Dependiendo el tipo de antena, el odómetro se encuentra adherido en una de las ruedas del carro o bien se acopla a la misma.

Transductor: Unidad de control, es el corazón del sistema; configura la adquisición de datos, gestiona las antenas y da salida a los datos adquiridos durante las campañas de medición.

Los parámetros electromagnéticos de un material, al ser atravesado por una onda EM, son los que definirán el medio, siendo ellos: la conductividad eléctrica σ , la permitividad dieléctrica ϵ (constante dieléctrica para el georadar) y la permeabilidad magnética μ . La permitividad dieléctrica relativa es una constante adimensional que nos da una medida de la capacidad de polarización de un material en la presencia de un campo eléctrico. Sus valores están comprendidos entre el mínimo ($\epsilon_r = 1$) del aire y el máximo ($\epsilon_r = 81$) del agua. En la Tabla N°1 se pueden apreciar los valores del parámetro para diversos materiales:

Material	Cte. dieléctrica (ϵ_r)	Material	Cte. dieléctrica (ϵ_r)
Aire o vacío	1	Mármol	8
Caucho	3	Cenizas Volcánicas	13
Plexiglás	3-4	Arena Saturada	25
Arena Seca - Arcilla	4	Glicerina	50
Vidrio	4-7	Turba	61.5
Concreto	5.5	Agua	81

Tabla 1. Constante dieléctrica para distintos materiales

1.1 ESTUDIO DE ANTECEDENTES

Este método es ampliamente utilizado en investigaciones arqueológicas para confirmar la información histórica disponible (Pérez-García et al, 2008), analizar las condiciones de las estructuras originales de valor patrimonial (Tallini et al, 2004), o detectar elementos de los

que no se dispone de información alguna (tumbas, cañerías, etc.)(García et al, 2007).

Análisis más exhaustivos (Zanzi & Arosio, 2013 y Mechbal & Khamlichi, 2017) permiten identificar diámetros de barras de refuerzos en estructuras de H°A° a través de herramientas numéricas utilizando radargramas de mediciones realizadas in-situ como archivos de entrada.

Esta técnica es de gran utilidad en estudios geofísicos, sus aplicaciones desde geología y sedimentología, caracterización e hidrología de acuíferos, minería, problemas geotécnicos y ambientales, además de agricultura, detección de artefactos e incluso investigaciones forenses, demuestran la multiplicidad de uso y adaptabilidad de la técnica.

Su uso se muestra como una herramienta útil para apoyar el diagnóstico en rehabilitación de daños en estructuras producto de desastres naturales como terremotos y deslizamientos de tierra (Pueyo-Anchuela et al, 2010).

Es posible su utilización para la medición de espesores de diversos tipos de pavimentos ya sean flexibles, pavimentos semirrígidos, pavimentos rígidos hechos de hormigón, o adoquinados para peatones. También se extiende a la detección de anomalías como grietas, huecos, infiltración de agua (Venmans et al, 2016).

En el caso de puentes, su uso se basa principalmente en la etapa post-constructiva. Se requiere a menudo una inspección cuando se ven grietas, corrosión de las barras de refuerzo y fugas de agua (Kosno et al, 2016).

Resulta útil también para inspeccionar diferentes tipos de revestimientos en túneles, como H° no reforzado, H°A°, revestimiento con H° proyectado e incluso ladrillo, detectando discontinuidades, vacíos o espacios con lechada entre el hormigón y la pared rocosa (Li et al, 2011). El mayor problema en túneles para el uso de la técnica es la difícil accesibilidad o la interrupción del tráfico, la instalación de los sistemas de antena en la pared del túnel o los techos del túnel y la obstrucción de cables y conductos a lo largo del mismo.

1.2 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE SEÑALES

1.2.1 ELECCIÓN DE LA ANTENA

Previo a cualquier análisis resulta fundamental la elección de una antena adecuada. Antenas de entre 200 a 400 MHz son utilizadas principalmente para detección y mapeo de tuberías de servicios, detección de vacíos, para determinar la ubicación de fundaciones poco profundas y aplicaciones arqueológicas (Rango 0-9m). Entre 900 a 1600 MHz tenemos antenas multiuso de alta resolución que se utilizan principalmente en muros anchos y contrapisos para evaluar su condición e inspeccionar estructuras de hormigón (Rango 0-1m). Antenas entre 2,3 y 2,6 GHz se utilizan para inspeccionar estructuras de concreto y para ubicar varillas de refuerzo, cables de postensado y conductos (Rango 0-60 cm).

1.2.2 DETERMINACIÓN DEL DIELECTRICO EN EL MEDIO ANALIZADO

Si bien existen tablas que relacionan directamente un rango de valores para determinados materiales, se recomienda realizar un análisis previo (González-Drigo et al 2008).

Una manera efectiva resulta buscando superficies de espesor conocido, y luego utilizando el equipo (sin ser necesario establecer una constante de dieléctrico), se obtiene el tiempo en nanosegundos que le toma a la onda electromagnética atravesarlo. Ordenando los datos obtenidos es posible determinar la velocidad promedio que le toma a la onda atravesar el material en estudio y mediante la siguiente expresión se determina la constante ε buscada:

$$\varepsilon = \frac{c^2}{v^2} \quad (1)$$

con $c = 2,99792458$ cm/ns (velocidad de propagación de la onda EM en el vacío).
 $v =$ velocidad promedio calculada.

2 FORMULACIÓN DE HERRAMIENTA NUMÉRICA PARA INTERPRETACIÓN DE SEÑALES.

Entre las ventajas de la técnica del GPR podemos señalar el reducido tiempo que demora realizar el ensayo, la posibilidad de realizar las mediciones sin siquiera apoyar el equipo sobre la superficie (útil cuando existe algún tipo de pintura o grabado que se pretende conservar) y es relativamente económica en comparación con otras técnicas no destructivas. Sin embargo se pueden identificar también algunas desventajas tales como la limitación con las antenas y su necesidad de adquirir alguna específica para ciertas profundidades, la imposibilidad en la mayoría de los casos de tener resultados precisos inmediatos (previo al filtrado de las señales), la limitada oferta de software comerciales o libres. Por otro lado, el correcto procesamiento para garantizar conclusiones categóricas, requiere mucha experiencia y criterio del usuario. Respecto a este último punto se planteó desarrollar un software independiente que sea capaz de leer los archivos que genera el equipo y una vez obtenida toda la información, permita un dominio total de los datos desarrollando algoritmos que den respuesta de forma autónoma en diferentes problemas, eximiendo de esta manera al usuario del procesamiento de señales.

2.1 FORMULACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE MODELO NUMÉRICO.

En primera instancia se investigó la existencia de software gratuitos que brindaran la libertad de acción buscada. Entre ellos se encuentran *GPRPy-master* y *Readgssi-master*, ambos de código abierto y escritos en lenguaje Python, los cuales sí permiten la exportación de los datos, aunque aún sujetos a la capacidad del usuario para aplicar distintos filtros.

Es por ello que se optó por desarrollar un software independiente, haciendo uso de la información de decodificación de archivos suministradas por los programas antes citados y su formulación y programación se presenta en este trabajo. El software se escribió en C# debido a su potencia como lenguaje y su flexibilidad y utilizando además WPF (*Windows Presentation Foundation*), que consiste en una serie de ensamblados y herramientas del framework .NET. destinado a proporcionar una API (*Application Programming Interface*) para crear interfaces de usuario para Windows.

2.1.1 DECODIFICACIÓN

Los archivos a decodificar tienen una extensión *.dzt*, donde el primer *kilobyte* es utilizado para indicar distintos aspectos relevantes de las mediciones como por ejemplo tipo de antena, permitividad dieléctrica, tiempo entre muestras, distancias entre muestras, ubicación de GPS (si lo hubiera) entre muchos otros.

En adelante cada uno de los siguientes *kilobytes* registra el retorno de las ondas emitidas por el emisor de la antena, a mayor tiempo la demora mayor la profundidad de exploración.

Cada valor detectado es almacenado cifrado en dos *bytes* y agrupados mediante el formato *Little-endian* a modo de ocupar el menor espacio posible, luego el rango de valores detectables posibles va de 0 a 216 (Figura 2).

2.1.2 INTERFAZ GRÁFICA

Una vez cargados, leídos y decodificados los archivos se seleccionan problemas propios de la ingeniería civil que fueran susceptibles a ser resueltos de forma autónoma. Por ello, a modo de ejemplo de aplicación de la técnica y de esta herramienta, se presentarán dos algoritmos.

Se diseñó una interfaz que permitiera al usuario con relativamente pocas operaciones obtener los resultados buscados. Se define un campo de muestra donde se puede apreciar una imagen de lo registrado, un campo de información donde se indican los metadatos de las

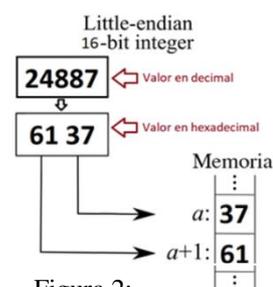


Figura 2:
Codificación de datos.

mediciones, un campo de resultados donde se indican las características y/o porcentajes (según corresponda) a los que se arribó tras el procesamiento, y dos campos con comandos relacionados con cada uno de los algoritmos a detallar (Figura 3).

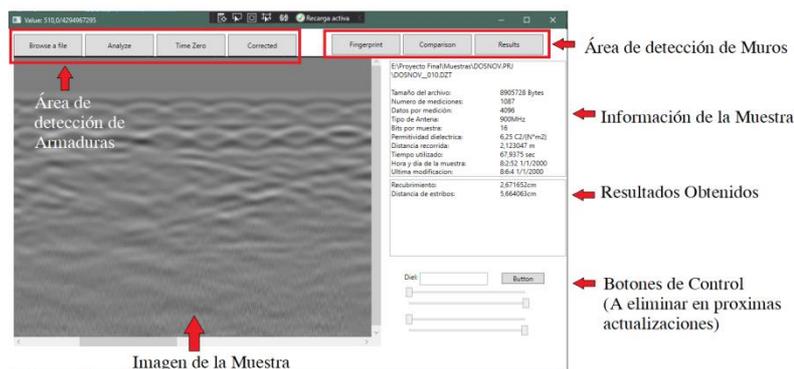


Figura 3. Muestra de la Interfaz Gráfica del programa

2.1.3 DETERMINACIÓN DEL ARMADO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES.

Algoritmo capaz de detectar armaduras y características geométricas de elementos estructurales tales como vigas, columnas o losas/tabiques de hormigón armado.

Existen múltiples factores que influyen en la atenuación de las ondas, con lo que a medida que la onda se adentra a mayor profundidad en un medio aproximadamente homogéneo como el hormigón el registro de energía captado es menor. Si ahora consideramos a las refracciones y reflexiones propias del radar de penetración, se observa que las ondas al encontrarse con un medio de características muy diferentes, como por ejemplo el acero de las armaduras, este actúa como un reflector y una buena parte de la energía es devuelta en forma perpendicular a la superficie del material reflectante, entonces podemos decir que el registro de energía en la frontera entre los dos materiales aumenta significativamente.

Partiendo de la base de las pérdidas de energía debidas a las reflexiones, que se producen ante la presencia de un elemento con diferente constante dieléctrica, se planteó realizar un análisis vectorial entre los registros verticales. De un registro tomado a una columna de hormigón armado, en la Figura 4a se muestra de manera esquemática (para cada una de las barras de acero) lo que se espera encontrar, y en la Figura 4b lo que se puede apreciar de la medición. Es posible definir aproximadamente el lugar donde termina el ruido y comienza el hormigón de recubrimiento (TimeZero), simplemente delimitando la profundidad en la que más del 95% de los vectores apuntan hacia la misma dirección.

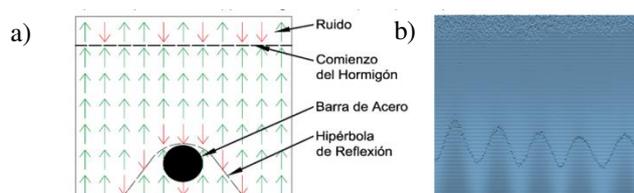


Figura 4: Comportamiento vectorial de los registros en profundidad a) Teórico b) Real.

Determinación de la Separación de Estribos: Partiendo en profundidad de la línea que delimita al ruido del material estudiado y almacenada la posición del vector que cambia su dirección, es posible definir la Hipérbola de Reflexión generada por la armadura colocada perpendicular al paso del radar (en el caso de las columnas y vigas serían los estribos). Finalmente seleccionando los puntos máximos quedan definidas las posiciones más extremas de las armaduras, y por tanto su separación (determinada a partir de la mediana de las separaciones entre los estribos colindantes).

Estimación del Recubrimiento y Diámetro de las Armaduras: Es posible determinar el recubrimiento calculando la media de la posición de los estribos en profundidad y restando la profundidad al TimeZero; finalmente haciendo el producto con la relación de distancia por mediciones (dato *seteado* por el usuario al realizar la medición y almacenado en el primer *kilobyte* del archivo) se obtiene el recubrimiento buscado en metros.

Consideremos un objetivo circular con centro C y radio r . El punto P de abscisa x es el punto de observación de la fuente ubicado a la distancia $d = |PQ|$ desde la superficie objetivo, H de abscisa x_0 es el punto entre fases a la distancia mínima $d_0 = |HA|$ desde la superficie del objetivo, es decir, cuando la antena está justo encima de la barra de refuerzo. Esta distancia representa la profundidad de la barra de refuerzo que es equivalente a la cubierta de hormigón (Figura 5). En la misma figura se ilustra la correspondiente hipérbola, donde el eje t es el eje transversal, S es su centro con coordenadas $(x_0, -2r/v)$. La distancia $a = t_0 + 2r/v$, es el semieje menor paralelo al eje t , mientras que la distancia $b = vt_0/2 + r$, es el semieje mayor paralelo al eje x . La coordenada del foco inferior de la hipérbola F está en $(x_0, \sqrt{(a^2+b^2)})$.

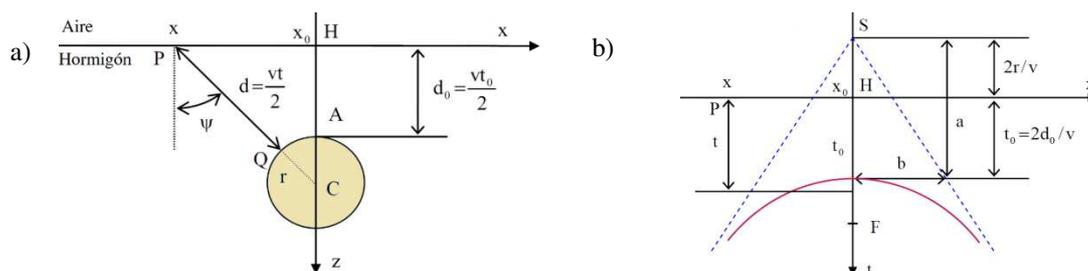


Figura 5: a) Características geométricas de una barra de refuerzo embebida en hormigón y b) Características de la hipérbola de deflexión de un objetivo circular

Es posible calcular el diámetro de las armaduras a partir de la hipérbola de reflexión obtenida, que responde a la siguiente ecuación (Persico, 2014):

$$\frac{\left(t + \frac{2r}{v}\right)^2}{\left(t_0 + \frac{2r}{v}\right)^2} - \frac{(x - x_0)^2}{\frac{v^2}{4}\left(t_0 + \frac{2r}{v}\right)^2} = 1 \quad (2)$$

Despejando el radio se obtiene un polinomio de grado cuatro y para su resolución se programó un algoritmo utilizando el método de Ferrari que transforma la ecuación en un polinomio de grado tres (denominada ecuación cúbica resolvente), y es resuelto finalmente mediante el método de Cardano (Cardano, 1545). El algoritmo se utilizó con cada punto de la hipérbola de deflexión obtenida, y se observó que las raíces de la ecuación cúbica resolvente siempre tienen una única raíz real, y las raíces de la ecuación de grado cuatro siempre presentaron dos soluciones reales, una positiva y la otra negativa; y por consiguiente las restantes dos raíces son complejas conjugadas. De este modo adoptando la única raíz real positiva fue posible determinar el diámetro de las barras.

2.1.4 DETERMINACIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE MAMPOSTERÍA.

Algoritmo que utiliza una base de datos de tipos de muros conocidos y busca contrastar con un muro objeto de estudio estableciendo un porcentaje de similitud con dicha base.

Para desarrollar este algoritmo se utilizó de base el utilizado por la aplicación *Shazam* (Li-Chun Wang, 2013) que permite identificar canciones en un corto período de tiempo incluso con significativos niveles de ruido, en presencia de voces, sonido de vehículos, o incluso en presencia de otras músicas. Se optó por adoptar la misma metodología porque los radargramas generados en muros presentan un patrón o huella que tienden a repetirse, similar a lo que ocurre con los espectrogramas de las canciones. Este método consiste en almacenar en una base de datos la información más representativa de las mediciones en muros (llamada huella) disponiendo de todas sus características, como ser tipo de ladrillo, espesor, presencia de revoque y dirección de análisis (horizontal o vertical). Una vez obtenida la base de datos, se busca determinar la huella de un muro del cual se desconocen sus características, para luego contrastar con las huellas almacenadas en la misma, calculando un porcentaje de afinidad, indicando así cuales son las características más probables del muro analizado.

Generación de la Constelación de Puntos y de la Huella: En primer lugar se realiza un mallado de la matriz de puntos, identificando los puntos máximos, puntos en los que se haya obtenido una mayor intensidad de señal reflejada por cada sector de la malla (constelación de puntos máximos, Figura 6a).

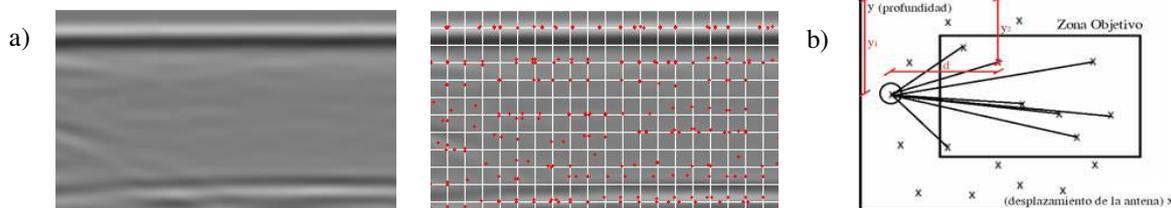


Figura 6: a) Radargrama de un muro de ladrillo macizo de 20cm de espesor. Muestra original sin alteraciones (izquierda). Determinada la constelación de puntos máximos (derecha). b) Huella del muro

Al intentar comparar la coordenada de los puntos máximos de dos muestras de muros, resulta poco probable obtener coincidencias muy significativas, debido a que una medición puede comenzar en cualquier parte del muro, justo sobre el mortero o el propio mampuesto, por lo que si en lugar de tomar la coordenada en la dirección de desplazamiento de la antena, se toma la diferencia (en esta dirección) de cada punto con relación a los puntos más cercanos, se lograría independizar al resultado de la posición de comparación inicial. Entonces la huella consiste en un conjunto de tres valores (d, y_1, y_2) entre un determinado punto, con relación a todos los puntos de una zona cercana denominada zona objetivo (Figura 6b). Al disponer de la huella de la muestra analizada y la de un determinado muro conocido, se realiza la comparación y suma de las coincidencias simultaneas de los tres valores indicados, asociando la suma total de las coincidencias al intervalo definido en el mallado inicial.

Separación Horizontal y Vertical del Mallado: La separación del mallado tanto en el eje vertical como el horizontal resultaron ser las variables más complejas de definir, esto se debe a que una separación muy grande implica una pérdida en los detalles que caracterizan a cada muro; pero separaciones muy pequeñas, implican un aumento exponencial en la cantidad de información a procesar, ralentizando significativamente el proceso de comparación. Se procedió entonces por tanteo a definir un par de valores para el mallado, con los cuales el tiempo de procesamiento sea inferior a 2 minutos y que los resultados aún mantengan una correlación marcada entre dos muros de las mismas características. Para cada tipo de muro se obtuvo su correspondiente huella o patrón, respetando el mallado indicado, y conformado una base de datos a partir de la cual se pueda comprobar la efectividad del método para diferentes mediciones que se pretendan estudiar.

Cálculo de la compatibilidad: Para poder interpretar cuan parecida es la huella de una muestra estudiada, con relación a la huella almacenada para cada muro en la base de datos, debemos entender que es necesario que coincidan exactamente una tripla de valores sin importar el orden, y sin importar si las mismas se repiten (es posible almacenar la misma tripla de valores porque los patrones en los muros se tienden a repetir). Entonces la expresión para calcular el número de combinaciones necesarias que se deben dar para lograr el 100% de compatibilidad lo define el binomial:

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k! * (n - k)!} \quad (3)$$

con n : total de triplas en la huella del elemento estudiado y k : total de triplas en la huella almacenada en la base de datos de cada muro.

Finalmente, la probable compatibilidad de la muestra (P) con cada elemento en la base de datos lo define la siguiente expresión:

$$P = \frac{M * (k! * (n - k)!)}{n!} * 100\% \quad (4)$$

donde M representa el número total de coincidencias encontradas.

En las pruebas de calibración, en todo momento el software fue capaz de detectar correctamente el material, incluso la dirección en la que se realizó la prospección, fallando únicamente al detectar la ausencia de revoque. Esto puede deberse a que la capa que representa al revoque resulta muy delgada (muy pocas filas de datos) para generar los suficientes patrones de huellas que caractericen su presencia o ausencia. Sin embargo se requiere de mayor investigación, los primeros resultados fueron satisfactorios cuando se contrastan en un gráfico, pero las inconsistencias asociadas al valor obtenido de compatibilidad calculada pueden implicar que se requiera calcular otro parámetro de análisis.

3 EJEMPLOS DE APLICACIÓN

A modo de ejemplificar el uso de la técnica presentada en el presente trabajo, se realizaron ensayos en una serie de elementos estructurales y de cerramiento, con el fin de poder determinar su composición, definir sus propiedades geométricas, determinar patologías tales como humedad, armaduras en el H°A° y discontinuidades en general, etc. Para ello se hizo uso de un software comercial (Radan 7) y del programa de modelado numérico presentado en el capítulo anterior (en caso de ser aplicable).

A efectos de validar la herramienta numérica, se efectuaron mediciones en piezas (viga y columna) de H°A° realizadas por el equipo de laboratorio ICMASa (Instituto de Ingeniería Civil y Medio Ambiente Salta) de la UNSa. Se tomaron todas las muestras pertinentes y conociendo los detalles estructurales de las piezas para la calibración y haciendo uso de Radan 7 y de la herramienta objeto de este trabajo se muestran en la Tabla 2 los siguientes resultados al calcular el diámetro y separación de estribos y recubrimiento de armadura:

	Columna H°A°				Viga H°A°			
	Valor real [cm]	Valor obtenido [cm]	Error Absoluto [cm]	Error Relativo [%]	Valor real [cm]	Valor obtenido [cm]	Error Absoluto [cm]	Error Relativo [%]
Recubrimiento	2.00	2.33	0.33	16.50	3.00	3.27	0.27	9.00
Separación de Estribos	6.00	5.66	0.37	6.17	20.00	19.75	0.25	1.25
Diámetro de Estribos	0.60	0.59	0.01	1.67	0.60	0.59	0.01	1.67

Tabla 2. Comparación de resultados obtenidos en piezas estructurales de laboratorio

Para la elaboración de este trabajo se realizaron diversas campañas de relevamiento a los fines de perfeccionar la técnica del georradar y evidenciar sus amplias prestaciones. Se estudió una losa reactiva presente en el laboratorio del ICMASa a fin de cotejar la armadura detectada con los planos correspondientes; se llevó a cabo un análisis de muros de contención de un túnel ferroviario del ramal C-14 del norte argentino, pretendiendo determinar el espesor real de los muros, existencia de algún tipo de armadura y en caso de ser posible, patologías como grietas o presencia de humedad. Se estudiaron pozos romanos de casi 6 m de profundidad, en una escuela en construcción tratando de identificar y confirmar el ensanchamiento de las puntas de los mismos; se efectuó un análisis en un edificio de valor

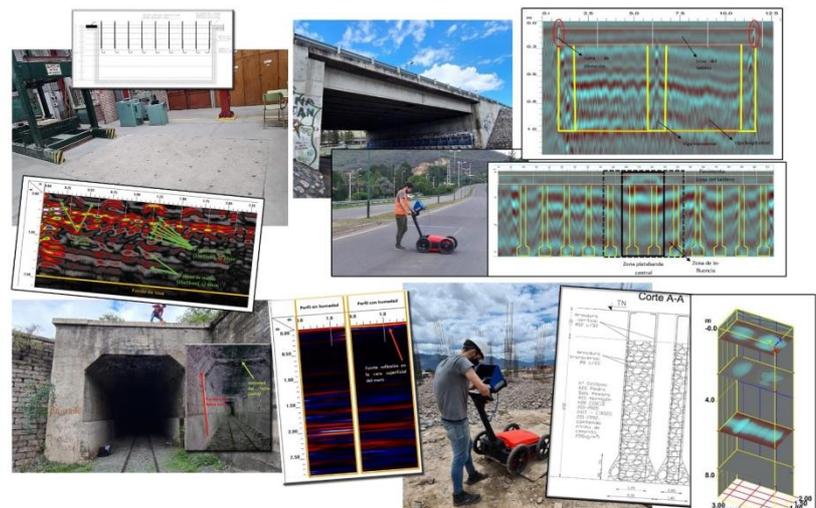


Figura 7. Aplicación GPR, en sentido horario: Losa reactiva en laboratorio, Puente en acceso ciudad Salta, Pozo Romano en obra, Túnel Ferroviario.

patrimonial de la ciudad de Salta (Iglesia la Viña) con el propósito de estudiar el contenido de humedad de los muros y de esta forma verificar el correcto funcionamiento de un sistema electro-físico de control de humedad instalado (Gea et al, 2014). Se llevó a cabo un estudio sobre un puente de dos trochas correspondiente al acceso norte de la capital salteña, con el propósito de verificar dimensiones y armado de vigas pretensadas y losa del tablero y detectar posibles imperfecciones. Debido a las limitaciones de extensión de este trabajo, nos centramos en la verificación y validación de datos obtenidos de manera experimental y cotejados con la herramienta numérica desarrollada, por ello no se ahondará en el detalle de lo anterior pero parte de los registros y campañas pueden apreciarse en la Figura 7.

Finalmente, y para poner a prueba el algoritmo de identificación de muros, dando muestra de lo útil que puede resultar su utilización en el relevamiento de edificios antiguos y de alto valor patrimonial, se muestran los resultados obtenidos en el relevamiento del Cabildo de Salta. En este marco, se pretendió determinar los materiales y sistemas constructivos en el edificio. El estudio consistió en relevar y analizar las fuentes documentales existentes complementadas con relevamientos in-situ en zonas donde se conocían las características del muro y en algunos donde no existía registro ni documentación alguna; seguido de mediciones (radargramas) in-situ y posterior análisis e integración de la información obtenida. Como resultado, se logró la identificación de diversos materiales bajo de los revoques, muchos de ellos indistinguibles a simple vista: piedra, adobe, ladrillo cerámico macizo y refuerzos estructurales de madera y de hormigón armado.. Se utiliza la herramienta numérica introduciendo además una normalización entre los resultados obtenidos, con el fin de anular discrepancias. Se identificaron y separaron los radargramas correspondientes a sectores donde hubiera información disponible y en los cuales el dieléctrico encontrado fuera concordante con el espesor real de los muros, generando de esta manera una base de datos en función del tipo de material (haciendo una diferenciación en caso de haber una cámara de aire en ladrillos cerámicos macizos). Luego se generó la huella de los muros ubicados en la planta alta cuya tipología era desconocida, con el fin de observar y determinar cuál es su mayor compatibilidad probable, (Figura 8).

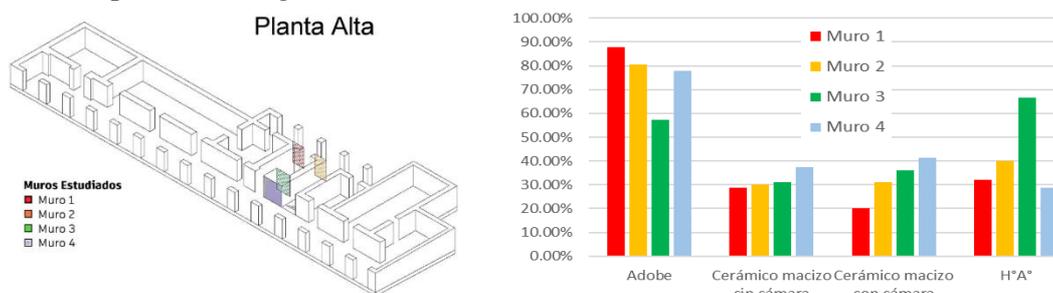


Figura 8: Vista en planta de los muros analizados en la planta alta y porcentaje de compatibilidad.

Se encontró en la mayoría de los casos que el material del que estaban compuesto era adobe, solo el Muro 3 marcó un máximo en H°A°, en efecto en los radagramas se observan reflexiones hiperbólicas por intrusiones de armadura o de algún material con elevada constante dieléctrica. En un análisis posterior se encontró que efectivamente existe H°A° en el muro analizado, esto se debe a que fue requerido realizar un refuerzo en la torre central para la escalera; resultando acorde con la transición abrupta de materiales antes mencionada.

4 CONCLUSIONES

La técnica del radar de penetración de terreno pudo mostrar su aplicabilidad en múltiples elementos tanto estructurales, como de cerramiento; brindando información útil tanto a profundidades mayores a seis metros, como en elementos de espesores reducidos menores a

veinte centímetros. Si bien su uso efectivo requiere preferiblemente de varios accesorios (distintas antenas, odómetro, accesorios de manipulación y transporte, etc.), resulta costeable para empresas e instituciones ya que pueden ser adquiridos en el país, por cualquiera de los representantes oficiales de las distintas marcas disponibles. La técnica no cuenta con insumos desechables más allá de la batería, requiriendo únicamente de una fuente de energía eléctrica para recargar las mismas, por lo que implica una alta relación costo/beneficio.

Una de las limitantes más destacadas resulta ser la necesidad de capacitar a mano de obra encargada de la manipulación del equipo pero sobre todo del tratamiento de las señales de los radargramas, dificultad que puede ser salvada mediante cursos de capacitación brindados por entidades nacionales, o bien siguiendo el manual brindado por la empresa origen, resultando en un aprendizaje mucho más lento.

A lo largo de este trabajo se buscó abordar la posibilidad de automatizar los procesos de filtrado, permitiendo reducir los tiempos de aplicación de la técnica. Si bien solo se plantearon dos algoritmos, los resultados fueron prometedores, mostrando que tal vez sea aplicable a todo el amplio espectro de posibilidades que esta técnica promete. Destacando los trabajos que actualmente se están desarrollando en el mundo utilizando algoritmos de *machine learning* y el *deep learning*, abocados a la misma tarea.

REFERENCIAS

- Cardano G. *Artis magna, sive de regulis algebraicis*. 1545
- García F, Ramírez M, Rodríguez I, Martínez R, Tort I, Benlloch Marco J, Montalvá JL. GPR technique as a tool for cultural heritage restoration: San Miguel de los Reyes Hieronymite Monastery, 16th century (Valencia, Spain). *Journal of Cultural Heritage* 8:87-92. 2007
- Gea S, Quinteros, R, Nallim L. Control del proceso de deshumidificación de muros con georradar. Un edificio patrimonial como caso de estudio. *ALCONPAT* 4,1: 77 – 86. (2014).
- González-Drigo R, Pérez-Gracia V, Di Capua D, Pujades LG. GPR survey applied to Modernista buildings in Barcelona: The Cultural heritage of the College of Industrial Engineering. *Journal of Cultural Heritage* 9:196-202. 2008
- Kosno Ł, Sławski Ł, Świt G. GPR investigation of flexible soil-steel bridge structure. *Procedia Eng* 156:172–9. 2016
- Li-Chun Wang, A. *An Industrial-Strength Audio Search Algorithm*. 2013
- Li C, Li M-J, Zhao Y-G, Liu H, Wan Z, Xu J-C. Layer recognition and thickness evaluation of tunnel lining based on GPR measurements. *J Appl Geophys* 73:45–8. 2011
- Mechbal Z & Khamlichi A. Determination of concrete rebars characteristics by enhanced post-processing of GPR scan raw data. *NDT & E International*. Volume 89, 2017
- Pérez-Gracia V, García F, Pujades LG, González Drigo R, Di Capua D. GPR survey to study the restoration of a Roman monument. *Journal of Cultural Heritage* 9: 89-96. 2008
- Pueyo-Anchuela Ó, Casas-Sainz A, Soriano M, Juan AP, Ipas-Lloréns J, Ansón- López D. Integrated geophysical and building damages study of karst effects in the urban area of Alcalá de Ebro, Spain. *Z. für Geomorphol. Suppl Issues* 54:2216. 2010
- Tallini M, Scozzafava M, Ranalli D. Ground penetrating radar investigations for the restoration of historic buildings: the case study of the Collemaggio Basilica (L'Aquila, Italy). *Journal of Cultural Heritage* 5:91-99. 2004
- Venmans AAM, van de Ven R, Kollen J. Rapid and non-intrusive measurements of moisture in road constructions using passive microwave radiometry and GPR – full scale test. *Procedia Eng* 143:1244–51. 2016
- Zanzi L, Diego Arosio D. Sensitivity and accuracy in rebar diameter measurements from dual-polarized GPR data. *Construction and Building Materials* 48:1293–1301. 2013