

## Comparación entre anomalías magnéticas e imágenes rádar del subsuelo. Zona Norte del Yacimiento de la Alcudia, Elche (Alicante)

### Comparison between magnetic anomalies and GPR images. North of La Alcudia site. Elche (Alicante).

Teresa Teixidó<sup>(1)</sup>, José Antonio Peña<sup>(1)</sup>, Feliciano Sala<sup>(2)</sup>, Lorenzo Abad<sup>(2)</sup> y Jesús Moratalla<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Andaluz de Geofísica. Universidad de Granada. Campus Universitario de Cartuja s/n 18071 Granada. tteixido@ugr.es

<sup>(2)</sup> Dep. de Prehistoria, Arqueología, Historia Antigua, Filología Griega i Filología Latina, Universidad de Alicante, Facultad de Filosofía i Letras

#### SUMMARY

When an archaeological site is extensive and the structures are supposed to be superficial (above of 3 metres), the most advisable geophysical prospection method is magnetic pseudo-gradient. To be explored, the North Alcudia zone was divided into 21 square sectors of 20 m by 20 m, and a potassium vapour magnetometer (GSMP-40) which absolute precision is 0.1 nT, was used. In each sector, the established distance between profiles was 1 m and the data acquisition was performed in a way, such it was obtained a sample each 10 cm (approximately). The aspects that influence the most in the interpretation of a magnetic anomalies map are the distinction between the two magnetic types (induced and remanent) materials, and the fact that the wide of these anomalies are always much bigger than the wide of the objects which produce that anomalies. In order to evaluate the detection grade provided by this kind of magnetograms, once they were obtained they, we was defined a group of areas to prospect in with GRP (SIR 200); with a 400 MHz antenna. Each area was acquired with 3D reflection methodology; that is with parallel profiles separated by 0.5 m and taking one sample each 2 cm. This work present a comparison between the results obtained with both techniques.

#### 1. INTRODUCCIÓN

La Alcudia de Elche (Alicante, España) es un yacimiento arqueológico en el que la presencia de humana se documenta desde la época neolítica, hasta el momento de la invasión musulmana; esto es, desde el cuarto milenio a.n.e. hasta el siglo VIII d.n.e., en donde los periodos más importantes corresponden a la época ibérica, romana y tardoantigua.

El yacimiento ocupa actualmente una meseta de unas 10 Ha y los trabajos arqueológicos se documentan, al menos desde el siglo XVIII. A finales del XIX, tras la aparición fortuita de la Dama de Elche, se iniciaron las excavaciones que han continuado, sin apenas interrupciones, hasta la actualidad. En 1996 el ayuntamiento de Elche y la Universidad de Alicante crearon la Fundación Universitaria de Investigación Arqueológica La Alcudia, que actualmente está llevando a cabo una modernización de las estructuras y de los métodos de actuación en el yacimiento, entre los que se incluyen las prospecciones objeto de esta comunicación.

El objetivo de la exploración geofísica ha sido la obtención de información de la potencialidad de la parte Norte del yacimiento (Figura 1). Los trabajos de campo se efectuaron en Octubre de 2005.

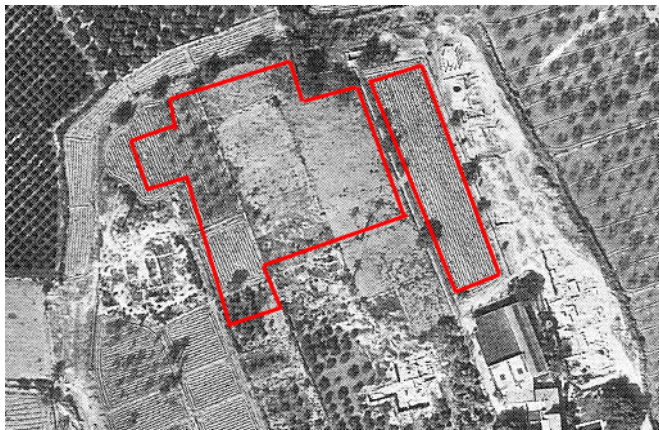


Figura 1 - En rojo, sobre la foto aérea se marca el área explorada. A su alrededor, se observan las áreas excavadas al E (la domus), las casas ibéricas al W, y al S el "foro", (cuya área excavada en la actualidad es más amplia que la mostrada en la foto). (The limits of explored zone are in red. In its round we can observe the archeological structures.)

#### 2. PROSPECCIÓN MAGNÉTICA

Dada la extensión de esta parte del yacimiento y teniendo en cuenta que las estructuras se suponen superficiales (profundidad inferior a 3 m), el método de prospección geofísica adoptado ha sido el de pseudo-gradiente magnético (Beched et al., 2001).

Para ello se ha dividido la zona de estudio en 21 sectores cuadrados de 20 m de lado y se ha usado un magnetómetro de vapor de potasio (GSMP-40 v6.0, GEM Systems, Inc) cuya precisión absoluta se sitúa en los 0.1 nT. El estaquillado se ha realizado mediante escuadra óptica, jalones y cinta métrica; y posteriormente se han calculado las coordenadas de las estacas usando un sistema GPS-RTK calibrado con las coordenadas locales (Figura 2).



Figura 2 - Unidad móvil del Equipo GPS utilizado para posicionar las estacas en el sistema de coordenadas. Consiste en una pareja de receptores bifrecuencia (Z-Max Thales Navigation, Inc). La precisión horizontal se sitúa en torno a los 2 cm y la vertical alrededor de 4 cm. (Rover of GPS equipment used for to place the stakes for the magnetic sectors).

En cada sector se ha establecido una distancia entre perfiles de 1 m y, dado que el magnetómetro está capacitado para realizar hasta 20 lecturas por segundo, se ha dispuesto de una gran densidad de datos (una muestra cada 10 cm, aproximadamente); efectuando un control del reparto de muestras mediante estaciones distribuidas en los perfiles cada 5 m.

El tratamiento de los datos de campo ha consistido en unificar los sectores, eliminar el bandeado de fondo (Peña et al. 2005), y en atenuar los spikes. En la Figura 3 se muestra el mapa de anomalías magnéticas resultante.

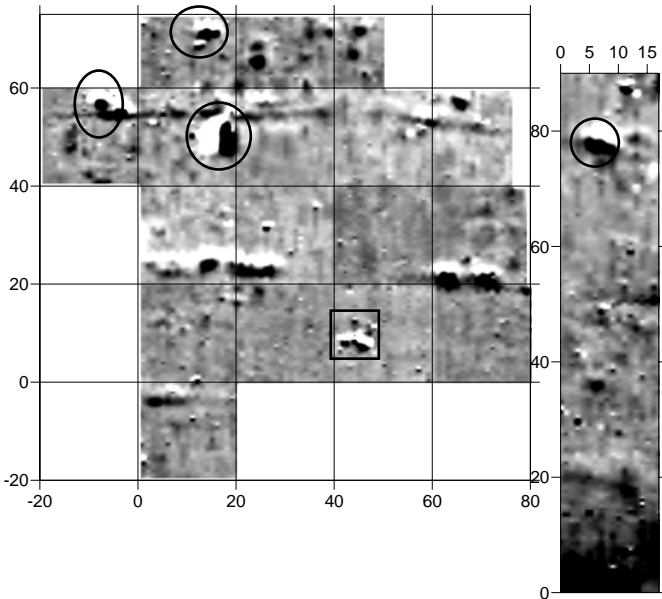


Figura 3- Mapa de anomalías magnéticas procesado. En círculos se han marcado las anomalías superiores a  $\pm 40$  nT (magnetismo remanente) y con un cuadrado la superior a  $\pm 400$  nT ¿material ferro-magnético?. (Magnetic anomalies map resulted of field data processing. With circles they are marked the remanent anomalies, majors that  $\pm 40$  nT, and the squared, is a ferro-magnetic material? major that  $\pm 400$  nT ).

Los dos aspectos que más influyen en la interpretación de un mapa de anomalías magnéticas son:

1) La distinción entre los tipos de magnetismo de los materiales.

Imanación inducida, que deriva de la capacidad de los materiales de convertirse ellos mismos en imanes o anti-imanés ante la presencia de un campo magnético excitador (en nuestro caso, el campo magnético terrestre).

Imanación remanente, que es una imanación adquirida por los materiales y conservada a lo largo del tiempo. Las anomalías que se derivan de este tipo de imanación son mucho más notables que las originadas por imanación inducida. En general se deben a materiales ferromagnéticos y a materiales que han sobrepasado su punto de temperatura de Curie (hornos, hogares, cerámicas, etc.).

2) El hecho de que la anchura de la anomalía siempre es mucho mayor que la del cuerpo productor de la misma (Figura 4).

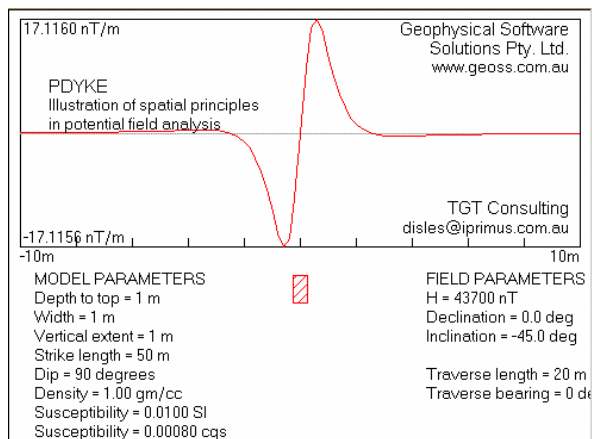


Figura 4 - Ejemplo de simulación de la anomalía que produce un muro de 0.5 m de anchura, 1 m de alto, enterrado a 1 m de profundidad; con unos parámetros magnéticos y de adquisición similares a los observados en La Alcudía. La anomalía generada por este muro hipotético (que se extiende en dirección perpendicular a la hoja, de W a E) consistiría en dos bandas: una negativa (oscura, en el mapa) situada al S y otra positiva (clara, en el mapa) situada al N, sumando entre ambas unos 4 m de anchura. (Simulation of a magnetic anomaly produced for a wall of 0.5 m width and 1 m high at a 1 m deep; with similar magnetic parameters of Alcudia terrain).

### 3. PROSPECCIÓN RÁDAR

A fin de evaluar el grado de detección ofrecido por este tipo de magnetogramas y apoyar su interpretación, una vez obtenido el mapa de anomalías magnéticas se han definido una serie de zonas para prospectarse mediante radar del subsuelo (SIR 2000; GSSI Inc.); con una antena de 400 MHz. Cada área (Figura 5) se ha adquirido con metodología de reflexión 3D; es decir con perfiles paralelos distantes 0.5 m y tomando una muestra cada 2 cm.

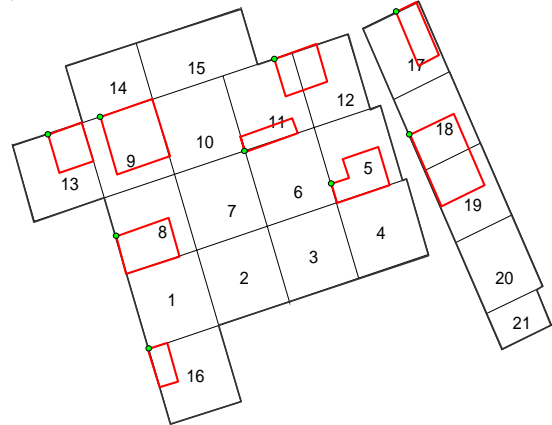


Figura 5 - Zonas de prospección radar 3D. Dichas zonas se definieron para analizar distintos aspectos de las anomalías magnéticas. (3D GPR zones defined for to analyze different types of the magnetic anomalies).

En la Tabla 1 se presentan el flujo básico de tratamiento aplicado a cada uno de los radargramas (RADAN V.4,0,0,1). Una vez procesados los radargramas (Figura 6) se ha construido el volumen 3D para cada zona y, posteriormente, se han analizado los datos a partir de las distintas rebanadas temporales (time slices; Neubauer W. et al. 2002) y de las correspondientes superficies alabeadas (Peña et al., 2004). - Figura 7-.

Tabla 1 - Flujo básico de procesado de los perfiles radar (basic processing flow of radar profiles).

Tratamiento	Parámetros
Ajuste de 0	Para antena de 400 MHz
Eliminación ruido coherente	lineal mayor que 2 m
Deconvolución predictiva	21 ns, 5 ns lag, 0.5% prewhi.
Ajuste lineal de ganancia	
Filtro vertical pasa bandas	600-250 MHz
Migración	Kirchoff

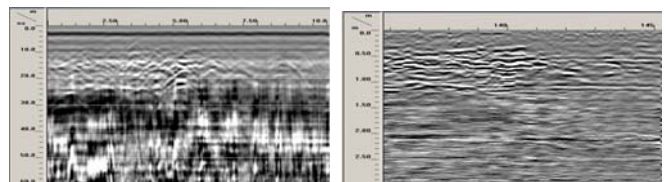
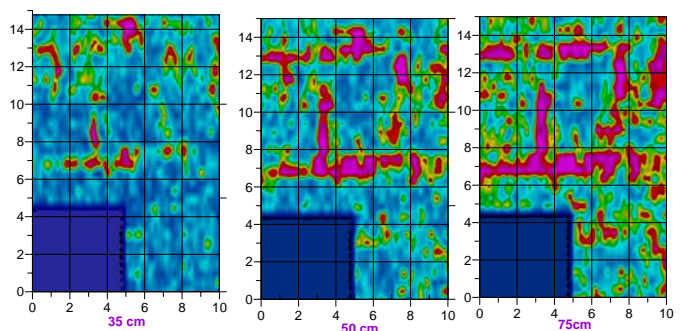


Figura 6 - Radargrama de campo y radargrama resultante después de aplicar el procesado de la Tabla 1. (Field GPR profile and GPR resulted of flow processing described in Table 1).





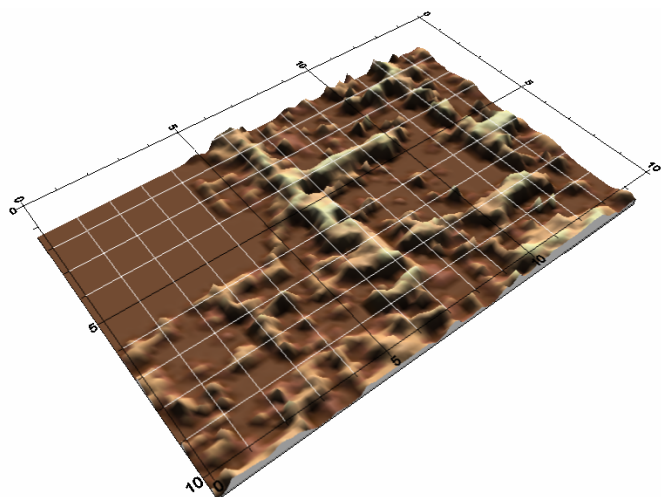


Figura 7- Rebanadas temporales a las profundidades marcadas y superficie alabeada construida a partir de las anomalías 3D. -Datos pertenecientes del sector S5-. (Time slices at market depths and 3D GPR surface anomalies. -S5 data set- ).

#### 4. INTERPRETACIÓN CONJUNTA

Un dato de partida para la interpretación de los resultados es que en las zonas excavadas circundantes al área de estudio no se han encontrado estructuras formadas con ladrillos (elemento cerámico), siendo el adobe y las piedras los materiales constructivos para la época ibérica y los sillares para la época romana (AA.VV., 2004).

A la vista del mapa de anomalías magnéticas y contrastando con las imágenes rádar se extraen los siguientes resultados:

- 1) Se han localizado cuatro zonas con un magnetismo de intensidad elevada (valores superiores a  $\pm 40$  nT) atribuido a magnetismo remanente; en donde muy probablemente los materiales subyacentes sufrieron algún tipo de combustión fuerte (hornos, hogares, etc.). En tres de ellas (sectores S9, S13 y S17; Figura 5) las imágenes rádar realizadas muestran un terreno con poco contraste dieléctrico, en donde las anomalías rádar pueden interpretarse como estructuras con cierto grado de derrumbe (Figura 8). De entre ellas, la anomalía del S17 (en la zona cercana a la *Domus*) es la única que coincide con una estructura rádar clara, pero a su vez, cabe mencionar que los valores magnéticos se sitúan en el límite inferior del intervalo establecido (¿magnetismo remanente?).

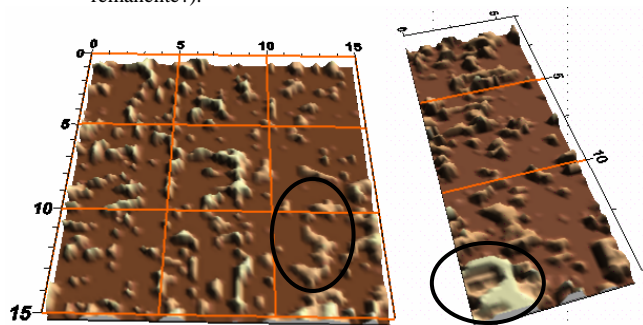


Figura 8- Superficies alabeadas correspondientes a las zonas con anomalías de magnetismo remanente S9 y S17 (marcadas con un círculo). (3D GPR surface corresponding to the remanent magnetic anomalies of sectors S9 and S17. This magnetic anomalies are marked with circles ).

En la figura 9 se presenta otro mapa de anomalías magnéticas en donde se han extraído las debidas a magnetismo remanente y se han vuelto a procesar los datos. Esta estrategia se ha efectuado para realzar el resto de anomalías (supuestamente debidas a inducción) y compararlas con las correspondientes imágenes rádar:

- 2) Para estas anomalías magnéticas de segundo orden (entre los  $\pm 40$  nT y los  $\pm 15$  nT) se pueden diferenciar dos subconjuntos: uno con valores superiores a los  $\pm 20$  nT y otro con valores inferiores. En las imágenes rádar, los más altos se corresponden con zonas en donde se han localizado estructuras más consolidadas que en el caso (1), pero que

también presentan cierto derrumbe; mientras que los valores de baja intensidad de anomalía se corresponden con zonas donde las estructuras están bien conservadas (figuras 7 y 10).

3) En el mapa magnético de la Figura 9, el subgrupo de anomalías bajas se distingue con cierta dificultad, ya que muchas de ellas se encuentran lindantes con anomalías fuertes de forma que quedan parcialmente apantalladas. Ejemplo de ello puede verse en la porción del Sector 5 inspeccionada con rádar (figuras 5 y 7); en donde al lado de una anomalía relativamente fuerte se aprecia un grupo de anomalías débiles achacables a estructuras murarias.

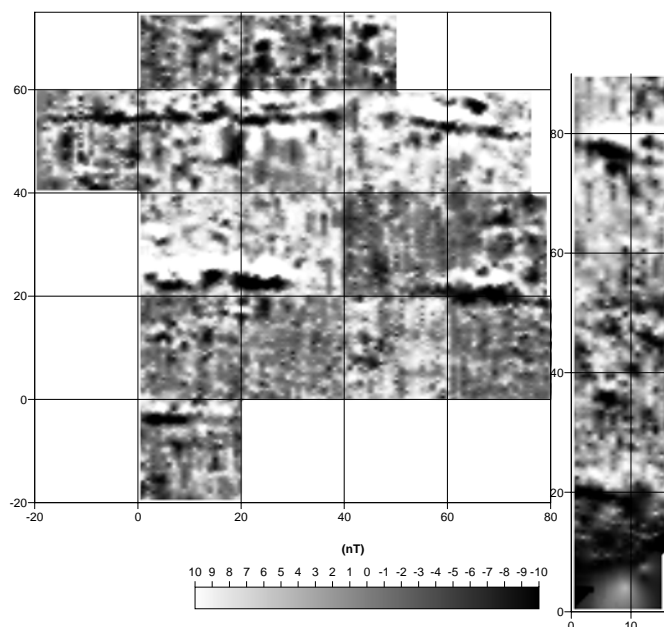


Figura 9- Mapa de anomalías magnéticas debidas al magnetismo inducido. (Map of magnetic anomalies do to induced magnetism only).

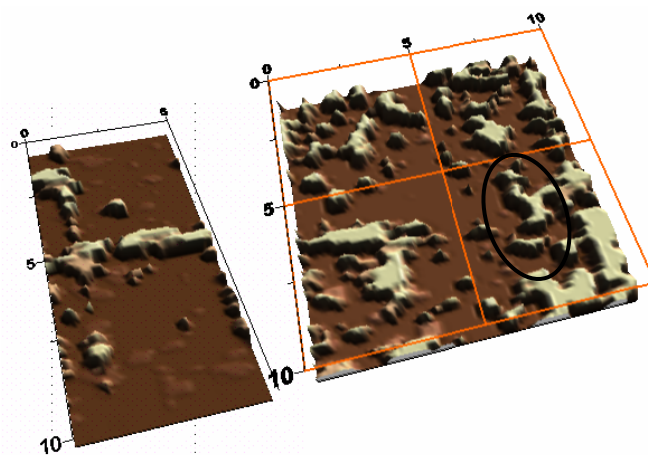


Figura 10- Superficies rádar alabeadas efectuadas sobre las anomalías de magnetismo inducido. A la izquierda la superficie correspondiente al sector S16 con anomalías magnéticas bajas. Y a la derecha la correspondiente al sector S9 con anomalías magnéticas altas. En este sector, la elipse marca la zona de magnetismo remanente. -Para una mejor localización de los sectores consúltese la Figura 5-. (3D GPR surfaces carried on to induced magnetic anomalies. At the left side, the GPR surface over S6 sector corresponding to low induced magnetic level. At the right side the GPR surface over S16 sector corresponding to high induced magnetic level. In this sector the ellipse marqueta remanent magnetic zone. - For a best location see you a map of Figure 5-).

- 4) Por último, el fondo de valores anómalos (entre  $\pm 15$  nT y  $\pm 15$  nT) se ha establecido en función de una serie de trazas lineales observadas. La más evidente es una línea (N-S) que recorre los sectores 11, 6 y 3 que tiene correspondencia con un antiguo camino (o margen entre campo); evidenciado en la foto aérea de la Figura 1 y en la alineación de anomalías rádar realizada en un tramo coincidente.

## 5. CONCLUSIONES

Si bien la prospección magnética es un método muy adecuado para investigar la potencialidad de yacimientos arqueológicos extensos, conviene asegurar la interpretación del mapa de anomalías magnéticas con otro método geofísico que actúe de contraste.

El trabajo realizado pone de manifiesto que un buen criterio de selección de los sectores a contrastar puede basarse los diferentes niveles de intensidad anomalías magnéticas.

Evidentemente, a fin de establecer una buena correlación, debe tenerse en cuenta la información geológica y arqueológica de la zona de estudio. En este trabajo se ha tenido en cuenta que: 1) las estructuras soterradas estaban a menos de 3 m de profundidad. 2) En las zonas excavadas circundantes al área de estudio no se han encontrado estructuras formadas con ladrillos; siendo el adobe y las piedras los materiales constructivos para la época ibérica y los sillares para la época romana. 3) Los materiales de relleno del yacimiento son básicamente arenas, limos y materiales de derrumbe.

En estas condiciones, se ha encontrado que la correlación entre la intensidad de las anomalías magnéticas y el contraste de las imágenes rádar (impedancia electromagnética) está casi en relación inversa.

## 1. REFERENCIAS

- AA.VV. (2004): "Iberia, Hispania, Spania. Una mirada desde Ilici". *Catálogo de la exposición, Caja de Ahorros del Mediterráneo, Alicante.*
- Becher H. and Fassbinder J.W.E. (2001): "Magnetic prospecting in archeological sites". *ICOMOS and Bavarian State Conservatium Office Ed.* ISBN: 3-87490-675-2
- Neubauer W. et al. (2002): "Georradar in the roman civil town Carnuntum, Austria: an approach for archeological interpretation of GRP data". *Archeol. Prospect.* 9, 136-156. Publied on line in Wiley InterScience [www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com) DOI 10.1002/arp183
- Peña J.A. y Teixidó T. (2004): "Generación de superficies alabeadas 3D". *Documento restringido Ref. GA/11-04*
- Peña J.A. y Teixidó T. (2005): "Unificación de superficies magnéticas, eliminación de *Spikes* y corrección direccional del ruido de fondo". *Documento restringido Ref. GA/27-05.*