

Interreg
España - Portugal

Fondo Europeo de Desarrollo Regional
Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional

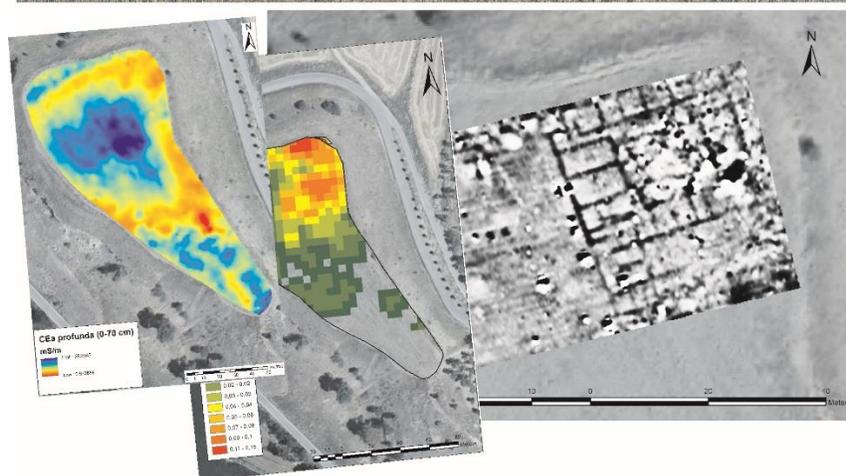


UNIÃO EUROPEIA
UNIÓN EUROPEA

Innoace



INVESTIGACIÓN · INNOVACIÓN · TECNOLOGÍA · EMPRENDIMIENTO
INVESTIGAÇÃO · INOVAÇÃO · TECNOLOGIA · EMPREENDEDORISMO



AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y ARQUEOLOGÍA MANUAL DE BUENAS PRÁCTICAS

Recopilación de recomendaciones y casos de estudio a partir del desarrollo de la tarea 2.1.7 del proyecto INNOACE



Ficha técnica

Título: “Agricultura de precisión y Arqueología. Manual de buenas prácticas”.

Entidades participantes y equipo de investigación:

Instituto de Arqueología-Mérida (CSIC-Junta de Extremadura)

- Victorino Mayoral Herrera
- Sebastián Celestino Pérez
- Pedro Mateos Cruz
- Carlos Morán Sánchez
- Jesús García Sánchez

Centro de Investigaciones Científicas y Técnicas de Extremadura

- José María Terrón
- Abel González Ramiro
- Francisco José Domínguez Ordoñez

Universidad de Évora

- Bento Caldeira
- André Carneiro
- José Borges
- Rui Oliveira
- José Rafael Marques da Silva

Autoría de los textos:

Jesús García Sánchez

Pedro Trapero

Victorino Mayoral Herrera

Bento Caldeira

José Borges

Rui Oliveira

Cartografía y maquetación: Arrow 4D S.L

PRESENTACIÓN	8
1. INTRODUCCIÓN	12
2. MÉTODOS NO INVASIVOS EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN	16
2.1. Resistividad eléctrica (Veris)	16
2.1.1. Principios de funcionamiento (basis theory)	16
2.1.2. Aplicabilidad	17
2.1.3. Principios básicos en el desarrollo del trabajo	17
2.1.3.1. Instrumentación	17
2.1.3.2. Profundidad factible de sonda de levantamiento	18
2.1.3.3. Planificación de la adquisición de datos	18
2.1.3.4. Localización de la prospección	18
2.1.3.5. Operación de campo	19
2.1.3.6. Análisis	19
2.1.3.6.1. Métodos de análisis	19
2.1.3.6.2. Elaboración de mapa de localización de líneas de la prospección	19
2.1.3.6.3. Análisis del registro	19
2.1.3.6.4. Revisión de información existente	20
2.1.3.6.5. Interpretación del resultado	20
2.1.3.6.7. Elaboración de informes	20
2.2. Inducción electromagnética (EM-38)	21
2.2.1. Principios de funcionamiento (basis theory)	21
2.2.2. Aplicabilidad	21
2.2.3. Principios básicos en el desarrollo del trabajo	23
2.2.2.1. Instrumentación	23
2.2.2.2. Profundidad factible de sonda de levantamiento	23
2.2.2.3. Planificación de la adquisición de datos	24
2.2.2.4. Localización de la prospección	24
2.2.2.5. Operación de campo	24
2.2.2.6.1. Métodos de análisis	25
2.2.2.6.2. Elaboración de mapa de localización de líneas de la prospección	26
2.2.2.6.3. Análisis del registro	26
2.2.2.6.4. Revisión de información existente	27

2.2.2.6.5.	Interpretación del resultado	27
2.2.2.7.	Elaboración de informes	27
2.3.	Geo-radar	28
2.3.1.	Principios de funcionamiento (basis theory)	28
2.3.2.	Aplicabilidad	29
2.3.3.	Principios básicos en el desarrollo del trabajo	30
2.3.3.1.	Instrumentación	30
2.3.3.2	Profundidad factible de sonda de levantamiento	31
2.3.3.3	Planificación de la adquisición de datos	31
2.3.3.4	Localización de la prospección	31
2.3.3.5.	Operación de campo	31
2.3.3.6.1.	Métodos de análisis	32
2.3.3.6.2.	Elaboración de mapa de localización de líneas de la prospección	32
2.3.3.6.3.	Análisis del registro	32
2.3.3.6.4.	Revisión de información existente	33
2.3.3.6.5.	Interpretación del resultado	33
2.3.3.7.	Elaboración de informes:	33
2.4.	Teledetección	34
2.3.1	Comportamiento espectral del agua, suelos y vegetación	35
2.3.2	Espectro Visible	37
2.3.2.1.	Principios de funcionamiento (basis theory)	37
2.3.2.2.	Aplicabilidad	38
2.3.3	Infrarrojo térmico	38
2.3.3.1.	Principios de funcionamiento (basis theory)	38
2.3.3.2.	Aplicabilidad	39
2.3.4.	Multiespectral	39
2.3.4.1.	Principios de funcionamiento (basis theory)	39
2.3.4.2.	Aplicabilidad	40
2.3.5.	Hiperespectral	40
2.3.5.1.	Principios de funcionamiento (basis theory)	40
2.3.5.2.	Aplicabilidad	41
3.	MÉTODOS NO INVASIVOS EN ARQUEOLOGÍA	43
3.1.	Gradiometria	43

3.1.1.	Principios de funcionamiento (basis theory)	43
3.1.2.	Aplicabilidad	44
3.1.3.	Principios básicos en el desarrollo del trabajo:	44
3.1.3.1.	Instrumentación	44
3.1.3.2.	Profundidad factible de sonda de levantamiento	45
3.1.3.3.	Planificación de la adquisición de datos	45
3.1.3.4.	Localización de la prospección	46
3.1.3.5.	Operación de campo	46
3.1.3.6.	Análisis	47
3.1.3.6.1.	Métodos de análisis	47
3.1.3.6.2.	Elaboración de mapa de localización de líneas de la prospección	48
3.1.3.6.3.	Análisis del registro	48
3.1.3.6.4.	Revisión de información existente	48
3.1.3.6.5.	Interpretación del resultado	49
3.1.3.7.	Elaboración de informes.	49
3.2	Inducción electromagnética (EM-38)	50
3.2.1.	Principios de funcionamiento (basis theory)	50
3.2.2.	Aplicabilidad	51
3.2.3.	Principios básicos en el desarrollo del trabajo:	51
3.2.3.1.	Instrumentación	51
3.2.3.2.	Profundidad factible de sonda de levantamiento	51
3.2.3.3.	Planificación de la adquisición de datos	52
3.2.3.4.	Localización de la prospección	52
3.2.3.5.	Operación de campo	52
3.2.3.6.	Análisis	52
3.2.3.6.1.	Métodos de análisis	52
3.2.3.6.2.	Elaboración de mapa de localización de líneas de la prospección	53
3.2.3.6.3.	Análisis del registro	54
3.2.3.6.4.	Revisión de información existente	54
3.2.3.6.5.	Interpretación del resultado	54
3.2.3.7.	Elaboración de informes	54
3.3.	Geo-radar	55
3.3.1.	Principios de funcionamiento (basis theory)	55

3.3.2.	Aplicabilidad	56
3.3.3.	Principios básicos en el desarrollo del trabajo	57
3.3.3.1	Instrumentación	57
3.3.3.2	Profundidad factible de sonda de levantamiento	57
3.3.3.3.	Planificación de la adquisición de datos	59
3.3.3.4.	Localización de la prospección	60
3.3.3.5.	Operación de campo	60
3.3.3.6.	Análisis	61
3.3.3.6.1.	Métodos de análisis	61
3.3.3.6.2.	Elaboración de mapa de localización de líneas de la prospección	62
3.3.3.6.3.	Análisis del registro	62
3.3.3.6.4.	Revisión de información existente	62
3.3.3.6.5.	Interpretación del resultado	63
3.3.3.6.6.	Reporte	63
4.	SINERGIAS	65
5.	EXPERIENCIAS	69
5.1.	Monitorizando el desarrollo de una parcela con un sitio arqueológico: el caso de Guadajira	70
	ENCUADRAMIENTO	70
	MATERIALES Y MÉTODOS	71
5.2.	Valorando el impacto de un cambio de uso: el caso del Turuñuelo de Mérida	82
	ENCUADRAMIENTO	82
	MATERIALES Y MÉTODOS	83
	RESULTADOS	87
	DISCUSIÓN	88
5.4.	El caso de Horta da Torre: el impacto de la roturación de las dehesas sobre una gran villa romana.	91
	ENCUADRAMIENTO	91
	MATERIALES Y MÉTODOS	92
	MÉTODO CUANTITATIVO DE COMPARACIÓN	97
5.5.-	La Villa Romana De Pisões (Beja, Portugal). Una zona arqueológica asediada por la expansión del olivar intensivo	100
	Introdução	100
	MATERIALES Y MÉTODOS	102

O Georradar (GPR)	103
Resultados preliminares da Geofísica	110
7. CONCLUSIONES: LAS LECCIONES APRENDIDAS	137
7.1.-Orientaciones para la Administración	137
7.2.-Orientaciones para los agricultores	138
7.3.-Orientaciones para los investigadores.	139

PRESENTACIÓN

¿Por qué se hace esta guía?

A través de los siglos, una misma delgada capa de la corteza terrestre formada por los suelos cultivables ha sostenido las necesidades materiales de los grupos humanos, y a la vez ha ido acumulando la huella material de su empeño en la construcción del paisaje. En algunas partes del mundo, la distribución irregular de los suelos útiles para el cultivo hace que esta intensa relación se concentre en los mismos espacios durante milenios. En muchas zonas de la Península Ibérica, esta relación ha permanecido en un estado de relativo equilibrio hasta tiempos muy recientes. La tecnología agrícola empleada ha tenido una capacidad bastante limitada para alterar la topografía y el potencial productivo del terreno. Sólo a mediados del siglo XX los grandes proyectos de irrigación y repoblación forestal empezaron a modificar drásticamente el paisaje. Lejos de detenerse, este proceso ha seguido a un ritmo creciente. Los cultivos de alto rendimiento conllevan la alteración del terreno a una escala sin precedentes, arrollando de manera silenciosa infinidad de vestigios arqueológicos. No son restos monumentales, de grandes y lujosos edificios, sino el humilde rastro material de la vida rural de un campesinado que, hasta hace apenas un siglo, constituía el 90 % de la población.

Al mismo tiempo, la agricultura ha experimentado enormes mejoras tecnológicas. Ahora los tractores van guiados por GPS, y los drones escudriñan el terreno para analizar el estado de la vegetación. En este contexto, la arqueología ha sido siempre conceptualizada como un problema, una potencial fuente de perjuicios que hace que sea vista con hostilidad por los agricultores.

Sin embargo, es precisamente esta revolución tecnológica la que nos ofrece, más que un problema, una oportunidad: la de, por primera vez, lograr una convergencia de intereses entre unos y otros. A los agrónomos les interesa conocer en detalle qué cualidades del terreno pueden favorecer más la productividad agrícola. A los arqueólogos les interesa lo mismo, pero exactamente a la inversa: donde las plantas se desarrollan peor ven un buen indicador de dónde pueden encontrar restos enterrados. En pocas palabras, lo que para ellos es “ruido”, para nosotros es “señal”, y viceversa. Por este motivo utilizamos los mismos métodos para explorar el terreno. Desde el cielo tomamos imágenes con cámaras especiales que captan por ejemplo el infrarrojo cercano y térmico, y sobre el terreno se emplean sensores que nos sirven para elaborar mapas de propiedades como la conductividad eléctrica, que permiten detectar esos cambios en el suelo.

De este modo, a la vez que se obtiene información sobre cómo mejorar el rendimiento de las parcelas, podemos localizar y visualizar con gran detalle sitios arqueológicos, desde los restos de una pequeña granja hasta el urbanismo de toda una ciudad romana. Otro beneficio añadido para los agricultores es que, gracias a la arqueología no invasiva, es posible delimitar las zonas en las que se ha de tener precaución a la hora de remover el terreno para no destruir los restos. En fin, esta potencial sinergia haría compatible la gestión eficiente del campo con el estudio y conservación del patrimonio, consiguiendo obtener un beneficio mutuo.

Estas son las premisas sobre las que se ha basado la propuesta de trabajo conjunto entre el Instituto de Arqueología-Mérida (CSIC-Junta de Extremadura, el CICYTEX y la Universidad de Évora en el marco del proyecto INNOACE. No es en todo caso una relación inédita, pues cuenta con el precedente inmediato de otra tarea dentro de un proyecto INTERREG de la convocatoria previa, y liderado como este por la Junta de Extremadura: el proyecto RITECA II (Red de Investigación Transfronteriza entre Extremadura, Centro y Alentejo, <http://riteca.gobex.es/>). Si en aquella ocasión centramos nuestros esfuerzos en demostrar el carácter complementario entre disciplinas y establecer unos lazos de colaboración científica transfronteriza, en esta nueva iniciativa hemos intentado mejorar estos procesos y, sobre todo, afrontar la implementación de una colaboración provechosa entre todos los agentes implicados.

Se suman así los esfuerzos de arqueólogos, ingenieros agrónomos y expertos en geofísica y teledetección para afrontar las múltiples facetas de este empeño. Se han realizado numerosos ensayos en el campo y especialistas de disciplinas en principio tan diferentes se han aproximado y han aprendido unos de otros. Otro frente de intensa actividad ha sido el de las empresas, mostrando el potencial de los mismos equipamientos y servicios para los sectores de la agricultura y el patrimonio cultural. Pero sin duda el mayor reto ha sido conectar con los agricultores, despejar sus dudas y temores y hacer ver los potenciales beneficios. Sumando todos estos esfuerzos, esperamos haber avanzado un poco para cumplir el objetivo último, que no es otro que hacer compatible el desarrollo económico con la conservación de los paisajes culturales.

El objetivo del presente manual es plasmar de manera detallada todo este proceso, incidiendo en las lecciones aprendidas, tanto en lo metodológico como en la generación del conocimiento y la experiencia práctica de su transferencia y aplicación. Al tratarse de un ámbito de trabajo relativamente novedoso por su carácter “híbrido”, se hacía necesario explicitar y asentar tanto las diferencias como las conexiones y necesidades de ajuste entre el trabajo agronómico y el arqueológico. De esta manera esperamos lograr que la experiencia realizada sirva como referencia para el trabajo futuro en esta línea.

¿A quién va dirigido este manual?

Esta guía ofrece varios niveles de lectura. En un plano más técnico, va orientada a tecnólogos especialistas en la captura, gestión y análisis de datos, tanto del trabajo de documentación arqueológica como de la gestión de cultivos. Unos y otros pueden ver aquí las características de los sensores habitualmente utilizados en ambas disciplinas, conocer sus peculiaridades y sobre todo su potencial como fuentes complementarias para desarrollar su trabajo. En segundo lugar, estimamos que este conocimiento detallado puede ser valioso para los investigadores de uno y otro campo. En tercer lugar, los resultados del proyecto, plasmados en una serie de casos de estudio que se exponen de manera detallada, pueden ser del interés de los responsables de entidades y empresas gestoras, tanto de la administración como de las compañías privadas. Finalmente, pero no menos importante, este manual puede ofrecer alguna orientación a propietarios de explotaciones agrícolas sobre el potencial de los métodos no invasivos para mejorar la gestión de sus terrenos en varios sentidos. El más directo es obviamente el relacionado con la aplicación directa de estos sensores para una utilización sostenible de los recursos y una maximización del rendimiento de los cultivos. Pero al mismo tiempo, queremos incidir en el mensaje de que un mejor conocimiento de la presencia y naturaleza de elementos del patrimonio histórico, puede facilitar la implementación de medidas más razonables y ponderadas de cara a su preservación, a hacer en definitiva compatible la explotación del campo con la conservación de este legado. Eventualmente, saber bien qué es lo que esconden estas tierras puede llevar a una mejor valoración de su importancia histórica, y tomando las decisiones adecuadas, a integrar ese patrimonio como parte del atractivo turístico y cultural de las zonas rurales, tan necesitadas de estrategias alternativas para su desarrollo económico.

Estructura de la obra

Este manual ha sido concebido como un documento de trabajo en el que se expondrá detalladamente el resultado de nuestra tarea dentro del proyecto INNOACE. En un primer bloque se describirán los métodos no invasivos que habitualmente son empleados para el estudio agronómico, tanto a nivel de suelo (métodos geofísicos), como mediante plataformas aéreas (teledetección). Para cada uno de los métodos mostraremos los principios básicos de funcionamiento, así como su aplicabilidad. A continuación, seguiremos el mismo esquema para abordar los procedimientos no invasivos más específicos en Arqueología. Es evidente en todo caso que algunos de ellos, con principios operativos muy similares, son con frecuencia utilizados en uno y otro ámbito. Esta sinergia será valorada en el apartado 4 de la obra. El apartado 5 pretende reflejar la puesta en práctica de todos estos métodos a través de una serie de casos de estudio abordados durante el desarrollo del proyecto. No son sino una selección, en función de la representatividad de los problemas que lo definieron, frente

a un volumen mucho mayor de ensayos y experiencias, no siempre exitosas, que conformaron el día a día de nuestra actividad científica. Por último, el apartado 6 pretende aportar a modo de conclusiones, algunas reflexiones finales respecto a lo aprendido en este camino y sobre su potencial impacto para resolver los problemas que sin duda va a seguir planteando la coexistencia de todas estas actividades e intereses, teóricamente contrapuestos, en los espacios agrarios.

1. INTRODUCCIÓN

1.1.- El escenario: la tierra arada, una larga historia de construcción del paisaje.

Como ya se ha apuntado en la presentación de este manual, los espacios agrarios ofrecen una compleja red de interacciones entre el pasado y el presente, que a su vez plantean un gran desafío de cara al futuro. Desde el surgimiento de la economía productora en el Neolítico, la construcción del paisaje y la configuración territorial generada por las comunidades humanas se ha definido en torno a la dualidad entre los espacios cultivados y la tierra sin roturar. El peso de ambos ha ido variando en un equilibrio fluctuante, con fases de presión y abandono, expansión y contracción, estrechamente relacionadas con el desarrollo tecnológico, la presión demográfica y, en última instancia, con los modelos de organización social.

Esta acción acumulada a lo largo de siglos nos ha dejado una huella material densa, ubicua, que conforma un enorme legado cultural, en forma de patrimonio arqueológico. No obstante, la dinámica de espacios complementarios y/o contrapuestos a través del tiempo ha llevado a la configuración de caminos divergentes. Mientras algunas zonas del paisaje se han conformado como espacios marginales, dedicados a la actividad ganadera o extractiva, otros han sido objeto de sobreexplotación.

En el segundo caso, la coexistencia entre el uso de la tierra y la preservación de los restos arqueológicos conduce a un conflicto de intereses. Es sobre todo un duelo que se desarrolla desde el arranque de la mecanización del campo, con intensidad creciente de la mano de grandes iniciativas estatales como la desecación de espacios lacustres, la reforestación o la construcción de grandes infraestructuras hidráulicas. Todo esto ha tenido históricamente un grave impacto en la conservación del patrimonio. Con la irrupción de una agricultura cada vez más tecnificada este impacto ha crecido de manera exponencial y ha alcanzado zonas que permanecían intactas hasta un pasado muy reciente. La producción a una escala cada vez mayor representa el riesgo de la destrucción total y definitiva de los valores culturales del paisaje. Obviamente, este nuevo escenario ha exacerbado la sempiterna rivalidad entre los agricultores y los arqueólogos. Sin embargo, las nuevas condiciones tecnológicas ofrecen una oportunidad para que ambas actividades puedan ser compatibles e incluso mutuamente beneficiosas.

1.2.-La génesis de una idea de colaboración entre disciplinas.

Tanto la Arqueología del Territorio como la Agricultura de Precisión son dos líneas de investigación que ha discurrido en paralelo desde su surgimiento. Hasta la fecha, la toma

de conciencia de posibles puentes de colaboración científica y potenciales sinergias ha sido sumamente minoritaria, con experiencias muy contadas.

La protección y conservación del patrimonio arqueológico rural es una preocupación desde el punto de vista de las altas instituciones gubernamentales, especialmente la europea. Este es el principal fin de la European Heritage Alliance¹. En este sentido se han desarrollado diversas iniciativas desde el punto de vista del patrimonio agrario, entendido fundamentalmente como la resiliencia de técnicas y prácticas de cultivo perdidas o en peligro de olvidarse. Este patrimonio mueble e inmueble ha sufrido profundos cambios con la mecanización del campo. Destacar en este aspecto el proyecto GIASH (Globally important agricultural heritage systems)².

De la misma manera existe un interés por proteger los espacios arqueológicos en medio agrario con perspectivas novedosas en el estudio del paisaje y conservación de estos espacios³. Sin embargo, son pocos los proyectos en el ámbito europeo que busquen una sinergia entre los diversos actores, agricultores y gestores del patrimonio. Actualmente existen investigaciones recientes sobre la importancia de la conservación de yacimientos arqueológicos, especialmente los que están en peligro de desaparecer⁴. Estas perspectivas tocan de manera somera la problemática agrícola y se centran fundamentalmente en los condicionantes climáticos y ambientales para la conservación del yacimiento. Los proyectos europeos más relacionados con nuestra temática son MEMOLA (Mediterranean Mountainous Landscapes: an historical approach to cultural heritage based on traditional agrosystems)⁵ y HERCULES (Sustainable futures for Europe's HERitage in CULTural landscapES: Tools for understanding, managing, and protecting landscape functions and values)⁶. En ambos casos se tratan de proyectos cuya idea central pivota en torno al patrimonio cultural como es el del medio montañoso o directamente en la gestión del patrimonio agrícola.

¹ Farming the Historic Landscapes. Towards a better integration of cultural heritage in a sustainable future Common Agricultural Policy Heritage, Nonpaper by the Reflectiongroup EU and Cultural, 2017.

² P. Koohafkan, M.A. Altieri, *Globally important agricultural heritage systems (GIAHS). Conservation of our World's Agricultural Heritage*. Food and agriculture organization of the United Nations, Rome, 2020; P. Koohafkan, M. Altieri. *A methodological framework for the dynamic conservation of agricultural heritage systems. GIAHS initiative. Land and water Division (NRL)*. The food and agriculture organization (FAO) of the United Nations. 2020; *The post-2020 Common Agricultural Policy: Environmental benefits and simplification*. Agriculture and Rural Development, European Union, 2020; EU SCAR, *Agricultural Knowledge and Innovation Systems Towards the Future – a Foresight Paper*, Bruselas, 2015.

³ N. Mitchell, M. Rössler, P.M. Tricaud, *World heritage cultural landscapes. A Handbook for conservation and management*. World heritage centre, UNESCO, 2009.

⁴ <https://cordis.europa.eu/article/id/400947-heritage-at-risk-eu-research-and-innovation-for-a-more-resilient-cultural-heritage>
<https://cordis.europa.eu/project/id/337128>

⁵ <https://cordis.europa.eu/project/id/613265/reporting>

⁶ <https://cordis.europa.eu/project/id/603447/reporting>

La bibliografía nos muestra algunos casos específicos por Europa, donde una metodología que integra agricultura y patrimonio se ha seguido⁷.

Por lo que respecta a nuestro entorno más inmediato y que compete al presente proyecto, debemos señalar que hasta un pasado muy reciente no se ha tomado conciencia de esta posible sinergia que aquí proponemos. Hasta donde alcanza nuestro conocimiento, la única iniciativa en esta línea fue la desarrollada por nuestro propio equipo de investigación en el marco del proyecto RITECA II (Red de Investigación Transfronteriza entre Extremadura, Centro y Alentejo). En su conjunto, el objetivo de este proyecto cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa Operativo de Cooperación Transfronteriza España-Portugal (POCTEP) 2007-2013, fue establecer un marco de colaboración entre instituciones de las regiones citadas en el ámbito de la Investigación, el Desarrollo tecnológico y la Innovación, a fin de potenciar y acelerar su desarrollo.

La creación de esta Red supuso una oportunidad para que el IAM se abriera un poco más a la colaboración con los centros tecnológicos de su entorno, reforzando su vocación de insertarse en el territorio en el que desempeña una parte muy importante de su actividad. Este conocimiento mutuo permitió rápidamente descubrir interesantes puntos de conexión tanto respecto a los espacios y las temáticas, como a los métodos de trabajo, y lo que no es menos importante, respecto al potencia uso compartido de equipamientos científicos y saberes técnicos. Así, pudimos apreciar cómo la geofísica, que puede considerarse hoy día una disciplina con una intensa aplicación en Arqueología, era utilizada desde el INTROMAC como herramienta para la exploración geológica, y desde el CICYTEX para la caracterización de suelos para valorar su potencial productivo. Lo mismo se puso de manifiesto respecto al trabajo con imágenes satelitales o tomadas desde drones con diferentes tipos de sensores. A esto hay que añadir la implicación de la Universidad de Évora, tanto desde el punto de vista de la investigación arqueológica como por lo que respecta al campo de la Agronomía. Respecto a lo primero, RITECA II planteó una oportunidad única al establecerse una conexión con otro ambicioso proyecto internacional denominado Radio-Past, cuyo objetivo era la aplicación masiva de sistemas de registro no invasivos en la ciudad romana de Ammaia. Esta colaboración fue muy fructífera científicamente, tanto por lo que respecta a la publicación de artículos y monografías, como a la organización de varias escuelas de verano

⁷ K. Daugstad, K. Ronningen, B. Skar, "Agriculture as an upholder of cultural heritage? Conceptualizations and value judgements - A Norwegian perspective in international context", *Journal of Rural Studies* 22 (2006) 67-81; *The management of archaeological sites in arable landscapes BD1701, CSG15*, Oxford Archaeology, 2002; P. Gullino, G.L. Beccaro, F. Larcher, "Assessing and monitoring the sustainability in Rural World Heritage Sites", *Sustainability* 2015, 7, 14186-14210; T. Spek, O. Brinkkemper, B.P. Speleers, "Archaeological heritage management and nature conservation. Recent developments and future prospects, illustrated by three Dutch case studies", *Berichten van de Rijksdienst voor het Oudheidkundig Bodemonderzoek*, 46, 2006, 331-354.

y cursos de especialización. Por su parte, la conexión con el Departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad, de la mano del CICYTEX, que previamente ya mantenía con ellos una intensa colaboración, permitió interesantes desarrollos metodológicos, sobre todo relacionados con la realización de prospecciones geoeléctricas. La suma de todo esto cristalizó de forma muy satisfactoria con el estudio intensivo de la ciudad romana de *Contributa Iulia* (Medina de las Torres, Badajoz) y su entorno, que fue el principal laboratorio abierto para el ensayo y experimentación en el marco del proyecto RITECA II.

El equipo de trabajo transfronterizo así formado constituyó la base para el establecimiento de un grupo estable de colaboradores de cara al desarrollo de nuestra tarea en INNOACE. A cierre de este proyecto, dicha colaboración sigue teniendo un futuro prometedor, ya que ha dado lugar a nuevas iniciativas. Cabe destacar en este sentido el arranque, a finales de abril de 2021, del proyecto “Developing a method for studying the Critical Zone: Connecting Archaeological and Precision Agricultural approaches to agrarian landscapes by making their advanced sensing data interoperable”. Se trata de una red que conectará nuestro grupo de trabajo con otros equipos internacionales (universidades de Glasgow, Gante y Pisa) para seguir profundizando a escala europea en las interconexiones entre la Agricultura de Precisión y la Arqueología. También en un plano nacional y regional este trabajo siguen en marcha, con la aprobación de nuevos proyectos en convocatorias de sendos ámbitos.

2. MÉTODOS NO INVASIVOS EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Iniciamos con esta sección una descripción detallada de los métodos empleados en el desarrollo del proyecto. Como ya se apuntó en la introducción, se expondrán en primer lugar los principios básicos de funcionamiento, para a continuación describir los principios básicos en el desarrollo del trabajo: planificación, ejecución en campo y procesado de los datos. Valoraremos igualmente los dispositivos actuales para la toma de cada tipo de datos, incluyendo una descripción de los utilizados en el proyecto.

2.1. Resistividad eléctrica (Veris)

2.1.1. Principios de funcionamiento (basis theory)

La resistividad se basa en la relativa incapacidad de los materiales para conducir una corriente eléctrica. En general, el estudio implica la inyección de una pequeña corriente, a través de electrodos colocados en la superficie, y la medición de la variación de la resistencia bajo la superficie en un área determinada. Hay diferentes configuraciones de electrodos y diferentes distancias entre ellos, lo que proporciona diferencias significativas en los resultados. La resistividad aparente es el valor obtenido como producto de una resistencia medida y un factor geométrico para una configuración de electrodos determinada. Esta resistencia depende en gran medida de la distribución de la humedad en el suelo, la presencia de estructuras y la porosidad del suelo. La arcilla y el suelo normalmente tienen una fuerza entre 1 y 10 Ω -m, las rocas porosas entre 100 y 1000 Ω -m y las rocas no porosas pueden llegar a 10³ y 10⁶ Ω -m (Gaffney and Gater, 2003).

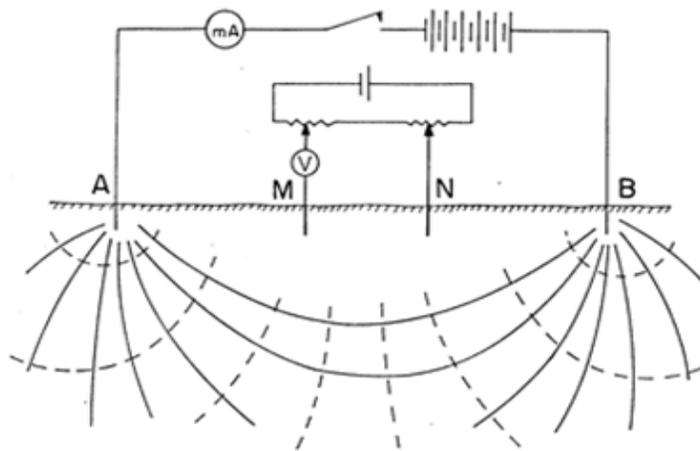


Figura 1 Principio de funcionamiento (figura esquemática). Fuente: EEG Geofísica

2.1.2. Aplicabilidad

Este método podría ser útil para la prospección arqueológica y la agricultura de precisión. En agricultura, un intervalo de 10 a 20 m entre pistas se considera adecuado para producir una estimación confiable de los valores de conductividad eléctrica en grandes áreas. Es una forma efectiva de mapear la textura del suelo porque las partículas de suelo más pequeñas, como la arcilla, conducen más corriente que las partículas de arena y limo más grandes.

2.1.3. Principios básicos en el desarrollo del trabajo

2.1.3.1. Instrumentación

VERIS registra directamente el valor de resistividad aparente del suelo (Ohm / m). Sin embargo, el registrador de datos de este equipo los convierte automáticamente a su conductividad eléctrica inversa (Ohm.m).

Este dispositivo está montado en un tractor y está conectado a un sistema GNSS, que registra correcciones de cinemática en tiempo real de radiofrecuencia. Proporciona precisión submétrica para la posición espacial de cada punto de muestreo, con un intervalo de un segundo. Este es un requisito previo básico para un posterior mapeo y análisis espacial de las condiciones del suelo. Este dispositivo está montado en un tractor.



Figura 2 Sistema VERIS. Fuente: Terrón et al., 2015

2.1.3.2. Profundidad factible de sonda de levantamiento

El sistema se puede configurar para registrar datos en dos capas de profundidad diferentes. Utilizando los discos interiores es posible medir los 30 cm superiores de suelo, mientras que las rejillas exteriores permiten que las medidas alcancen los 90 cm de profundidad.

2.1.3.3. Planificación de la adquisición de datos

En un ambiente mediterráneo, las condiciones óptimas en el campo se pueden encontrar en dos períodos específicos: inmediatamente después de las primeras lluvias del otoño y antes de la preparación del terreno para la siembra a mediados de octubre / noviembre; el otro período del año corresponde al intervalo entre las lluvias primaverales (a partir de finales de marzo) y la cosecha de la segunda quincena de mayo (Europae Archaeologia Consilium, 2015).

Por lo que respecta a la adaptación de este método a las condiciones específicas de las zonas arqueológicas, es preciso valorar los siguientes criterios de cara a la planificación y delimitación de las zonas a intervenir:

- Datos previos sobre la evolución temporal de la zona a intervenir (cartografía antigua, histórico de vuelos fotogramétricos y cualquier otra documentación gráfica o textual).
- Recopilación de indicios arqueológicos superficiales que permitan definir áreas de interés en las que se presume la existencia de elementos en el subsuelo (estructuras positivas tales como muros o pavimentos, o negativas como fosas, silos, zanjas etc).
- Datos de prospección geofísica con otros métodos o imágenes tomadas con sensores en diferentes segmentos del espectro electromagnético que de manera indirecta atestigüen la presencia de anomalías interpretables como elementos de interés arqueológico.
- Valoración de cualquier resultado arqueológico previo en la zona, con especial atención a sondeos u otro tipo de excavaciones que faciliten la interpretación de la secuencia estratigráfica del sitio y del tipo de estructuras potencialmente detectables.
- Valoración contextual de la topografía y configuración actual de las zonas a intervenir.

2.1.3.4. Localización de la prospección

Se debe tener cuidado con la pedregosidad y la compactación del terreno. Los filtros de frecuencia de corriente del medidor de resistencia y los tiempos promedio de medición deben garantizar un registro estable. Las condiciones más adecuadas para los estudios de resistencia de la tierra son durante la temporada de buen drenaje y en suelos sedimentarios, con vegetación corta limitada.

2.1.3.5. Operación de campo

Se debe tener cuidado con los cables eléctricos subterráneos y las tuberías con protección contra la corrosión catódica. Se debe también tener cuidado para evitar accidentes, ya que el reconocimiento se realiza mediante un tractor agrícola. Se debe realizar una evaluación premilitar de las condiciones de campo, de modo que los valores anómalos puedan ser monitoreados y distinguidos en los datos de procesamiento.

2.1.3.6. Análisis

2.1.3.6.1. Métodos de análisis

Se describe un posible procedimiento para analizar los datos:

- Importación de los datos a un entorno GIS para la reducción y el análisis de errores.
- Filtrado y corrección de los datos
- Producción de varias superficies de interpolación y normalización para producir una imagen global precisa de las áreas exploradas.

En el capítulo 4 se presentan varios casos de estudio con la aplicación de este método y el respectivo análisis e interpretación de resultados.

2.1.3.6.2. Elaboración de mapa de localización de líneas de la prospección

Los mapas se proporcionan generalmente como líneas de contorno o, con mayor frecuencia hoy en día, como un mapa de contorno de color, para mostrar la relación detallada entre el área de levantamiento y las líneas de levantamiento. Incluye las líneas topográficas y sus ubicaciones relativas, escala y dirección, así como algunas otras características importantes, como la topografía y las rutas de acceso. Las áreas de estudio pueden combinarse con imágenes aéreas de teledetección.

2.1.3.6.3. Análisis del registro

Se recomienda hacer una tabla de los siguientes datos para cada punto de medición, de modo que sea posible evaluar la calidad de los datos y detectar datos anómalos:

- Número de punto de medición
- Coordenadas geográficas de cada punto
- Espaciado de electrodos

- Corriente de medida
- Resistividad aparente
- Correcciones.

2.1.3.6.4. Revisión de información existente

Es recomendable recopilar y revisar la información existente antes del levantamiento, como el contexto geológico y otros objetos que pueden interferir en los resultados medidos. La teledetección se revela como una herramienta útil en este caso, tanto para una evaluación preliminar de las condiciones locales como para la interpretación de los datos resultantes.

2.1.3.6.5. Interpretación del resultado

La interpretación que sigue generalmente requiere una experiencia más amplia, con una comprensión de las condiciones del sitio y su historia, los principios de la geofísica arqueológica, así como las limitaciones y lagunas de los instrumentos y las metodologías de levantamiento.

Debe quedar claro cómo se hizo la interpretación, así como la división entre razonamiento objetivo e inferencia más subjetiva. La interpretación de los datos geofísicos inevitablemente incluye conjeturas, pero no debe haber duda de dónde se encuentran las áreas de incertidumbre. Es preferible ejercitar la mayor objetividad y moderación posible.

2.1.3.7. Elaboración de informes

Los siguientes elementos deben incluirse en los resultados de la prospección:

- Mapa de ubicación de la prospección
- Mapas de posiciones de estaciones / líneas (o secciones transversales)
- Mapa de vista en planta mapa de conductividad
- Compuesto de secciones transversales de análisis general
- Mapa de vista en planta de análisis general.

El informe deberá de incluir:

- Resumen de Resultados
- Introducción
- Métodos (técnicas y metodologías)
- Resultados
- Conclusiones
- Agradecimientos
- Declaración de indemnización
- Referencias
- Apéndices.

2.2 Inducción electromagnética (EM-38)

2.2.1. Principios de funcionamiento (basis theory)

La susceptibilidad magnética mide cuánto se magnetizará un material en un campo magnético aplicado. El método detecta la diferencia de propiedades electromagnéticas del suelo: un material diferente presenta una respuesta electromagnética diferente. El suelo no es una habitación tridimensional homogénea, el suelo consiste en una distribución irregular de poros (lleno de agua / aire) y sustancias sólidas. Por tanto, en geofísica, el término conductividad aparente se utiliza.

Las propiedades magnéticas del suelo son el resultado del contenido en el perfil del suelo de minerales magnéticos (principalmente óxidos e hidróxidos de hierro) tanto de origen natural como antropogénico.

Una alta concentración de esos elementos ferromagnéticos se encuentra normalmente en la capa superficial del suelo: las fuentes de susceptibilidad magnética no antropogénica pueden ser: la litología del lecho rocoso, que produce magnetita del tamaño de arena o del tamaño de arcilla; y las actividades microbianas y bacterianas.

2.2.2. Aplicabilidad

La aplicación de EM38 comenzó con la detección de salinidad y continuó con la determinación del contenido de arcilla y agua. Actualmente, las áreas de aplicación incluyen la estimación de los niveles de nutrientes y otras propiedades químicas y físicas del suelo, puntos de muestreo del suelo,

la determinación de los tipos de suelo y sus límites, la predicción del rendimiento y la delimitación de zonas de manejo de cultivos (Heil and Schmidhalter, 2017).

La interpretación y la utilidad de las lecturas de la conductividad electromagnética (ECa) dependen de la ubicación y el suelo; Las propiedades del suelo que contribuyen a las mediciones de ECa deben entenderse claramente.

La resolución y la profundidad alcanzadas dependen de la orientación del dispositivo, que se puede utilizar tanto vertical como horizontalmente.



Figura 3 Toma de datos con el EM38 empleando como referencia una malla con espaciado de 1 metro. Pese a contar con la georreferenciación en tiempo real gracias al protocolo NMEA, es fundamental para obtener un buen resultado una cobertura lo más homogénea y regular posible.

2.2.3. Principios básicos en el desarrollo del trabajo

2.2.2.1. Instrumentación

El medidor de conductividad terrestre EM38 está compuesto por un transmisor y una bobina receptora instalados 1m de distancia en una barra no conductora en los extremos opuestos del instrumento. La bobina del transmisor se energiza con una corriente alterna de una batería de 9 V, que genera un campo magnético variable en el tiempo en la tierra. Este campo magnético hace que la corriente fluya en el suelo, produciendo un campo magnético secundario. La medida es una función de las diferentes conductividades en el subsuelo y otros factores, como la orientación y distancia de las bobinas, frecuencia de funcionamiento y la susceptibilidad magnética. Este instrumento no necesita contacto con el suelo, es portátil y puede remolcarse con vehículos ligeros.



Figura 4 Los EM38 son fáciles de usar, livianos y brindan numerosas mediciones rápidas en áreas extensas sin la necesidad de instalaciones terrestres o muestreos destructivos. Fuente: GRDC

2.2.2.2. Profundidad factible de sonda de levantamiento

El rango de profundidad investigado depende de la separación de la bobina dentro del instrumento. La bobina la distancia se fija con el EM38. La profundidad de investigación se limita a donde el efecto de una capa se considera "ruido" para el instrumento. Por EM38, la definición y simplificación más común es un rango de profundidad de hasta 1,5 m utilizando el modo de dipolo vertical. Con el modo dipolo horizontal, la profundidad de penetración se reduce a 0,75 m.



Figura 5 Implementación de un sistema para la toma de datos con el EM38 mediante tracción, que permite evitar el efecto del cabeceo del sensor y mantenerlo paralelo al terreno

2.2.2.3. Planificación de la adquisición de datos

Se debe tener cuidado de tener en cuenta la presencia de depósitos, la influencia del uso reciente de la tierra y las condiciones del campo en el momento del levantamiento que pueden reducir el contacto entre una bobina de campo y la superficie del suelo.

2.2.2.4. Localización de la prospección

Este método no es aplicable en áreas cercanas a fuentes de ruido como líneas de energía, generadores, motores, torres de radio, etc. Es importante que el estudio se lleve a cabo fuera de las zonas urbanas debido a las diversas fuentes de ruido electromagnético y a los objetos metálicos.

2.2.2.5. Operación de campo

La medición se realiza conectando el receptor con el lazo o bobina.

Los parámetros de adquisición incluyen:

- Tamaño y corriente del bucle del transmisor
- Ventana de tiempo por cada canal y período de tiempo de observación
- Tiempo de rampa
- Número de apilamientos.

2.2.2.6.1. Métodos de análisis

Se describe un posible procedimiento para analizar los datos:

- Importe los datos a un entorno GIS para la reducción y el análisis de errores.
- Filtrar y corregir los datos
- Producir varias superficies de interpolación y normalizarlas para producir una imagen global precisa de las áreas exploradas.

En el capítulo 4 se presentan varios casos de estudio con la aplicación de este método y el respectivo análisis e interpretación de resultados.

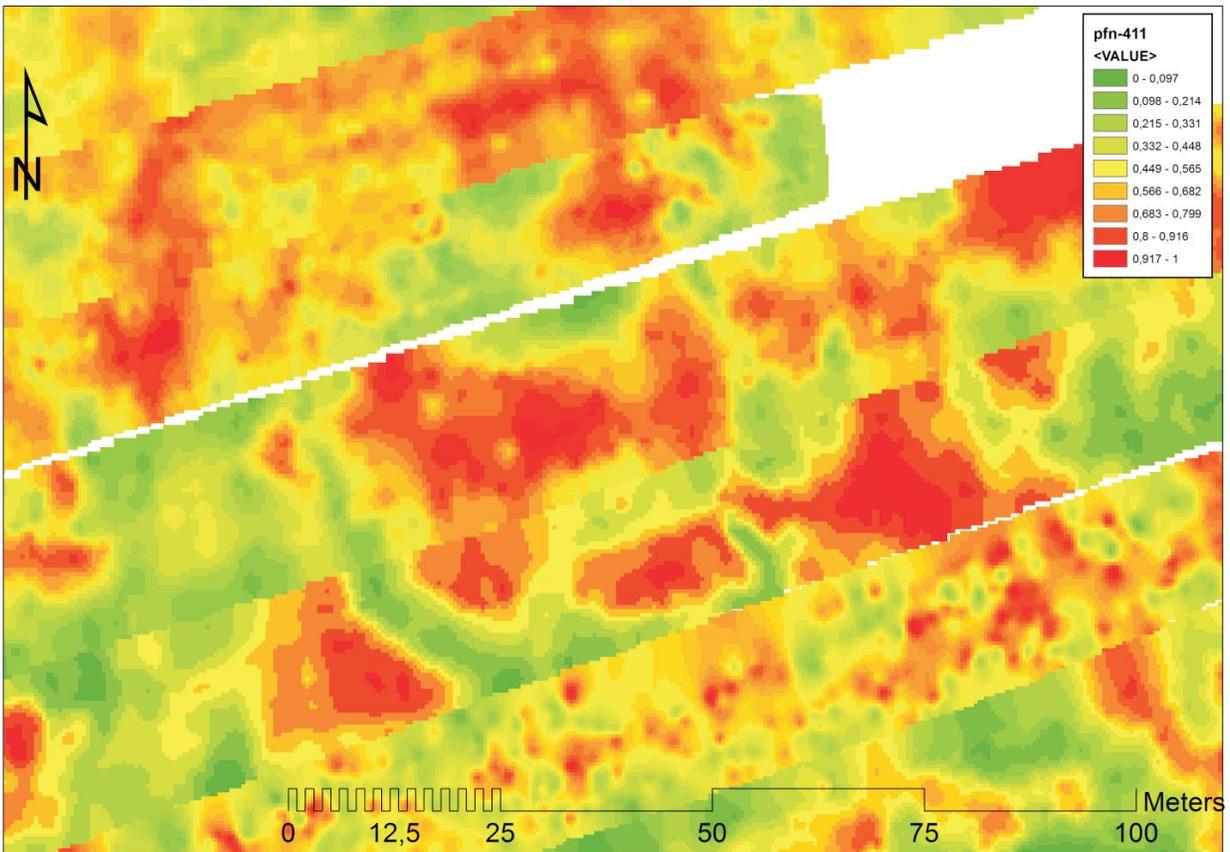


Figura 6 Mapa de CEA generado con un sistema VERIS en la ciudad romana de Contributa Iulia. Puede apreciarse con claridad cómo las variaciones permite reconocer una gran traza ovalada que se corresponde con el anfiteatro de la ciudad.

2.2.2.6.2. Elaboración de mapa de localización de líneas de la prospección

Se trazará para cada línea un perfil horizontal de la intensidad de la señal o de la resistividad aparente en cada ventana de tiempo, así como un mapa de localización de la estación o la fila y una topografía de la sección transversal.

Los mapas se suelen proporcionar como líneas de contorno o, más a menudo hoy en día, como un mapa de contorno en color, para mostrar la relación detallada entre la zona de estudio y las líneas de estudio. Incluye las líneas de reconocimiento y su ubicación relativa, escala y dirección, así como algunas otras características importantes como la topografía y las rutas de acceso.

2.2.2.6.3. Análisis del registro

Hay diferentes métodos que pueden aplicarse para estimar la ubicación y la profundidad de la fuente de la anomalía electromagnética, basados en el análisis de los datos. Se puede visualizar usando

varios gráficos, como mapas de contorno, escalas de grises, valores de cuadrícula o incluso superficies 3D.

2.2.2.6.4. Revisión de información existente

Es recomendable recopilar y revisar la información existente antes del levantamiento, como el contexto geológico y otros objetos que puedan interferir en los resultados medidos.

2.2.2.6.5. Interpretación del resultado

La siguiente interpretación requiere por lo general una experiencia más amplia, con una comprensión de las condiciones y la historia del sitio, los principios de la geofísica arqueológica, así como las limitaciones y lagunas de los instrumentos y metodologías de prospección.

Debe quedar claro cómo se hizo la interpretación, así como la división entre el razonamiento objetivo y la inferencia más subjetiva. La interpretación de los datos geofísicos implica inevitablemente conjeturas, pero no debe haber dudas sobre las áreas de incertidumbre. Es preferible ejercer la mayor objetividad y moderación posibles.

2.2.2.7. Elaboración de informes

Los siguientes elementos deben incluirse en los resultados del estudio:

- Mapa de ubicación de la prospección
- Mapas de posiciones de estaciones / líneas (o secciones transversales)
- Perfil horizontal de resistividad
- Secciones transversales de resistividad
- Mapa de vista en planta mapa de resistividad
- Compuesto de secciones transversales de análisis general
- Mapa de vista en planta de análisis general
- Curvas de fuerza de señal o resistividad aparente.

El informe deberá incluir:

- Resumen de Resultados
- Introducción
- Métodos (técnicas y metodologías)
- Resultados
- Conclusiones
- Agradecimientos
- Declaración de indemnización
- Referencias
- Apéndices.

2.3. Geo-radar

2.3.1. Principios de funcionamiento (basis theory)

El radar de penetración en el suelo, GPR, es un método geofísico de alta resolución, que se basa en la propagación de ondas electromagnéticas de alta frecuencia. El método GPR muestra las estructuras en el suelo que están relacionadas con los cambios en las propiedades dieléctricas. En los sedimentos, el contenido de agua provoca cambios en las propiedades dieléctricas, es decir, las propiedades que definen la capacidad de los materiales para acumular carga eléctrica. Por lo tanto, el GPR puede utilizarse para estimar el contenido de agua del suelo.



Figura 7 Georadar multicanal modelo IDS Stream C perteneciente al Instituto de Arqueología. Este tipo de sensores permite obtener barridos de alta densidad capaces de definir con gran resolución los restos enterrados.

2.3.2. Aplicabilidad

La configuración de las antenas GPR permite alcanzar diferentes profundidades, dependiendo del objetivo del estudio. Esta es una de las grandes ventajas del GPRS, que en un solo estudio puede proporcionar información útil tanto para los agricultores como para los arqueólogos. Es posible definir la profundidad de interés para cada uno, abriendo la posibilidad de conciliar la exploración del terreno, tanto para la agricultura como para la arqueología.

Los tiempos de respuesta del GPR difieren con las propiedades del terreno y las estructuras que las ondas electromagnéticas detectan en profundidad. La existencia de agua en el suelo es uno de los factores que influyen en los tiempos de llegada de las olas. El agua tiene propiedades dieléctricas que "ralentizan" la reflexión de las ondas electromagnéticas emitidas por el GPR. Por lo tanto, en el análisis e interpretación de los resultados es posible zonificar el área de la tierra de interés para la granja. Por otra parte, debido a la posibilidad de análisis en 3D, también es posible delimitar un área, de modo que la tierra permanezca utilizable pero no se destruya ninguna estructura de interés arqueológico.

2.3.3. Principios básicos en el desarrollo del trabajo

2.3.3.1. Instrumentación

El GPR consiste en un generador de señales, una antena que realiza tanto funciones de transmisión como de recepción, o un par de antenas con funciones separadas. La señal obtenida puede visualizarse y registrarse en sistemas propietarios o acoplarse a una computadora personal. De esta manera, es posible visualizar en el campo, reprocesar y controlar los datos adquiridos.

El pulso se propaga en el aire a la velocidad de la luz (0,3 metros/nanosegundos - m/ns) y en el suelo a una velocidad menor. La señal emitida consiste en una o más repeticiones del mismo pulso, y la propagación de una señal en un entorno heterogéneo provoca reflexiones y refracciones que son detectadas por la antena receptora.

Las condiciones del suelo influyen en la propagación de las ondas electromagnéticas. Un suelo saturado atenuará la señal debido a las características del agua (buena conductividad).



Figura 8 Geo-radar. Fuente: GSSI

2.3.3.2 Profundidad factible de sonda de levantamiento

La profundidad alcanzada depende de varios factores, entre ellos, la atenuación (retardo y disipación de la señal), la frecuencia de la señal y la conductividad de los materiales atravesados.

La resolución, a su vez, depende de la velocidad de propagación en el medio y la longitud de onda del pulso. A medida que el pulso se propaga, se produce una disminución de la energía, atenuación, debido al mayor volumen de tierra atravesado y a las pérdidas intrínsecas resultantes de las cargas o partículas en movimiento. Las propiedades electromagnéticas de los materiales dependen de la frecuencia del pulso y la atenuación aumenta con la frecuencia.

2.3.3.3 Planificación de la adquisición de datos

La prospección se realiza delimitando un conjunto de perfiles paralelos, insertados dentro de una o más áreas. El espacio entre estos perfiles está determinado por el objetivo del estudio (por la necesidad de mucha/ninguna resolución) y/o por el tamaño de las estructuras a cartografiar. En el caso de la agricultura, los perfiles pueden tener un mayor espaciamiento entre ellos, siendo posible cubrir áreas más grandes en poco tiempo.

Las zonas y los perfiles deben decidirse teniendo en cuenta la frecuencia de las antenas, la velocidad del georradar (debe ser constante), la topografía y las condiciones de la superficie del terreno.

2.3.3.4 Localización de la prospección

En la ubicación del estudio se tendrán en cuenta las condiciones del suelo (saturado/insaturado) y la geología local, así como la infraestructura y los objetos que puedan interferir en el proceso de adquisición de datos, como los postes de alto voltaje cercanos o los teléfonos móviles conectados al dispositivo.

2.3.3.5 Operación de campo

El levantamiento se hace seleccionando una o más áreas y dibujando perfiles lineales con el georradar, igualmente espaciados. El espaciamiento define la resolución espacial de los datos y la profundidad alcanzada, parámetros que se definen según el propósito del estudio.

Normalmente se necesitan dos operadores, uno responsable del georradar y otro que observe la adquisición de datos en tiempo real a través de una computadora. Así pues, es posible preprocesar y supervisar todo el proceso para corregir o adaptar los parámetros según las condiciones del campo.

Es importante tomar notas sobre las condiciones del lugar, como la existencia de vegetación, la saturación del suelo, las estructuras urbanas, etc., a fin de correlacionar la información más adelante en el tratamiento e interpretación de los resultados.

2.3.3.6.1. Métodos de análisis

El procesamiento de los datos de georradar, además del análisis del profesional y su experiencia, también depende de la calidad de los datos recogidos. Los radiogramas suelen requerir la aplicación de varios filtros, con carácter experimental, hasta que el resultado final es satisfactorio, a fin de permitir una correcta distinción e interpretación de las anomalías. El procesamiento suele incluir los siguientes pasos:

- Filtro de deconvolución para eliminar los ecos y el "ruido"
- Filtro *bandpass* para eliminar las frecuencias muy altas o muy bajas
- Filtro *moving average* para suavizar/minimizar algunos efectos que pueden enmascarar anomalías/contrusiones
- Filtro de *gaño* (AGC), para controlar la amplitud de la señal
- Migración. Existen varios métodos basados en diferentes enfoques teóricos más o menos complejos para determinar la velocidad de propagación de la señal electromagnética. Al estimar la velocidad, es posible estimar a qué profundidad se detectaron las anomalías
- Corrección topográfica, para corregir los efectos de la superficie en el suelo.

2.3.3.6.2. Elaboración de mapa de localización de líneas de la prospección

Los mapas pueden proporcionarse como líneas de contorno o, más a menudo hoy en día, como un mapa de contorno en color, para mostrar la relación detallada entre el área de estudio y las líneas de estudio. Incluye las líneas de reconocimiento y su ubicación relativa, escala y dirección, así como algunas otras características importantes como la topografía y las rutas de acceso.

2.3.3.6.3. Análisis del registro

Existen diferentes métodos que pueden aplicarse para estimar la ubicación y profundidad de la fuente de anomalía magnética, a partir del análisis del registro magnético. Se puede mostrar a través de varios gráficos, como mapas de contorno, escalas de grises, valores de cuadrícula o incluso superficies 3D.

2.3.3.6.4. Revisión de información existente

Es aconsejable recopilar y revisar la información existente antes del levantamiento, como las condiciones geológicas, las construcciones existentes, las tuberías y el material ferroso en y alrededor del área del levantamiento.

2.3.3.6.5. Interpretación del resultado

Las características del instrumento, la elección del método de prospección y las consideraciones del sitio deben tenerse en cuenta en la interpretación de los resultados. Se recomienda ser lo más objetivo posible.

2.3.3.7. Elaboración de informes:

Los siguientes elementos deben incluirse en los resultados de la prospección:

- Mapa de localización
- Mapa de disposición de líneas topográficas
- Tabla de catálogo de los puntos de origen de anomalías
- Mapa de ubicación de los puntos de origen de anomalías
- Registro de observación.

El reporte incluye:

- Resumen de Resultados
- Introducción
- Métodos (técnicas y metodologías)
- Resultados
- Conclusiones
- Agradecimientos
- Declaración de indemnización

- Referencias

- Apéndices.

2.4. Teledetección

La teledetección es de suma importancia en la observación e interpretación de fenómenos que ocurren en la superficie de la tierra a escala regional, ya que no solo permite el estudio de una amplia zona de observación, pero también permite la observación simultánea de todo el sistema circundante.

La principal fuente de energía radiante utilizada por la teledetección proviene del sol. Dependiendo de la naturaleza de los objetos en la superficie de la Tierra, el flujo de energía radiante que afecta a la Tierra puede transmitirse, dispersarse, absorberse, emitirse o reflejado por esos objetos.

Cualquier radiación electromagnética se puede caracterizar según su longitud de onda o su frecuencia. De esta forma, el espectro electromagnético consta de un conjunto de ondas electromagnéticas continuas, cuyo rango varía de longitudes de formas de onda cortas (del orden de micrómetros, como es el caso de los rayos gamma y los rayos X), hasta longitudes de onda largas (del orden de metros, como ondas de radio).

- **Región visible**, cuya designación se debe a que cubre la única radiación capaz de ser percibido por el ojo humano. Ocupa una pequeña porción del espectro, que comprende longitudes de onda de 0,4 μm a 0,7 μm , donde resaltar las bandas de azul (0,4 μm a 0,5 μm), verde (0,5 μm a 0,6 μm) y rojo (0,6 μm a 0,7 μm).

- **Región del infrarrojo próximo**, con longitudes de onda que van desde 0,7 μm hasta 1,3 μm .

- **Región del infrarrojo medio**, que incluye valores de 1,3 μm a 8 μm .

- **Región térmica infrarroja** (8 μm - 14 μm), sensible al calor emitido por los cuerpos.

- **Microondas**, región del espectro cuyo rango de valores varía entre 1 mm y 300 cm.

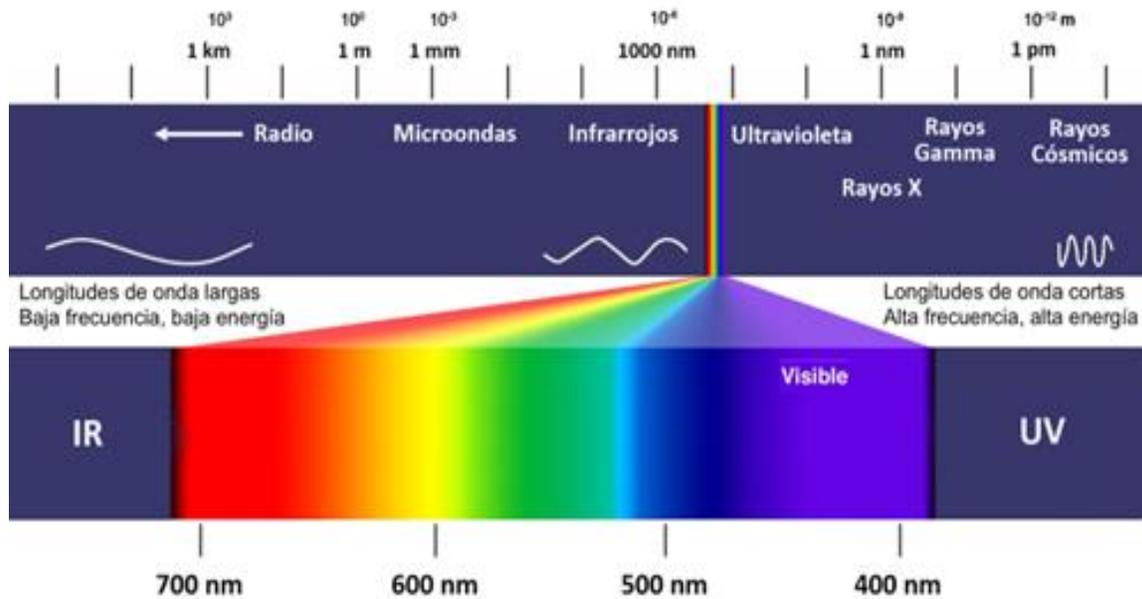


Figura 9 Espectro Electromagnético.

2.3.1 Comportamiento espectral del agua, suelos y vegetación

Con base en mediciones de laboratorio, fue posible establecer curvas de reflectividad espectral, ilustrado en la figura, para diferentes tipos de materiales que se encuentran en la superficie tierra, a saber, agua, vegetación y suelos.

Las imágenes obtenidas por este método se pueden visualizar en composiciones coloreadas, sin embargo, debe tenerse en cuenta que los niveles digitales no corresponden a las radiaciones originales registradas por el sensor. Estas imágenes se pueden utilizar para una mejor interpretación visual de las imágenes originales o como variables en la clasificación digital.

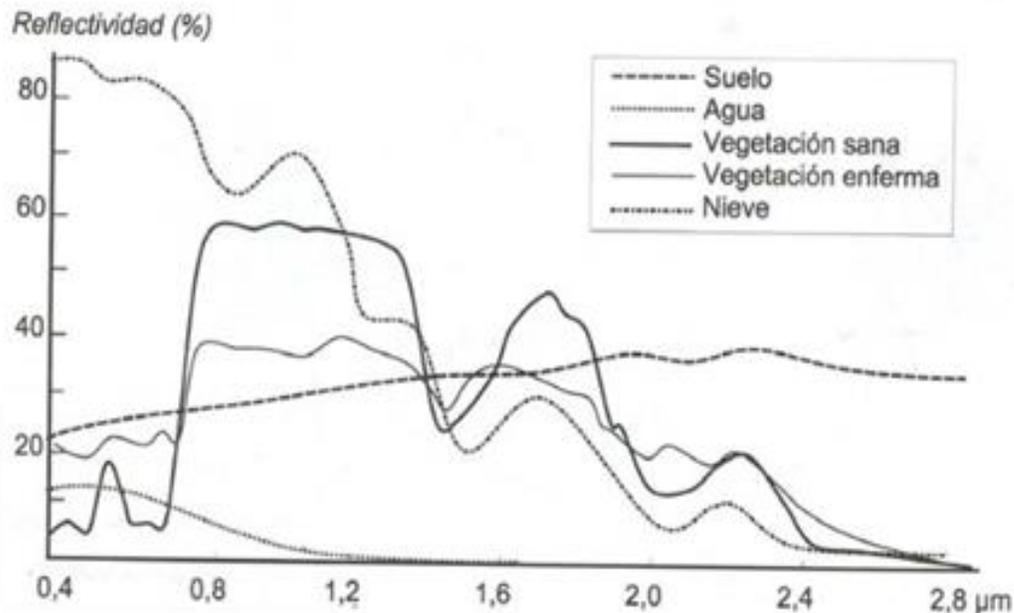


Figura 10 Gráfico de comportamiento espectral. Fuente: Chuvieco, 1995

El agua absorbe o transmite la mayor parte de la radiación a medida que aumenta la longitud de onda. Como consecuencia, su reflectividad disminuye a lo largo del espectro, siendo prácticamente nula en el infrarrojo. El comportamiento espectral del agua depende de la naturaleza y la concentración de los materiales en suspensión, la profundidad y la rugosidad de la superficie. En general, la presencia de materiales en suspensión aumenta la reflectividad del agua, como la clorofila, lo que provoca un aumento de la reflectividad en la banda verde de la región visible (Chuvieco, 1995).

La curva espectral de los suelos se caracteriza por una reflectividad relativamente baja en la región visible, que aumenta gradualmente con el aumento de la longitud de onda de la radiación. El comportamiento espectral de los suelos está condicionado por su composición química, su textura y su contenido de humedad.

La reflectividad de los suelos en la región visible está condicionada principalmente por la presencia de materia orgánica y el contenido de humedad, porque a medida que aumentan, la reflectividad disminuye. En relación con el infrarrojo cercano y medio, la respuesta espectral puede depender del contenido de humedad como consecuencia de la alta absorción de agua en estas bandas. No siempre es fácil adquirir información sobre el suelo mediante la teledetección debido a la

presencia de vegetación. En estos casos, los datos se deducen de la cubierta vegetal, ya que las especies vegetales dependen directamente de la naturaleza del suelo (Chuvienco, 1995).

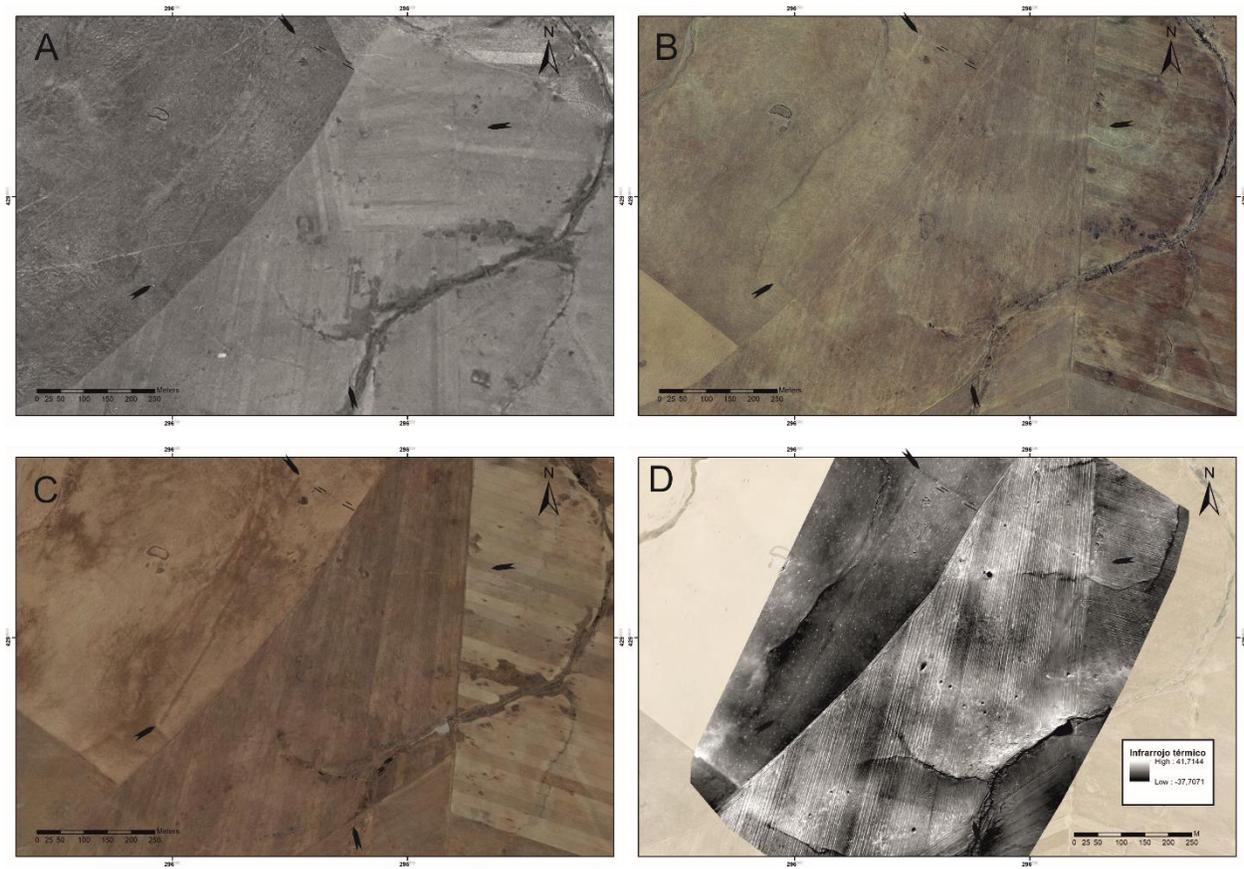


Figura 11 Ejemplo de visibilidad de estructuras arqueológicas debido a los contrastes de humedad captados en el espectro visible. Posible recinto campamental romano localizado en el término de Cabeza de Buey (Badajoz).

2.3.2 Espectro Visible

2.3.2.1. Principios de funcionamiento (basis theory)

El ojo humano captura la luz visible entre 400 y 700 nanómetros (nm) de área de longitud de onda, que corresponde aproximadamente a la región del espectro que utilizan las plantas para la fotosíntesis. La luz solar tiene un espectro continuo dentro y más allá de las longitudes de onda visibles. El ojo humano transforma diferentes longitudes de onda en colores en el cerebro humano. Las longitudes de onda cortas cercanas a 400 nm se perciben como color azul y las longitudes de onda más largas en el área de 600 nm se ven como luz roja. El ojo humano tiene la región más sensible en el área de longitud de onda amarillo-verde.

2.3.2.2. Aplicabilidad

Las imágenes en color o RGB (rojo, verde, azul) son útiles para reconocer síntomas de enfermedades, deficiencias, plantas dañadas, malezas específicas y especies de plantas en los campos de cultivo. La aparición de un objeto en imágenes RGB es el resultado de la luz reflejada por el objeto, sus características ópticas y la percepción humana. El análisis de imágenes basado en RGB se ha aplicado en la agricultura para la maleza discriminación mapeo de malezas y cultivos, proceso fisiológico variable en la superficie de una hoja y planta estar de pie contando (NDSU, 2020).

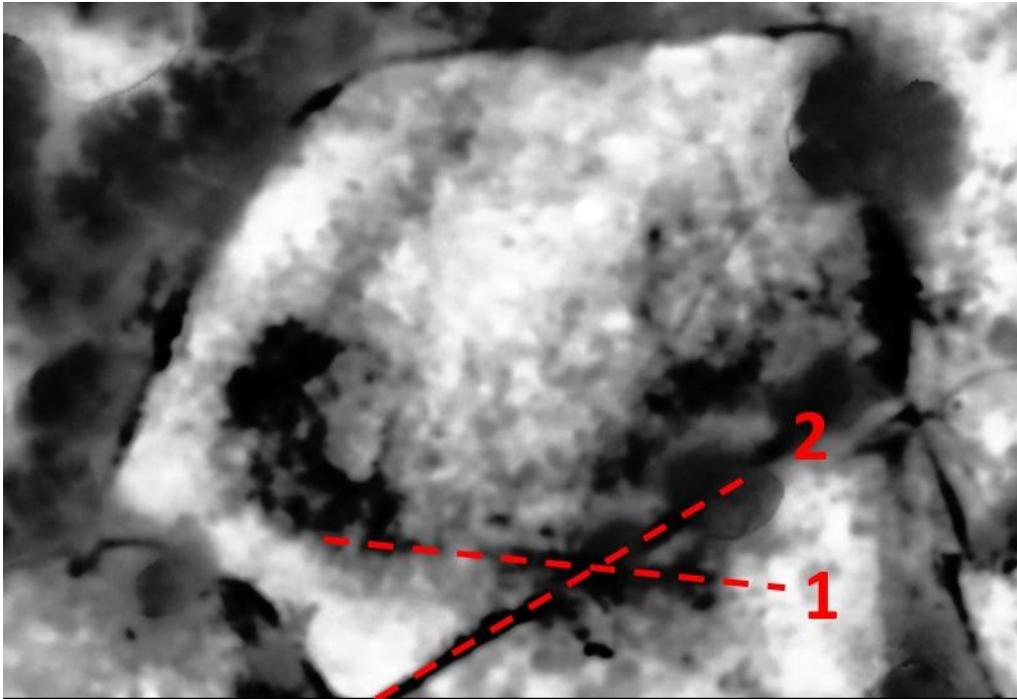


Figura 12. Ejemplo exitoso de la detección de estructuras arqueológicas en el subsuelo en virtud de los contrastes de emisividad de calor de diferentes materiales.

2.3.3 Infrarrojo térmico

2.3.3.1. Principios de funcionamiento (basis theory)

Las imágenes térmicas se basan en el hecho de que los objetos emiten energía infrarroja (calor) en función de su temperatura. En general, los objetos más cálidos emiten más radiación que los objetos más fríos. La cámara térmica infrarroja detecta la radiación en el rango infrarrojo del espectro electromagnético (800-1400nm) y se expresa como una imagen en falso color. Cada píxel de una térmica tiene un valor de temperatura único.

2.3.3.2. Aplicabilidad

Las imágenes térmicas pueden ser útiles para monitorear las temperaturas de la planta en un campo. Los agricultores pueden utilizar imágenes térmicas para monitorear los patrones de infección de enfermedades o la infestación de plagas en los campos de cultivo (los síntomas se detectan por el aumento de las temperaturas) (NDSU, 2020).

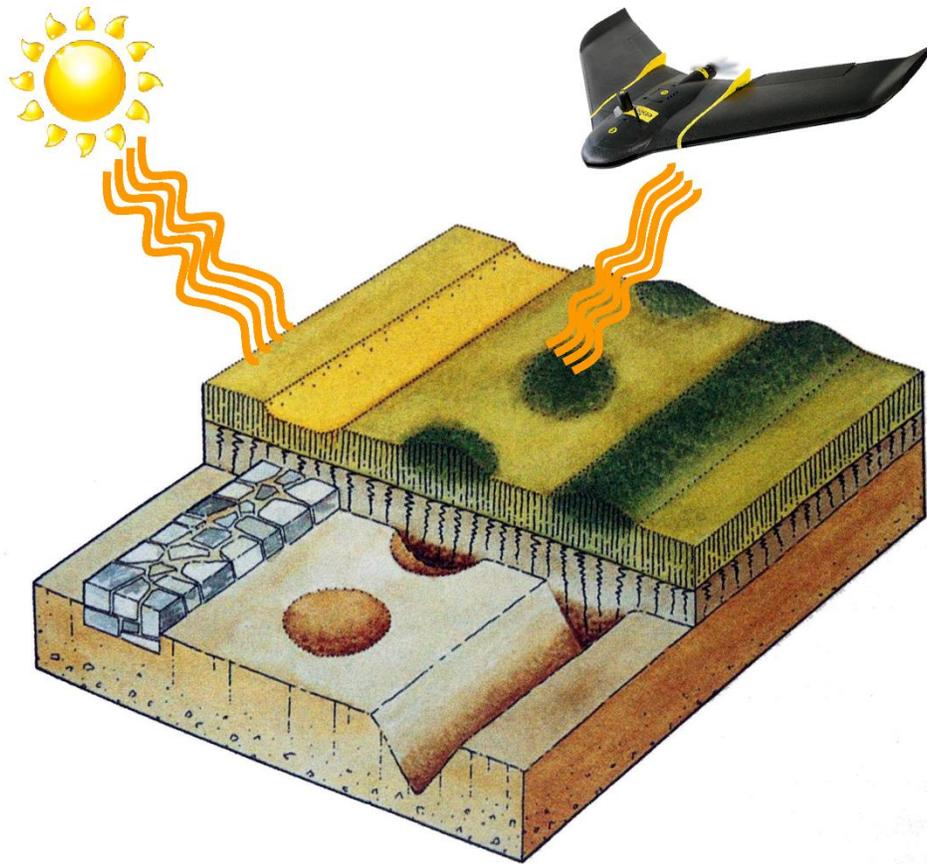


Figura 13. Principio de funcionamiento de las imágenes multiespectrales en Arqueología. La presencia de estructuras positivas (muros, cimentaciones) o negativas (fosos, silos, zanjas) determina el desarrollo diferencial de la vegetación en términos de estrés hídrico, vigor, senescencia y crecimiento.

2.3.4. Multiespectral

2.3.4.1. Principios de funcionamiento (basis theory)

Las imágenes multiespectrales consisten en información espectral de objetos en varias bandas de ondas del espectro. Los sensores multiespectrales suelen detectar información espectral electromagnética roja, verde y azul. espectros, y también el borde rojo y los rangos de onda del infrarrojo próximo.

2.3.4.2. Aplicabilidad

Los índices de vegetación, como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de banda son dos métodos poderosos para el procesamiento de imágenes multiespectrales. Estos métodos pueden utilizarse para identificar la salud de los cultivos, las especies de malezas, las lesiones posteriores a los herbicidas y los síntomas de las enfermedades.



Figura 14 Campaña de toma de imágenes con un drone equipado con cámaras multiespectral y térmica. Los sistemas actuales tienden a la interoperabilidad y miniaturización de los sensores.

2.3.5. Hiperespectral

2.3.5.1. Principios de funcionamiento (basis theory)

Las cámaras hiperespectrales miden la reflectancia espectral de las plantas en todo el espectro visible, infrarrojo próximo y porciones de infrarrojo medio (350-2500 nm) del espectro electromagnético en anchos de banda de 5 a 10 nm.

2.3.5.2. Aplicabilidad

La reflectancia espectral de especies de plantas individuales en el dosel o en la escala de una sola hoja es única y a como una firma espectral. Las mediciones de reflectancia espectral son el primer paso para determinar la potencial de datos espectrales remotos para clasificar malezas y cultivos, e identificar síntomas de enfermedades.

La absorción de la luz por los pigmentos de las plantas, la estructura de las plantas y la química de las hojas producen un espectro espectral único firmas que son útiles para monitorear las condiciones del cultivo (NDSU, 2020).

Bibliografía

Chuvieco, E. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid, Ediciones Rialp, S.A., 1995.

Europae Archaeologiae Consilium. *EAC Guidelines for the Use of Geophysics in Archaeology: Questions to Ask and Points to Consider*. Namur, Europae Archaeologiae Consilium (EAC), Association Internationale sans But Lucratif (AISBL), 2015, www.e-a-c.org.

Gaffney, C., and J. Gater. *Revealing the Buried Past: Geophysics for Archaeologists*. Stroud, Tempus Publishing, 2003.

Heil, K., and U. Schmidhalter. "The Application of EM38: Determination of Soil Parameters, Selection of Soil Sampling Points and Use in Agriculture and Archaeology." *Environmental Science, Computer Science, Medicine* [Basel], 2017.

North Dakota State University (NDSU). "Basics of Remote Sensing for Agricultural Applications." https://www.ag.ndsu.edu/agmachinery/documents/pdf/basics_for_remote_sensing. Consultado em 2020.

Terrón, J. M., et al. "Use of Soil Apparent Electrical Resistivity Contact Sensors for the Extensive Study of Archaeological Sites." *Archaeological Prospection*, Mayo 2015.

3. MÉTODOS NO INVASIVOS EN ARQUEOLOGÍA

3.1. Gradiometria

3.1.1. Principios de funcionamiento (basis theory)

Este método puede identificar objetos magnetizados termorremanentes como hornos, zanjas, fosas rellenas y áreas de actividad industrial. La magnetización termorremanente ocurre cuando los materiales ricos en óxidos de hierro se calientan por encima de su temperatura de Curie y luego se dejan enfriar en el ambiente magnético de la Tierra. El calentamiento intenso y muchas prácticas culturales provocan la termorremanencia desde los fuegos para cocinar hasta las chimeneas permanentes, los hornos o la quema de una estructura.

Algunos fabricantes han adaptado sus sistemas para permitir que varios sensores se monten horizontalmente en paralelo, lo que permite recopilar dos o más recorridos de datos simultáneamente.



Figura 15 Gradiómetro multicanal con conexión GPS. Este tipo de sistemas permiten capturar un gran volumen de datos con georeferenciación en tiempo real.

3.1.2. Aplicabilidad

Las principales razones para elegir un estudio con magnetómetro están relacionadas con una cobertura terrestre rápida y una buena respuesta a una variedad de anomalías creadas por la actividad humana pasada. El levantamiento magnético detallado se puede utilizar para definir de manera efectiva áreas de actividad humana pasada mediante el mapeo de la variación espacial y el contraste en las propiedades magnéticas del suelo, subsuelo y lecho rocoso (Bickler et al., 2017). Las características del subsuelo se pueden distinguir y caracterizar mediante el mapeo sistemático de anomalías magnéticas.

3.1.3. Principios básicos en el desarrollo del trabajo:

3.1.3.1. Instrumentación

El levantamiento magnético se lleva a cabo utilizando un gradiómetro/magnetómetro, un instrumento que consta de dos sensores montados verticalmente a una distancia de 0,5 o 1 m. El instrumento se lleva a unos 0,3 m sobre la superficie del suelo y el sensor superior mide el campo magnético de la Tierra, mientras que el sensor inferior mide el mismo campo, pero también se ve afectado por cualquier campo enterrado localizado. La diferencia entre los dos sensores se relacionará con la fuerza de un campo magnético creado por una característica enterrada, y si no hay ningún campo presente, la diferencia será cercana a cero ya que el campo magnético medido por ambos sensores será el mismo (Bickler et al., 2017). Este instrumento puede combinar una sensibilidad del orden de 0,1 nT (nanotesla).



Figura 16 Gradiómetro GRAD 601 (Bartington)

3.1.3.2. Profundidad factible de sonda de levantamiento

La profundidad factible depende del espaciado de la línea de levantamiento, el tamaño del objetivo y el eventual ruido magnético en el área.

3.1.3.3. Planificación de la adquisición de datos

Independientemente del tipo de magnetómetro que se utilice, el operador debe estar completamente familiarizado no solo con los manuales suministrados con él (y cualquier actualización proporcionada por el fabricante), sino también con los principios físicos del instrumento. Las recomendaciones deben aplicarse para el mantenimiento del equipo y el procedimiento de inspección.

El área de levantamiento generalmente se divide en series de cuadrículas de datos cuadradas o rectangulares regulares, cada una de las cuales se levanta realizando varios recorridos paralelos igualmente espaciados. Algunos sistemas de magnetómetros recientes pueden integrarse directamente con un sistema GPS / GNSS para registrar la posición de cada

medición y obviar la necesidad de una cuadrícula de levantamiento preestablecida. La disposición de las líneas de la encuesta debe adaptarse a los objetivos y metas de la encuesta.



Figura 17 Flujo de trabajo con la prospección magnética, desde la captura de datos en campo a la difusión de los resultados.

3.1.3.4. Localización de la prospección

Los campos abiertos con césped corto son propicios para la adquisición de datos, pero las interrupciones causadas por los límites del campo y los obstáculos naturales como los árboles pueden interferir tanto con la cobertura como con la velocidad del levantamiento. En áreas urbanas, este método puede no ser tan útil, a menudo puede haber interferencias causadas por líneas eléctricas, tuberías de servicio modernas y otros desechos ferrosos.

3.1.3.5. Operación de campo

Antes de comenzar, el magnetómetro debe estar correctamente preparado para su uso. Las condiciones de campo pueden dictar el tipo y la configuración de los magnetómetros más prácticos de emplear. Los magnetómetros deben calibrarse colocándolos en un campo magnético variable de valor conocido.

La velocidad de movimiento del sensor (caminar) debe ser lo más constante posible y el operador debe eliminar todas las fuentes de interferencia magnética de su ropa y cuerpo, incluso las monedas.

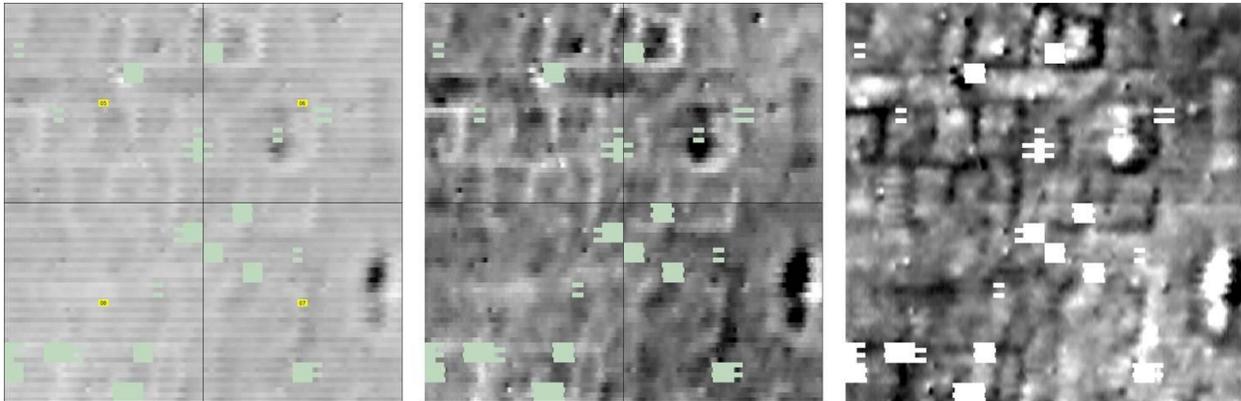


Figura 18 Ejemplo de proceso digital de los datos de una prospección magnética, desde la información bruta a los datos corregidos y filtrados.

3.1.3.6. Análisis

3.1.3.6.1. Métodos de análisis

Un examen visual cuidadoso de todo el conjunto de datos es siempre un buen procedimiento; sin embargo, ahora hay disponibles muchos algoritmos diferentes para eliminar y reemplazar picos. En general, hay dos métodos para: analizar datos de levantamientos magnéticos:

- Análisis de la forma de onda de anomalías magnéticas en cada línea de levantamiento:

Si se detectan anomalías de una sola fuente en varias líneas, el resultado del análisis debe recopilarse sistemáticamente como un solo punto de fuente anómala. Analiza la amplitud, período y fase de las anomalías.

- Análisis del patrón de anomalías magnéticas a través de un mapa de contorno:

El método utiliza la información de las ubicaciones de los picos positivos y negativos y sus valores de anomalía en los contornos. Requiere suficientes datos digitales y cierto grado de subjetividad para definir las curvas de nivel.

3.1.3.6.2. Elaboración de mapa de localización de líneas de la prospección

Los mapas se proporcionan generalmente como líneas de contorno o, más frecuentemente en la actualidad, como un mapa de contorno de color, para mostrar la relación detallada entre el área de levantamiento y las líneas de levantamiento. Incluye las líneas topográficas y sus ubicaciones relativas, escala y dirección, así como algunas otras características importantes, como la topografía y las rutas de acceso.

3.1.3.6.3. Análisis del registro

Existen diferentes métodos que pueden aplicarse para estimar la ubicación y profundidad de la fuente de anomalía magnética, a partir del análisis del registro magnético. Se puede mostrar a través de varios gráficos, como mapas de contorno, escalas de grises, valores de cuadrícula o incluso superficies 3D.

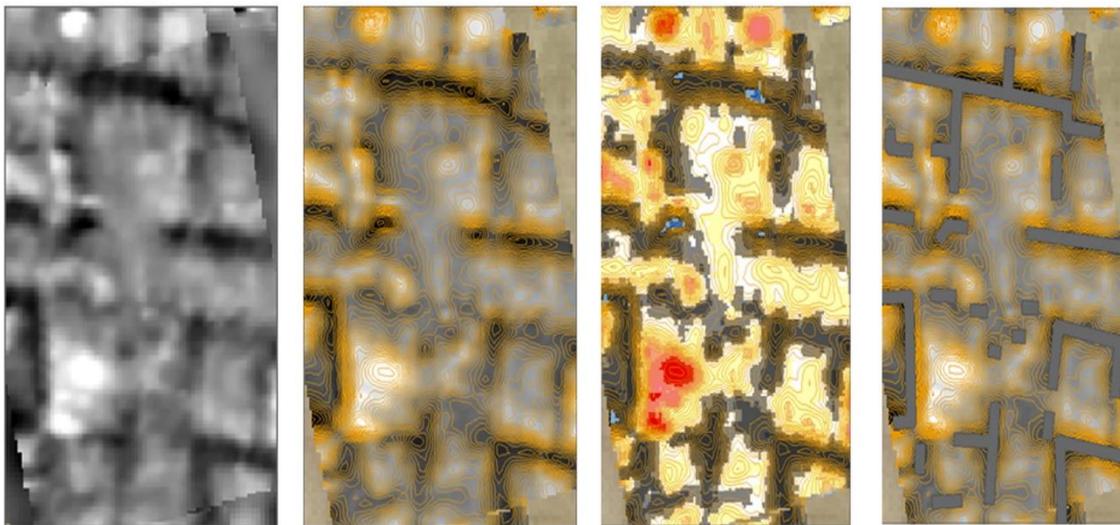


Figura 19 Prospección geomagnética, análisis de los datos para su reclasificación e interpretación.

3.1.3.6.4. Revisión de información existente

Es aconsejable recopilar y revisar la información existente antes del levantamiento, como las condiciones geológicas, las construcciones existentes, las tuberías y el material ferroso en y alrededor del área del levantamiento.

3.1.3.6.5. Interpretación del resultado

Las características del instrumento, la elección del método de prospección y las consideraciones del sitio deben tenerse en cuenta en la interpretación de los resultados. La falta de anomalías geofísicas no puede implicar la inexistencia de características enterradas. Se recomienda ser lo más objetivo posible.

3.1.3.7. Elaboración de informes.

Los siguientes elementos deben incluirse en los resultados de la prospección:

- Mapa de localización
- Mapa de disposición de líneas topográficas
- Tabla de catálogo de los puntos de origen de anomalías
- Mapa de ubicación de los puntos de origen de anomalías
- Registro de observación.

El informe deberá incluir las siguientes secciones:

- Resumen de Resultados
- Introducción
- Métodos (técnicas y metodologías)
- Resultados
- Conclusiones
- Agradecimientos
- Declaración de indemnización
- Referencias
- Apéndices.

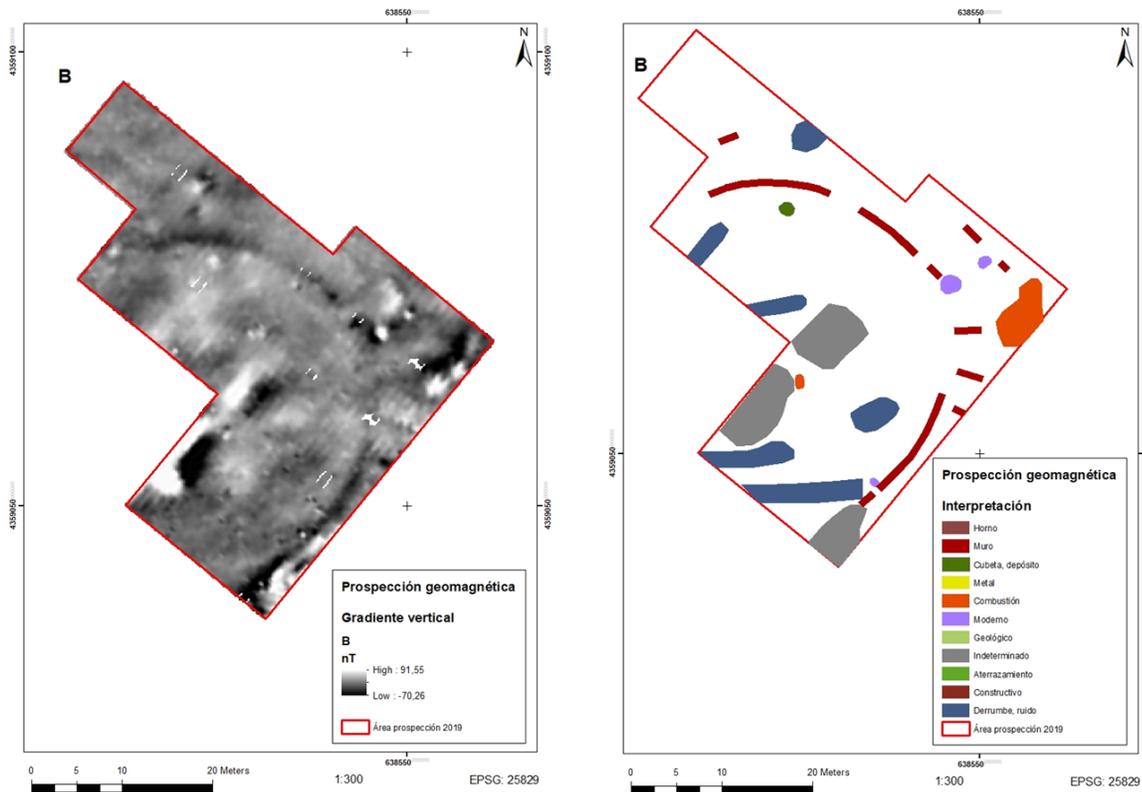


Figura 20 *Prospección geomagnética, presentación y lectura interpretativa para la emisión de informe.*

3.2 Inducción electromagnética (EM-38)

3.2.1. Principios de funcionamiento (basis theory)

La susceptibilidad magnética mide cuánto se magnetizará un material en un campo magnético aplicado. El método detecta la diferencia de propiedades electromagnéticas del suelo: un material diferente presenta una respuesta electromagnética diferente.

Las propiedades magnéticas del suelo son el resultado del contenido en el perfil del suelo de minerales magnéticos (principalmente óxidos e hidróxidos de hierro) tanto de origen natural como antropogénico. Los residuos quemados y también la incorporación de asentamientos y desechos industriales en los suelos pueden mejorar su valor de susceptibilidad magnética.

Una alta concentración de esos elementos ferromagnéticos se encuentra preferentemente en la capa superficial del suelo: las fuentes de susceptibilidad magnética no antropogénica pueden ser: la litología del lecho rocoso, que produce magnetita del tamaño de arena o del tamaño de arcilla; y las actividades microbianas y bacterianas. Sin embargo, la presencia de actividad humana generalmente aumenta la susceptibilidad magnética de los sedimentos debido a la adición de material quemado y orgánicos. Al medir la susceptibilidad

magnética a una escala relativamente gruesa, podemos detectar áreas de ocupación humana y basureros.

3.2.2. Aplicabilidad

La técnica se utiliza en investigaciones arqueológicas para detectar diversos escenarios, tales como: detección de asentamientos, actividad industrial, áreas de quema, sistemas de campo y uso del suelo. La susceptibilidad magnética de la capa superficial del suelo también se considera al interpretar los datos del magnetómetro o al evaluar la idoneidad de los diferentes tipos de suelo y geología antes de realizar un estudio detallado. Se logra una resolución más alta utilizando frecuencias más altas.

3.2.3. Principios básicos en el desarrollo del trabajo:

3.2.3.1. Instrumentación

El medidor de conductividad terrestre EM38 está compuesto por un transmisor y una bobina receptora instalados 1m de distancia en una barra no conductora en los extremos opuestos del instrumento. La bobina del transmisor se energiza con una corriente alterna de una batería de 9 V, que genera un campo magnético variable en el tiempo en la tierra. Este campo magnético hace que la corriente fluya en el suelo, produciendo un campo magnético secundario. La medida es una función de las diferentes conductividades en el subsuelo y otros factores, como la orientación y distancia de las bobinas, frecuencia de funcionamiento y la susceptibilidad magnética.

Este instrumento no necesita contacto con el suelo, es portátil y puede remolcarse con vehículos ligeros.

3.2.3.2. Profundidad factible de sonda de levantamiento

El rango de profundidad investigado depende de la separación de la bobina dentro del instrumento. La bobina la distancia se fija con el EM38. La profundidad de investigación se limita a donde el efecto de una capa se considera "ruido" para el instrumento. Los autores generalmente utilizan un límite del 10%. Por EM38, la definición y simplificación más común

es un rango de profundidad de hasta 1,5 m utilizando el modo de dipolo vertical. Con el modo dipolo horizontal, la profundidad de penetración se reduce a 0,75 m.

3.2.3.3. Planificación de la adquisición de datos

Se debe tener cuidado de tener en cuenta la presencia de depósitos, la influencia del uso reciente de la tierra y las condiciones del campo en el momento del levantamiento que pueden reducir el contacto entre una bobina de campo y la superficie del suelo.

3.2.3.4. Localización de la prospección

Este método no se aplica en áreas cercanas a fuentes de ruido, como líneas de alta tensión, líneas eléctricas, generadores, motores, torres de radio, etc. Es importante que la encuesta se lleve a cabo fuera de las áreas urbanas debido a diversas fuentes de ruido electromagnético y metal objetos.

3.2.3.5. Operación de campo

La medición se realiza conectando el receptor con el lazo o bobina.

Los parámetros de adquisición incluyen:

- Tamaño y corriente del bucle del transmisor
- Ventana de tiempo por cada canal y período de tiempo de observación
- Tiempo de rampa
- Número de apilamientos.

3.2.3.6. Análisis

3.2.3.6.1. Métodos de análisis

Se describe un posible procedimiento para analizar los datos:

- Importar los datos a un entorno GIS para la reducción de errores y el análisis.
- Filtra y corrige los datos

- Producir múltiples superficies de interpolación y normalizarlas para producir una imagen global precisa de las áreas escaneadas.

En el capítulo 4 se presentan varios estudios de casos con la aplicación de este método y los respectivos análisis e interpretación de los resultados.

3.2.3.6.2. Elaboración de mapa de localización de líneas de la prospección

Se debe trazar un perfil horizontal de la fuerza de la señal o resistividad aparente en cada ventana de tiempo para cada línea, así como un mapa de ubicación de estaciones / líneas y una topografía de sección transversal.

Los mapas se proporcionan generalmente como líneas de contorno o, con mayor frecuencia hoy en día, como un mapa de contorno de color, para mostrar la relación detallada entre el área de levantamiento y las líneas de levantamiento. Incluye las líneas topográficas y sus ubicaciones relativas, escala y dirección, así como algunas otras características importantes,

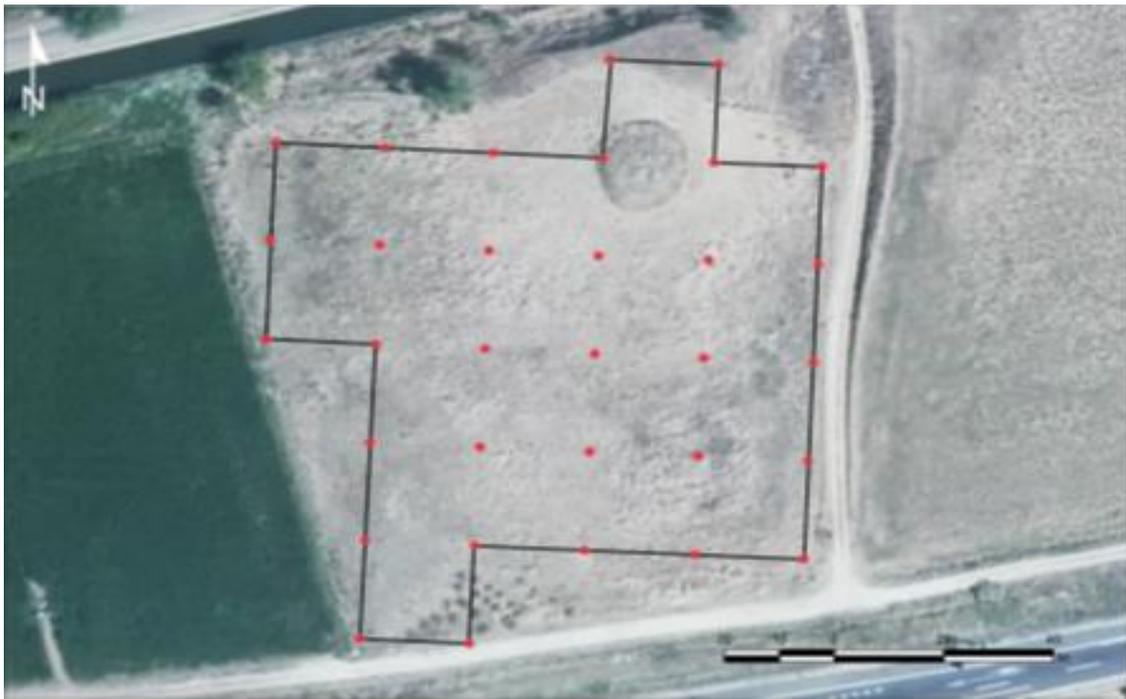


Figura 21 Ejemplo de rejilla planteada para la exploración con gradiómetro de una zona arqueológica.

como topografía y rutas de acceso.

3.2.3.6.3. Análisis del registro

Existen diferentes métodos que pueden aplicarse para estimar la ubicación y profundidad de la fuente de anomalía electromagnética, a partir del análisis de los datos. Se puede mostrar a través de varios gráficos, como mapas de contorno, escalas de grises, valores de cuadrícula o incluso superficies 3D.

3.2.3.6.4. Revisión de información existente

Es recomendable recopilar y revisar la información existente antes del levantamiento, como el contexto geológico y otros objetos que puedan interferir en los resultados medidos.

3.2.3.6.5. Interpretación del resultado

La interpretación que sigue generalmente requiere una experiencia más amplia, con una comprensión de las condiciones del sitio y su historia, los principios de la geofísica arqueológica, así como las limitaciones y lagunas de los instrumentos y las metodologías de levantamiento.

Debe quedar claro cómo se hizo la interpretación, así como la división entre razonamiento objetivo e inferencia más subjetiva. La interpretación de los datos geofísicos inevitablemente incluye conjeturas, pero no debe haber duda de dónde se encuentran las áreas de incertidumbre. Es preferible ejercitar la mayor objetividad y moderación posible.

3.2.3.7. Elaboración de informes

Los siguientes elementos deben incluirse en los resultados del estudio:

- Mapa de ubicación del estudio
- Mapas de posiciones de estaciones / líneas (o secciones transversales)
- Perfil horizontal de resistividad
- Secciones transversales de resistividad
- Mapa de vista en planta mapa de resistividad
- Compuesto de secciones transversales de análisis general
- Mapa de vista en planta de análisis general
- Curvas de fuerza de señal o resistividad aparente.

El reporte incluye:

- Resumen de Resultados
- Introducción
- Métodos (técnicas y metodologías)
- Resultados
- Conclusiones
- Agradecimientos
- Declaración de indemnización
- Referencias
- Apéndices.

3.3. Geo-radar

3.3.1. Principios de funcionamiento (basis theory)

El radar de penetración en el suelo, GPR, es un método geofísico de alta resolución, que se basa en la propagación de ondas electromagnéticas de alta frecuencia. El método GPR muestra las estructuras en el suelo que están relacionadas con los cambios en las propiedades dieléctricas. En los sedimentos, el contenido de agua provoca cambios en las propiedades dieléctricas, es decir, las propiedades que definen la capacidad de los materiales para acumular carga eléctrica. Por lo tanto, el GPR puede utilizarse para estimar el contenido de agua del suelo.



Fig. 3.3 - Geo-radar. Fuente: GSSI

3.3.2. Aplicabilidad

La configuración de las antenas GPR permite alcanzar diferentes profundidades, dependiendo del objetivo del estudio. Esta es una de las grandes ventajas del GPRS, que en un solo estudio puede proporcionar información útil tanto para los agricultores como para los arqueólogos. Es posible definir la profundidad de interés para cada uno, abriendo la posibilidad de conciliar la exploración del terreno, tanto para la agricultura como para la arqueología.

Los tiempos de respuesta del GPR difieren con las propiedades del terreno y las estructuras que las ondas electromagnéticas detectan en profundidad. La existencia de agua en el suelo es uno de los factores que influyen en los tiempos de llegada de las olas. El agua tiene propiedades dieléctricas que "ralentizan" la reflexión de las ondas electromagnéticas emitidas por el GPR. Por lo tanto, en el análisis e interpretación de los resultados es posible zonificar el área de la tierra de interés para la granja. Por otra parte, debido a la posibilidad de análisis en 3D, también es posible delimitar un área, de modo que la tierra permanezca utilizable pero no se destruya ninguna estructura de interés arqueológico.



Figura 22 Georradar multicanal trabajando con georeferenciación en tiempo real gracias a la conexión del equipo con un sistema GNSS.

3.3.3. Principios básicos en el desarrollo del trabajo

3.3.3.1 Instrumentación

El GPR consiste en un generador de señales, una antena que realiza tanto funciones de transmisión como de recepción, o un par de antenas con funciones separadas. La señal obtenida puede visualizarse y registrarse en sistemas propietarios o acoplarse a una computadora personal. De esta manera, es posible visualizar en el campo, reprocessar y controlar los datos adquiridos.

El pulso se propaga en el aire a la velocidad de la luz (0,3 metros/nanosegundos - m/ns) y en el suelo a una velocidad menor. La señal emitida consiste en una o más repeticiones del mismo pulso, y la propagación de una señal en un entorno heterogéneo provoca reflexiones y refracciones que son detectadas por la antena receptora.

Las condiciones del suelo influyen en la propagación de las ondas electromagnéticas. Un suelo saturado atenuará la señal debido a las características del agua (buena conductividad).

3.3.3.2 Profundidad factible de sonda de levantamiento

La profundidad alcanzada depende de varios factores, entre ellos, la atenuación (retardo y disipación de la señal), la frecuencia de la señal y la conductividad de los materiales atravesados.

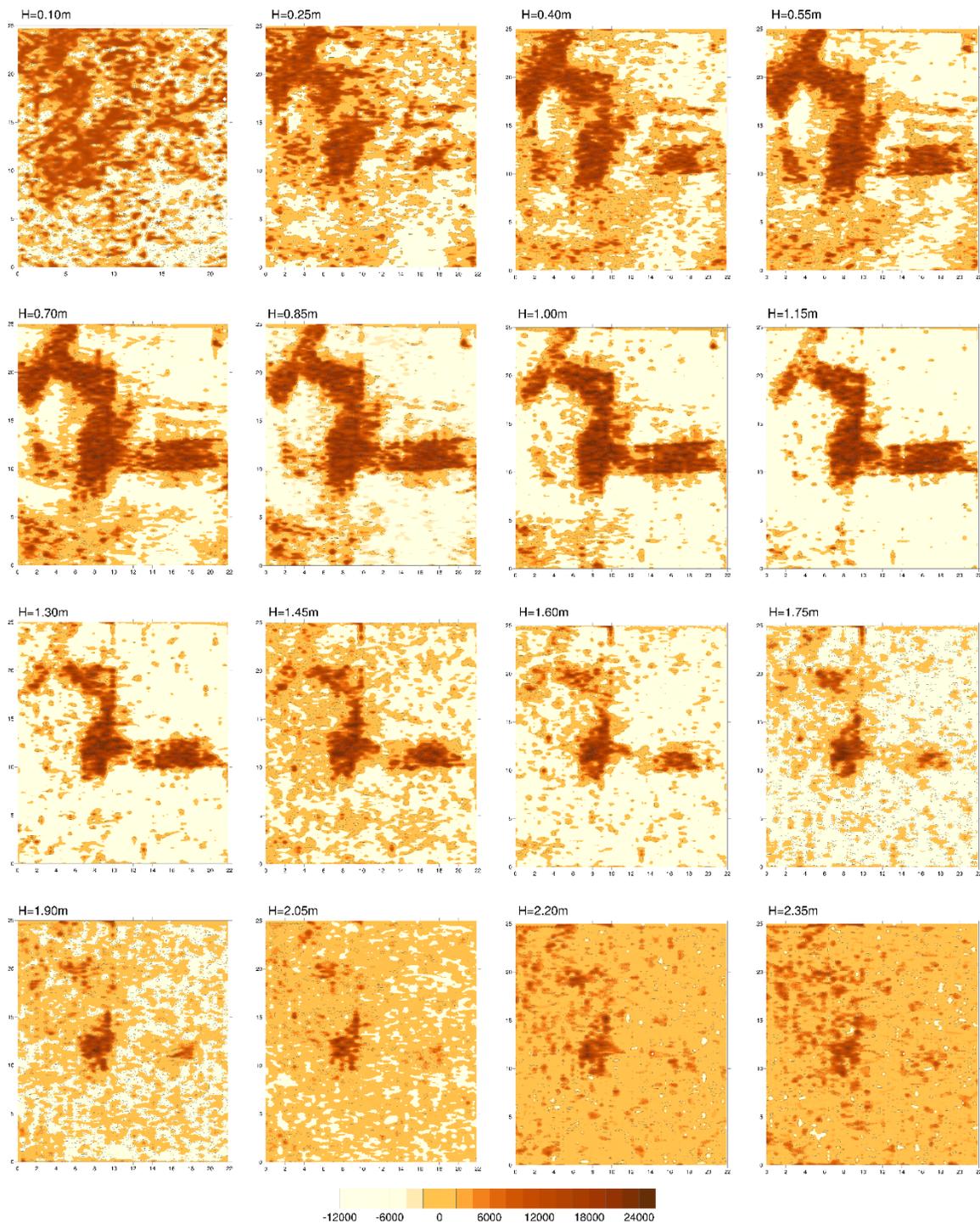


Figura 23 Ejemplo de serie de "time slices" correspondientes a las secciones de lectura del georradar a diferentes profundidades. Puede apreciarse la definición de potentes estructuras enterradas, correspondientes al poblado protohistórico de Villasviejas del Tamuja (Botija, Cáceres).

La resolución, a su vez, depende de la velocidad de propagación en el medio y la longitud de onda del pulso. A medida que el pulso se propaga, se produce una disminución de la energía, atenuación, debido al mayor volumen de tierra atravesado y a las pérdidas intrínsecas resultantes de las cargas o partículas en movimiento. Las propiedades electromagnéticas de los materiales dependen de la frecuencia del pulso y la atenuación aumenta con la frecuencia.

3.3.3.3. Planificación de la adquisición de datos

La prospección se realiza delimitando un conjunto de perfiles paralelos, insertados dentro de una o más áreas. El espacio entre estos perfiles está determinado por el objetivo del estudio (por la necesidad de mucha/ninguna resolución) y/o por el tamaño de las estructuras a cartografiar. En el caso de la agricultura, los perfiles pueden tener un mayor espaciamiento entre ellos, siendo posible cubrir áreas más grandes en poco tiempo.

Las zonas y los perfiles deben decidirse teniendo en cuenta la frecuencia de las antenas, la velocidad del georradar (debe ser constante), la topografía y las condiciones de la superficie del terreno.



Figura 24 Ejemplo de toma de datos con georradar monocanal empleando como referencia para los recorridos una rejilla planteada sobre el terreno.

3.3.3.4. Localización de la prospección

La ubicación del estudio tendrá en cuenta las condiciones del suelo (saturado / insaturado) y la geología local, así como las infraestructuras y objetos que puedan interferir con el proceso de adquisición de datos, como postes de alta tensión cercanos o teléfonos móviles conectados al dispositivo.

3.3.3.5. Operación de campo

El levantamiento se hace seleccionando una o más áreas y dibujando perfiles lineales con el georradar, igualmente espaciados. El espaciamiento define la resolución espacial de los datos y la profundidad alcanzada, parámetros que se definen según el propósito del estudio.

Normalmente se necesitan dos operadores, uno responsable del georradar y otro que observe la adquisición de datos en tiempo real a través de una computadora. Así pues, es posible preprocesar y supervisar todo el proceso para corregir o adaptar los parámetros según las condiciones del campo. Es importante tomar notas sobre las condiciones del lugar, como la existencia de vegetación, la saturación del suelo, las estructuras urbanas, etc., a fin de correlacionar la información más adelante en el tratamiento e interpretación de los resultados.

3.3.3.6. Análisis

3.3.3.6.1. Métodos de análisis

El procesamiento de los datos de georradar, además del análisis del profesional y su experiencia, también depende de la calidad de los datos recogidos. Los radiogramas suelen requerir la aplicación de varios filtros, con carácter experimental, hasta que el resultado final es satisfactorio, a fin de permitir una correcta distinción e interpretación de las anomalías. El procesamiento suele incluir los siguientes pasos:

- Filtro de deconvolución para eliminar los ecos y el "ruido"
- Filtro bandpass para eliminar las frecuencias muy altas o muy bajas
- Filtro moving average para suavizar/minimizar algunos efectos que pueden enmascarar anomalías/contrusiones
- Filtro de ganancia (AGC), para controlar la amplitud de la señal
- Migración. Existen varios métodos basados en diferentes enfoques teóricos más o menos complejos para determinar la velocidad de propagación de la señal electromagnética. Al estimar la velocidad, es posible estimar a qué profundidad se detectaron las anomalías
- Corrección topográfica, para corregir los efectos de la superficie en el suelo.

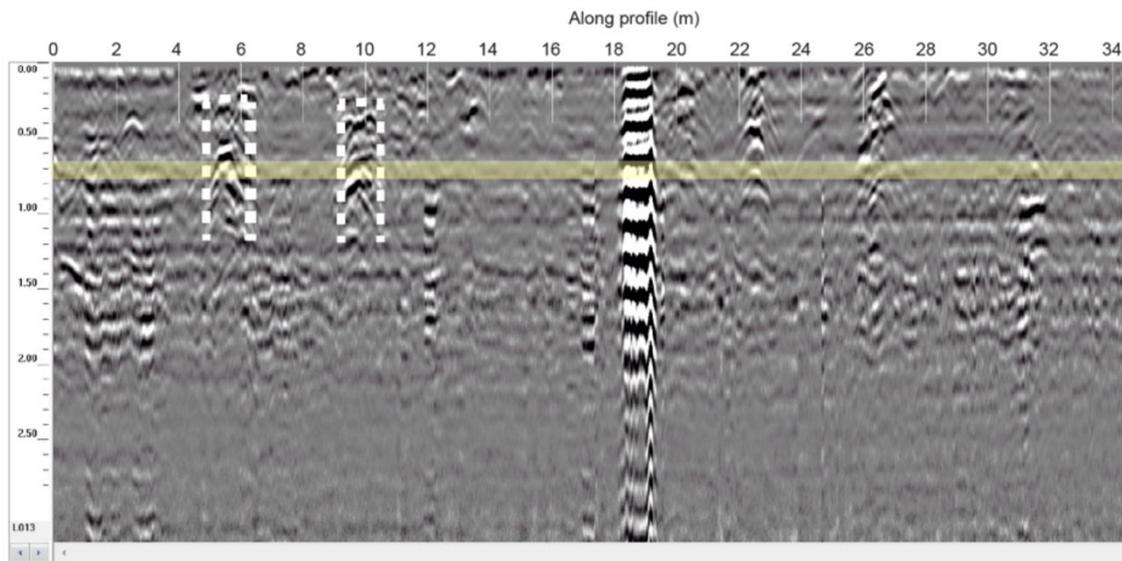


Figura 25 Ejemplo de radargrama en el que se aprecian anomalías identificables como muros de construcciones enterradas.

3.3.3.6.2. Elaboración de mapa de localización de líneas de la prospección

Los mapas pueden proporcionarse como líneas de contorno o, más a menudo hoy en día, como un mapa de contorno en color, para mostrar la relación detallada entre el área de estudio y las líneas de estudio. Incluye las líneas de reconocimiento y su ubicación relativa, escala y dirección, así como algunas otras características importantes como la topografía y las rutas de acceso.

3.3.3.6.3. Análisis del registro

Existen diferentes métodos que pueden aplicarse para estimar la ubicación y profundidad de la fuente de anomalía magnética, a partir del análisis del registro magnético. Se puede mostrar a través de varios gráficos, como mapas de contorno, escalas de grises, valores de cuadrícula o incluso superficies 3D.

3.3.3.6.4. Revisión de información existente

Es aconsejable recopilar y revisar la información existente antes del levantamiento, como las condiciones geológicas, las construcciones existentes, las tuberías y el material ferroso en y alrededor del área del levantamiento.

3.3.3.6.5. Interpretación del resultado

Las características del instrumento, la elección del método de prospección y las consideraciones del sitio deben tenerse en cuenta en la interpretación de los resultados. La falta de anomalías geofísicas no puede implicar la inexistencia de características enterradas. Se recomienda ser lo más objetivo posible.

3.3.3.6.6. Reporte

Los siguientes elementos deben incluirse en los resultados de la prospección:

- Mapa de localización
- Mapa de disposición de líneas topográficas
- Tabla de catálogo de los puntos de origen de anomalías
- Mapa de ubicación de los puntos de origen de anomalías
- Registro de observación.

El reporte incluye:

- Resumen de Resultados
- Introducción
- Métodos (técnicas y metodologías)
- Resultados
- Conclusiones
- Agradecimientos
- Declaración de indemnización
- Referencias
- Apéndices.

Bibliografía

Bickler, S. H., et al. *Guidelines for the use of Geophysics in Heritage Management within the Auckland Region*. Prepared by Clough & Associates Ltd. for Auckland Council, 2017, aucklandcouncil.govt.nz.

4. SINERGIAS

Gran parte de las acciones que destinamos a un fin, pueden ser útiles en otros aspectos. La sinergia es el trabajo coordinado donde los resultados son mayores por esta unión, que si se realizaran individualmente. En muchos casos esto se traduce en el aprovechamiento de datos realizados para un fin, que puede tener utilizad en otros campos, como es nuestro caso, la arqueología y la agricultura.

Diversos actores pueden colaborar activamente en la consecución de resultados, aunque los fines sean bastante distintos. Esta es una realidad que tenemos cada vez más claro desde la investigación histórica y arqueológica. Dada la falta de datos contrastables, nos vemos obligados a innovar e incluir en nuestros análisis información de otras disciplinas. Así es como nacen, por ejemplo, los análisis a través de los Sistemas de Información Geográfica, analizando cuestiones como la distribución del poblamiento, captación de recursos, modelización del paisaje histórico, etc. Aquí existe un uso de fuentes e informaciones de otras disciplinas y ciencias para conseguir nuevos datos. Sin embargo, esto solo es la punta del iceberg, ya que no se trata de una verdadera sinergia, dado que generalmente los datos generados por el arqueólogo no suelen ser de utilidad para el geógrafo de GIS. A pesar de ello, el avance y trabajo supone una mejora significativa de los casos de ejemplo y el desarrollo de metodologías y técnicas que después pueden aplicarse a otras ciencias (REF).

En el uso de técnicas no invasivas y de teledetección al medio rural, desde el punto de vista de la investigación histórica y arqueológica siempre hemos considerado la información que nos viene desde la agricultura. No es para menos, ya que la mayoría de los descubrimientos son fruto de hallazgos casuales por parte de agricultores. Ahora con la irrupción de nuevas técnicas en agricultura, como son los mapeos de fincas para conocer sus bonanzas y defectos, estamos viendo una gran utilidad de estos datos para la ciencia arqueológica.

Sin embargo, esta consciencia de parte de arqueólogos no se ve en el mismo sentido por agricultores. ¿Acaso no hay un beneficio mutuo en los métodos y resultados de ambos? Este manual pretende incidir en estas cuestiones, exponiéndose en el capítulo siguiente varios ejemplos de esta sinergia.

Baste decir en esta introducción que el potencial de esta integración puede ser beneficiosa para diversos actores, especialmente agricultores, pero también arqueólogos y gestores del patrimonio. La existencia de un yacimiento arqueológico en medio rural no es algo que se elige y ciertamente suele ser un problema de gestión, y si se excava, de conservación, consolidación, difusión, etc. El uso de estas nuevas técnicas intenta precisamente mitigar en la medida de lo posible estas problemáticas, intentando de sacar el máximo rendimiento científico, al mínimo uso de técnicas destructivas.

La consciencia colectiva sobre esto es que el agricultor propietario que tiene un yacimiento, tiene un problema. Y esto es verdad en parte, al igual que es problemático cultivar en ladera, no puedes extraer toda el agua que quieras del subsuelo o que el terreno es demasiado pedregoso para introducir maquinaria. Se trata de una cuestión que está ahí y forma parte de la propia gestión de la finca. La dificultad estriba en que el propietario no tiene la “propiedad” del yacimiento, que es un bien patrimonial de todos y que se gestiona desde las diversas entidades públicas, siendo su organismo principal las diversas delegaciones provinciales de Cultura.

A una mayor sinergia entre agricultores y gestores del patrimonio, menos problemas podrían existir, sobretodo en la conservación de estos vestigios. Muchas veces la agricultura de estos no supone una destrucción de los mismos, ya que se están removiendo los mismos niveles continuamente. La mayor parte de las destrucciones se producen cuando se introduce un nuevo cultivo, que requiere de un arado más profundo o la plantación de determinadas especies vegetales con raíces más profundas. Es en estos casos cuando la destrucción y el problema vienen de la mano, precisamente por la falta de entendimiento entre ambas partes.

La realidad es que no todo se puede conservar, al igual que no todos los materiales recogidos en prospecciones y excavaciones acabarán expuestos en museos. El valor del yacimiento es doble, de un lado patrimonial intrínseco, por otro, de investigación.

La investigación histórica y arqueológica busca conocer estos espacios y por tanto son los intermediarios naturales entre instituciones y agricultores. Un arqueólogo puede conseguir el permiso mediante el cual excavar y por tanto destruir el patrimonio, bajo la garantía de métodos de registro, por los cuales la información no se pierde. En estos casos también se suele conservar aquellos elementos que resultan de interés y pueden tener valor en sí, ya sea para el turismo o la cultura.

Todo esto es una realidad existente desde hace años, pero que ahora con la irrupción de nuevas tecnologías, se hace más patente. Actualmente no necesitamos realizar siempre excavaciones, sino que nos puede bastar con el conocimiento aportado por estas técnicas no invasivas y de teledetección para conocer, y sobre todo, proteger el patrimonio. Además, dado que en agricultura de precisión se utilizan muchas de estas técnicas, nos encontramos en un momento donde los métodos utilizados son muy similares, pudiendo haber sinergias entre ellas.

Generalmente la dificultad estriba en el objeto de análisis, pero los resultados pueden ser reinterpretados con otros fines. Es en la convergencia de técnicas donde podemos plantear una verdadera sinergia entre estos actores. Sin embargo, existen una serie de diferencias notables, de cara a llevar a cabo esta integración.

La primera es el objetivo de unas y otras técnicas. Para el caso de la arqueología solemos buscar anomalías en el territorio, alteraciones en el color o forma de imágenes aéreas RGB, multiespectral, infrarroja, etc. Así como diferencias de bajos de conductividad eléctrica, valores altos de susceptibilidad magnética, etc. Este tipo de resultados suelen ir acompañados de registros arqueológicos, por lo que se realizan prospecciones, estudio de materiales, y si es necesario, excavaciones.

Para el caso de la agricultura de precisión, el objeto de estudio es el contrario, buscamos conocer las condiciones del terreno para un determinado cultivo, las zonas mejores y peores, evitando o bonificando de alguna manera este segundo caso. Por tanto, el “ruido” en un análisis con objetivos agrícolas, es la “señal” buscada en la arqueológica. Sin duda es un campo donde la sinergia entre ambas técnicas puede ser de especial interés para uno y otro actor. Esto es, cuando se realiza un análisis con un fin u otro, sus resultados pueden ser utilizados por el otro actor. De esta manera, la realización de un vuelo fotogramétrico sobre un yacimiento arqueológico, puede ser de gran utilidad para el agricultor en la gestión de su finca y viceversa.

A pesar de ello, esta sinergia tiene una serie de problemáticas que queremos comentar. La primera es la falta de entendimiento y de compartir datos por ambas partes. Esto es lo que en parte se quiere solventar en este manual.

Por otro lado, hay un factor que dificulta esta sinergia y es la escala a la que se realizan dichas investigaciones. Generalmente en agricultura de precisión importa más la superficie total explorada que la resolución de la misma, mientras que en arqueología nos importa la máxima resolución. Esto hace que la información de ambos actores no sea completamente equiparable.

Por suerte el desarrollo de la técnica ha dado la existencia de nuevos métodos en arqueología que permiten explorar más extensiones de tierra, sin la pérdida de resolución potencial. Esto acerca bastante estas perspectivas de integración.

A pesar de todo, por parte de arqueólogos podemos utilizar los datos de la agricultura de precisión, como un paso previo a un análisis más detallado. Concretamente estamos hablando de la teledetección mediante la cual se intenta localizar yacimientos arqueológicos o en su defecto ser capaces de delimitarlo. Estos datos, pueden ser de gran interés para agricultores, ya que podrían conocer el tamaño real del yacimiento que tienen bajo el subsuelo. Esto es un gran beneficio para el agricultor en combinación con los propios gestores del patrimonio. La potencial sinergia entre ambos, supone un mayor conocimiento de las estructuras soterradas reales, por lo que el yacimiento puede delimitarse de manera legal por datos más fidedignos, que en el caso de la dispersión superficial de materiales. Por ejemplo, es muy común que los materiales arqueológicos en un yacimiento en ladera acaben

acumulados en la parte baja del cerro. Si se establece un área de protección patrimonial sobre la zona en cuestión, sin técnicas no invasivas, tanto la parte alta como baja de esa ladera estarían protegidas, añadiendo a ello un círculo de seguridad de varios metros. Sin embargo, con el conocimiento mediante estas técnicas, la delimitación puede ser más veraz, delimitándose solo a la ladera y por tanto permitiendo el uso para otros fines de la parte baja, donde solo se han acumulado materiales superficialmente.

Por tanto, la sinergia y buenas prácticas entre los diversos actores solo puede inducir beneficios, ya sea en la investigación histórico arqueológica, en la capacidad y mayor eficiencia de la protección del patrimonio, o en la propia seguridad y productividad de los agricultores. A su vez, los datos aportados por estas técnicas pueden ser utilizados indistintamente por ellos, ya sea para detectar o mejor delimitar los yacimientos, poder hacer mapeados de idoneidad o no del suelo, etc.

5. EXPERIENCIAS

En esta sección centraremos nuestra atención en mostrar las experiencias directas de campo que se han desarrollado a lo largo del proyecto. Como ya se apuntó, no es un relatorio exhaustivo de todas las campañas en todas las localizaciones, sino una selección de los aspectos más relevantes del trabajo realizado. Siguiendo una misma estructura, para cada uno de los sitios se realizará en primer lugar una valoración de las razones que nos llevaron a intervenir en ellos. Aportaremos a continuación alguna información esencial sobre los mismos, localización, características del entorno, así como un trasfondo básico acerca de los elementos de interés arqueológico. En concordancia con la filosofía del proyecto, un aspecto destacado en este sentido será la revisión de las transformaciones sufridas por estos enclaves producidas por la actividad agrícola y cómo pueden haber afectado a la conservación de los restos.

Respecto a los trabajos en sí, cada caso contiene una explicación de los métodos empleados, la estrategia utilizada para la toma de datos, una exposición de los resultados y finalmente una valoración de lo que esto ha aportado para el futuro de la protección del sitio y para la gestión agrícola de este espacio.

5.1. Monitorizando el desarrollo de una parcela con un sitio arqueológico: el caso de Guadajira

ENCUADRAMIENTO

Guadajira es una entidad local menor del municipio español de Lobón, perteneciente a la provincia de Badajoz. Está enclavada en el corazón de una zona de intensa actividad agrícola correspondiente al curso medio del río Guadiana, y muy próxima a la sede de la Finca Experimental-La Orden, perteneciente al CICYTEX. Es precisamente esta circunstancia la que propició, por la vinculación de uno de los trabajadores del centro, la exploración de una de las parcelas que se localizan a las afueras de la población para valorar su potencia como campo de ensayo para el proyecto. El resultado fue positivo ya que se constató la presencia de restos arqueológicos, planteándose la oportunidad de confrontar en este mismo espacio la amplia batería de métodos utilizados en nuestra investigación.

Los terrenos conforman una lengua o espolón elevado que domina la llanura aluvial del Guadiana, y por su forma amesetada han sido objeto de labranza desde tiempo inmemorial. El histórico de imágenes aéreas consultadas refleja una gran continuidad en la explotación de la parcela con cultivos de cereal en secano. Esta dedicación es acorde con la debilidad de los suelos en estas zonas elevadas, que contrasta con la feracidad de las parcelas de la vega, intensamente trabajadas desde al menos los años 60 del pasado siglo, momento en el que con el arranque del Plan Badajoz se implantó un sistema de irrigación masivo en toda la zona. Esta circunstancia ha jugado favorablemente por la conservación del sitio arqueológico, que de esta manera no se ha visto afectado ni por la construcción de las infraestructuras de riego ni por las severas nivelaciones del terreno para su puesta en cultivo.



Figura 26 Localización del campo de ensayo de Guadajira

MATERIALES Y MÉTODOS

La parcela ha sido objeto de un trabajo intensivo mediante la combinación de diversos sistemas de prospección:

- Prospección arqueológica de superficie: consistió en la exploración sistemática de toda la parcela para documentar la posible presencia de artefactos en superficie, que pudieran ofrecer indicaciones sobre la presencia de estructuras antiguas en el subsuelo
- Estudio geofísico, usando los siguientes métodos:

Magnetometría: se empleó un gradiómetro de flujo, configurado para trabajar en cuadrículas de 20X20 hasta cubrir toda la superficie objeto de interés. El muestreo de datos se fijó en un intervalo de 50 cm entre pasadas, considerando éste como suficiente para la correcta definición de las estructuras enterradas.

Conductividad eléctrica aparente: para ello se empleó un sistema VERIS perteneciente al CICYTEX-Finca La Orden. AL ser un equipamiento adaptado para su tracción con un tractor agrícola, fue posible obtener mediciones de la totalidad de la parcela en una única jirada de trabajo. Los datos fueron luego procesados (eliminación de valores extremos, corrección de puntos) para posteriormente generar mediante kriging varias superficies de interpolación.

Inducción electromagnética. Se empleó un sensor EM38 en configuración vertical, conectado a un receptor GPS para la toma de datos en modo NMEA. No obstante para asegurar una distribución homogénea de los datos se marcó previamente una cuadrícula de referencia con bloques de 50X50 metros. Esta malla se utilizó como base para establecer un intervalo entre pasadas de un mínimo de 50 cm. Los datos fueron posteriormente sometidos a corrección de la deriva de temperatura, y finalmente se realizaron varias superficies de interpolación con las dos capas de datos que genera este equipo: conductividad eléctrica y susceptibilidad magnética.



Figura 27. Características técnicas de los sensores utilizados en el caso de estudio de Guadajira para el trabajo de teledetección. Arriba: drone de ala fija sistema Ebee. Izquierda: cámara multiespectral. Derecha: cámara térmica.

Teledetección. Al estar incluida toda la zona de interés arqueológico dentro de un terreno dedicado al cultivo del cereal, se consideró que era una excelente oportunidad para monitorizar a lo largo del desarrollo de las plantas la interacción y respuesta diferencial de estas últimas con la presencia de estructuras enterradas. Para ello se estableció la realización de una serie de vuelos a lo largo del ciclo de crecimiento del cereal, con una primera toma de datos al inicio(enero), otra en mitad del desarrollo (marzo) y finalmente otra en el momento de la maduración del cultivo (finales de abril). Todos los vuelos fueron realizados con un drone de ala fija, tomándose puntos de apoyo para la rectificación y georreferenciación de las imágenes. Para cada sensor las imágenes capturadas se utilizaron para generar un ortomosaico de toda la zona investigada utilizando un paquete de software SFM (structure

from motion). En cada una de las campañas se combinó la toma de imágenes con tres sensores diferentes:

1. RGB. En el espectro visible es posible captar diferencias de color o sombras provocadas por las diferencias de altura de las plantas provocados por la presencia de estructuras en el subsuelo (crop marks).
2. Multiespectral. El sensor multiespectral que hemos utilizado es el Parrot Sequoia3, un sistema originalmente diseñado para agricultura de precisión que sólo muy recientemente se está comenzando a utilizar para la investigación arqueológica. El sensor captura cuatro bandas del espectro visible e infrarrojo: verde (550 ± 40 nm), rojo (660 ± 40 nm), borde del rojo (735 ± 10 nm) e infrarrojo cercano (790 ± 40 nm). El equipo también tiene un sensor de luminosidad solar que permite corregir y calibrar las mediciones en vuelo. Estos valores corregidos se registran en los metadatos de cada imagen (exif), para luego aplicarlos al hacer el mosaico.
3. Térmica: Las imágenes térmicas se emplean para detectar contrastes en la emisividad de la energía de los diferentes materiales enterrados en esa parte del espectro electromagnético. En este caso, utilizamos un sensor ThermoMAP para capturar 640×512 imágenes con un tamaño de píxel sobre el terreno (GSD) de aproximadamente de unos 17 cm a una altura media de 75 m. Como en el caso de la cámara multiespectral, el sensor térmico fue montado en un sistema eBee.

Resultados

A través de la prospección magnética fue posible identificar muy bien una estructura cuadrangular/rectangular con diferentes divisiones. Sobre la base de los resultados de este método, se presenta una comparación entre las diferentes metodologías.



Figura 28 Prospección magnética con el GRAD601 y delimitación de la estructura identificada

Fig. 5.2 -

También se obtuvieron buenos resultados con la prospección realizada con el EM38 (conductividad eléctrica), y fue posible identificar áreas comunes y otras particularidades que no se podían ver con la prospección magnética.



Figura 29 Prospección con el EM38 y comparación con los límites de la estructura identificada

En cuanto al uso del VERIS (conductividad eléctrica), al ser un método de menor resolución, no es posible identificar o delimitar ningún esquema para compararlo con los métodos mencionados

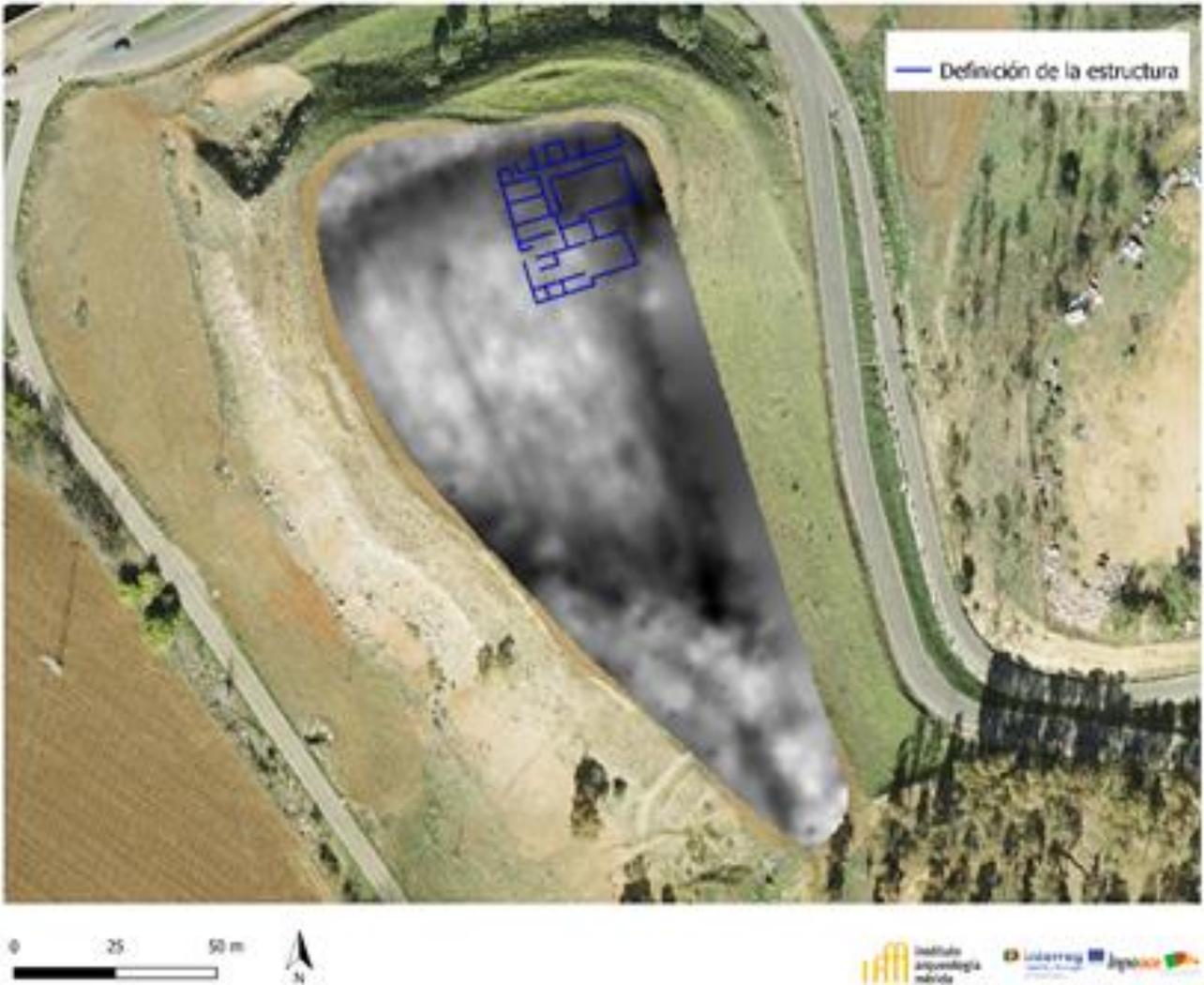


Figura 30 Prospección con VERIS y comparación con los límites de la estructura identificada anteriormente.

En cuanto a la prospección de superficie, cabe señalar que la mayor concentración de indio/material arqueológico se concentra esencialmente en la zona donde se detectó la estructura enterrada.

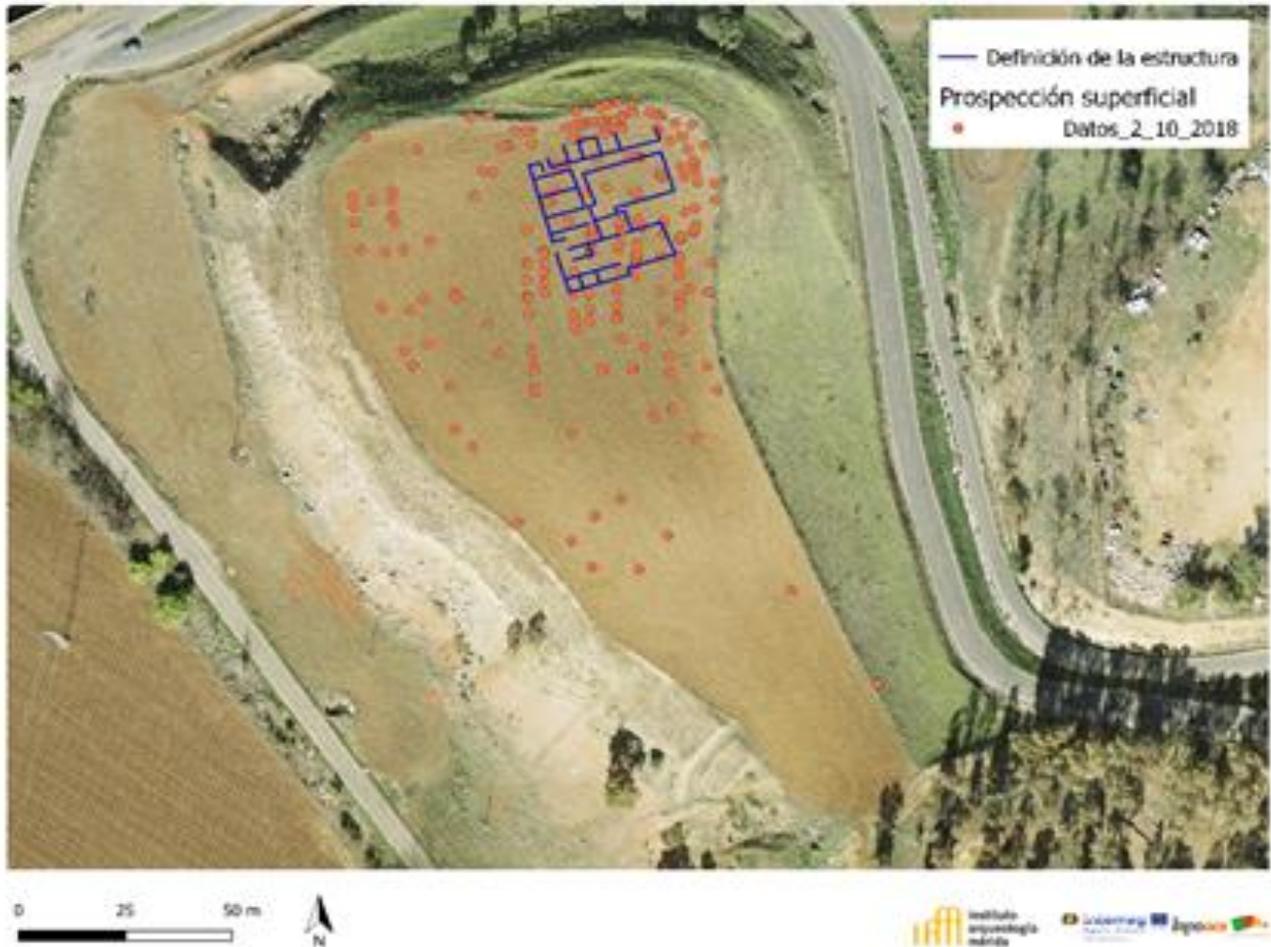


Figura 31 Prospección de superficie y comparación con los límites de la estructura identificada

Respecto al trabajo de teledetección, los resultados fueron en general negativos, debido en gran medida a las circunstancias climatológicas del período elegido para la toma de datos. Si bien sabíamos de entrada que en la parcela cultivada existía un conjunto de estructuras perfectamente definidas gracias a la prospección geomagnética, nos encontramos con un año particularmente pobre en las precipitaciones durante el invierno y la primavera. Esto, unido al escaso potencial de los suelos en los que se desarrollaba el cultivo, motivó un raquítico desarrollo del mismo. Como consecuencia, en ninguna de las series de imágenes capturadas fue posible diferenciar con claridad los elementos de interés arqueológico. Sólo en las parcelas situadas al pie del cerro en el que se encontraba el yacimiento pudo observarse con claridad un crecimiento

diferencial y un contraste de temperatura en la última de las series tomadas, revelando la presencia de estructuras soterradas que corresponderían a construcciones. Sin embargo en este caso el análisis de las series históricas de fotografías aéreas puso de manifiesto que se trataba de construcciones de cronología muy reciente.



Figura 32 Teledetección (Térmica) y localización de la estructura identificada

5.2. Valorando el impacto de un cambio de uso: el caso del Turuñuelo de Mérida

ENCUADRAMIENTO

El Turuñuelo de Mérida es un sitio arqueológico catalogado en el Inventario de la Dirección General de Patrimonio de la Junta de Extremadura. Especialmente conocido por la presencia de un túmulo de la Primera Edad del Hierro (Jiménez Ávila y Domínguez de la Concha, 1995), presenta también una ocupación de época romana. Pese a haber sido afectado por la construcción de un canal de riego en los años 60, el uso de la parcela se mantuvo estable a lo largo de los años, con una dedicación a pastizal alternando con el cultivo de plantas forrajeras, que no exigió nunca labores de arada agresivas para la conservación de los restos.

Las circunstancias que llevaron a la realización de esta intervención ofrecen un buen ejemplo de los problemas que conlleva en esta zona de agricultura intensiva del Guadiana la conservación de los yacimientos arqueológicos. Pese a que como acabamos de señalar éste estaba catalogado y su existencia era conocida (y de hecho bien visible gracias a la estructura tumular), los propietarios de la finca decidieron intensificar el uso del terreno con la plantación de olivos con riego por goteo. Para ello iniciaron un acondicionamiento del terreno que implicaba un rebaje de la zona más alta del túmulo y la construcción de los caballones para la plantación del olivar. Esto obviamente afectó a los restos arqueológicos, de lo cual tuvieron conocimiento las autoridades competentes en materia de Patrimonio, lo que llevó a la paralización de los trabajos agrícolas. En este contexto se nos encomendó la tarea de realizar un diagnóstico sobre la extensión y naturaleza de los elementos arqueológicos de la parcela, así como sobre la afección de los desmontes realizados en su estado de conservación.

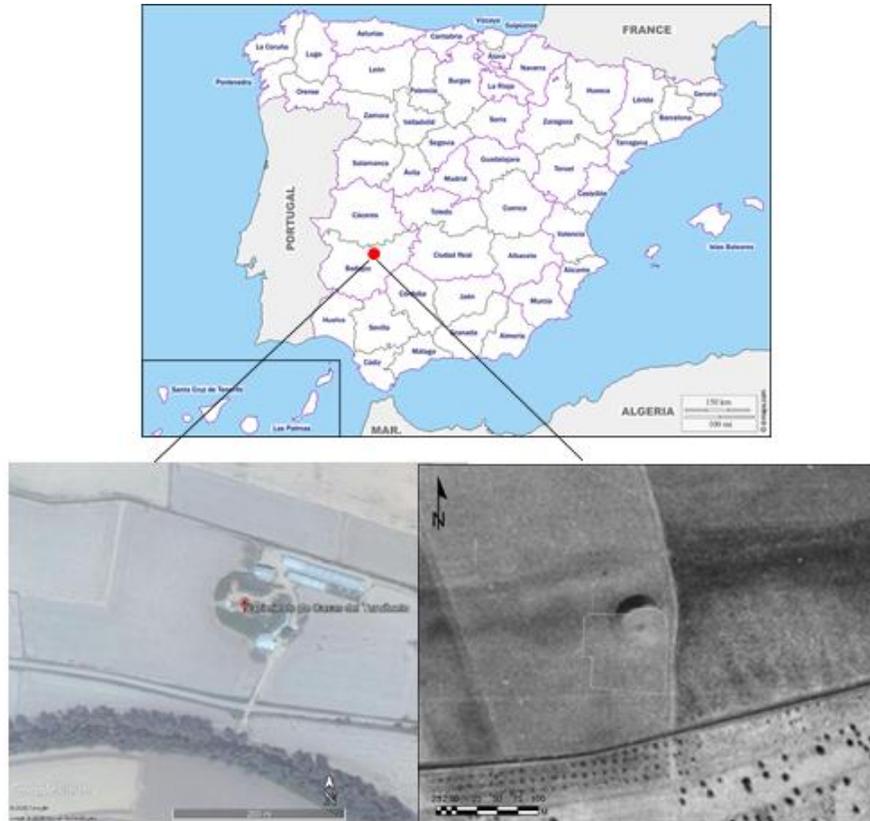


Figura 34 Localización Geográfica; estado actual, 2020 (izquierda); fotografía área del “Vuelo Americano” (1946), con la zona de estudio delimitada (derecha)

El suelo se encontraba bastante húmedo debido a las lluvias de los días anteriores, estando incluso algunas zonas parcialmente encharcadas. La humedad de este implicaba unas buenas condiciones para el empleo de la inducción electromagnética, aunque dificultó la toma de muestras al hundirse el personal en el terreno. Los suelos son predominantemente arcillosos, con algunas zonas arenosas en la zona suroriental de la parcela. En el momento de realizar la prospección geofísica se encontraban labrados, con un pase de grada, que creaba una superficie rugosa que se había visto afectada por la escorrentía, especialmente en el extremo norte de la zona de trabajo, ya que la pendiente del túmulo había formado cárcavas que impedían un movimiento fácil del instrumental.

MATERIALES Y MÉTODOS

El objetivo de la campaña era obtener un diagnóstico lo más completo posible sobre la presencia de indicios arqueológicos en la parcela y su distribución, a fin de poder determinar cuáles eran las áreas potencialmente afectadas por las remociones y cambio de uso previstos. Las tareas realizadas fueron las siguientes:

- PROSPECCIÓN CON UN EQUIPO DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA (IEM)

El DUALEM 1 es un instrumento fabricado por DUALEM INC. (Milton, Ontario, Canadá), que registra la conductividad eléctrica aparente por medio de la IEM. El aparato consiste en un transmisor de corriente y dos receptores colocados en vertical y horizontal al mismo, separados del primero por una longitud de un metro, pudiendo así medir la conductividad eléctrica a dos profundidades diferentes.



Figura 35 Dualem Inc.

Se hicieron 8334 mediciones, aunque debido al proceso de procesamiento de datos, se trabajaron 4952 posiciones diferentes en tres zonas: oriental, central y occidental. El procesamiento de los datos consistió en eliminar las lecturas anómalas, los valores atípicos espaciales y transformar los datos a través del logaritmo nigeriano para obtener una distribución normal. La interpolación fue hecha por Krigeado Ordinario.

Posteriormente, las capas resultantes se normalizaron mediante puntaje “zeta” para obtener una escala de color homogénea.



Figura 36 Distribución de las mediciones realizadas con el equipo de inducción.

- PROSPECCIÓN CON UN EQUIPO DE MAGNETOMETRÍA

El equipo empleado es un gradiómetro de flujo modelo GRAD601, Bartington. La implementación del método en el caso del Turuñuelo, se recurrió a una toma de datos basándose en una estructura de cuadrículas de 20×20 m que cubrieron la mayor parte de la parcela. En total se realizaron 20 cuadrículas, con una superficie prospectada de 8000 m². Las esquinas de los cuadros fueron luego georreferenciadas con un GPS de precisión subcentimétrica para el correcto ajuste posterior de los datos. Los datos fueron posteriormente descargados y procesados con el software Terrasurveyor, que permite una primera corrección de ajustes derivados de irregularidades en el proceso de captura. Finalmente, estos datos fueron exportados a un entorno de SIG para su correcta georreferenciación e integración con las demás capas de información.



Figura 37 GRAD 601, Bartington

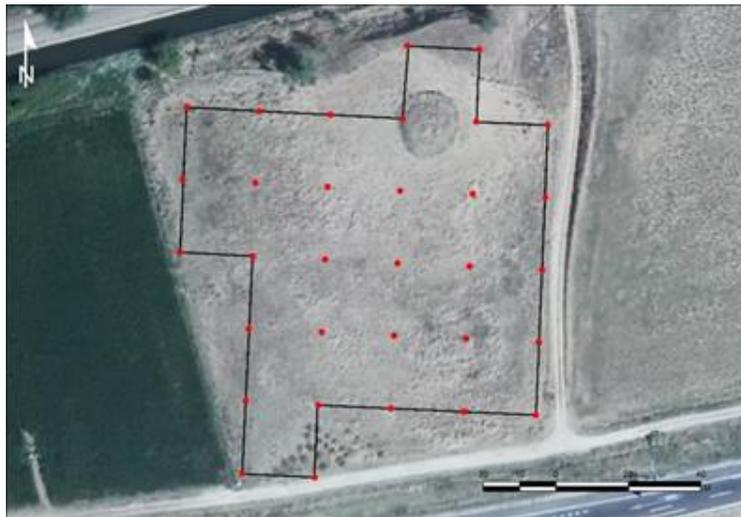


Figura 38 Metodología empleada en la prospección geomagnética

- PROSPECCIÓN DE SUPERFICIE

De manera simultánea se planteó una exploración intensiva de la parcela para registrar la distribución de artefactos en superficie, con el fin de determinar cuáles son las áreas de máxima concentración de materiales y así establecer las áreas más vulnerables. Para el registro de los datos se aprovechó la cuadrícula de la magnetometría, realizándose dentro de cada cuadro una exploración con un intervalo de 5 metros entre prospectores.

En cada recorrido se registraron las posiciones de todos los ítems reconocidos, diferenciando con un código el material cerámico y con otro los materiales constructivos, es decir, tejuela, ladrillo

y otros elementos pertenecientes a estructuras. La recogida de materiales fue muy selectiva, limitándose a la toma de muestras exclusivamente orientada a una valoración cronológica del sitio arqueológico. La capa de puntos así elaborada fue exportada a un entorno SIG. Para facilitar una interpretación de estos datos se realizaron varios cálculos de densidad (utilizando el método kernel, con el fin de obtener una estimación del número de ítems por metro cuadrado.

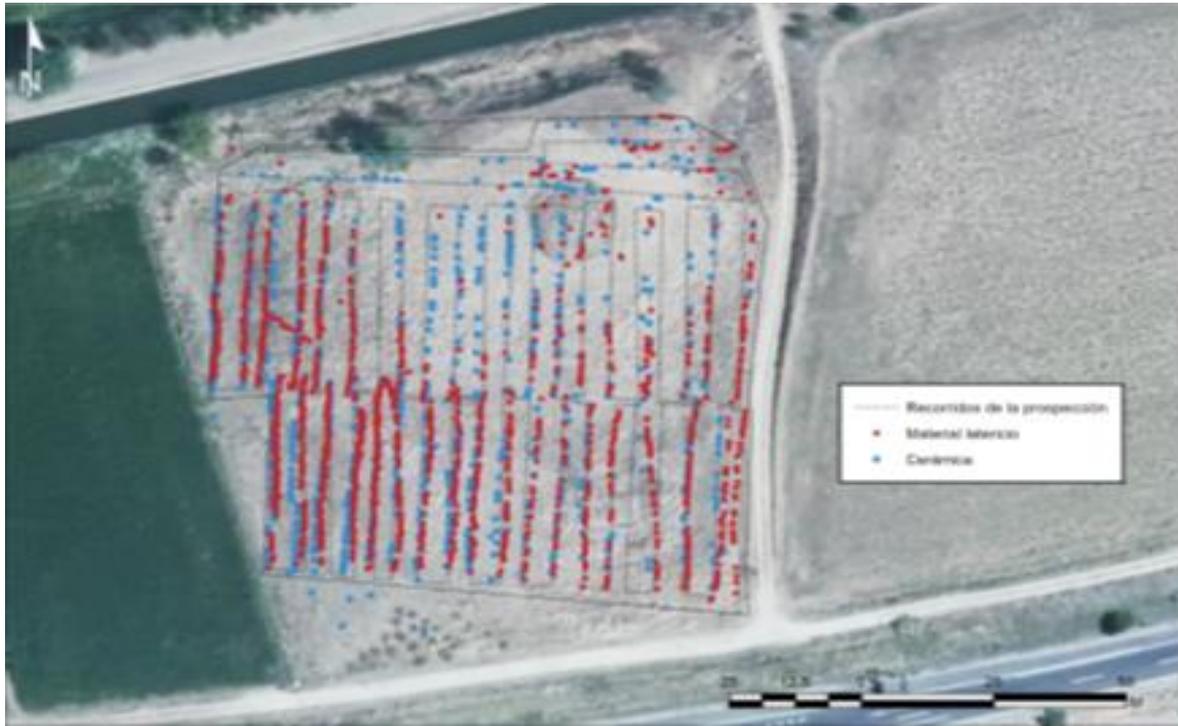


Figura 39 Mapa total de distribución de los artefactos georreferenciados

RESULTADOS

Mediante el empleo del sensor EMI DUALEM 1 obtenemos dos tipos de mediciones, tanto de la conductividad eléctrica aparente como de la susceptibilidad magnética. Estos últimos datos se ven afectados por la existencia de campos magnéticos secundarios, por lo que se han descartado los resultados.

Se puede distinguir una zona de forma aproximadamente cuadrangular, con una orientación SW-NE, con valores de conductividad bajos (alta resistividad), indicando la existencia de posibles estructuras enterradas. Por otro lado, en el extremo noroeste de la parcela y cerca de la base del túmulo destaca una zona con elevados valores de conductividad, indicando la presencia de fosas o zonas con mayor humedad.

Otro elemento arqueológico visible gracias a la prospección geoelectrica es la estructura anular de los depósitos arqueológicos del túmulo, perceptibles como una franja de valores de menor conductividad.

Por la magnetometría, parece claro que estos resultados permiten diferenciar tres zonas dentro de la zona del espacio prospectado. Todo el extremo sur y sureste de la parcela aparece relativamente limpio de anomalías, con la salvedad de algunas alteraciones dipolares, en su mayoría fruto de la presencia de elementos metálicos esparcidos por la zona arada tales como herraduras, piezas de maquinaria agrícola etc. La parte central y occidental de la parcela presenta valores positivos y negativos bastante extremos, generando una superficie con abundante ruido. Parecen intuirse algunas alineaciones que corresponderían a estructuras, que coinciden grosso modo con las que se aprecian en las lecturas de conductividad eléctrica. La explicación más plausible para este comportamiento es que la concentración de materiales de derrumbe, piedra y material latericio, introduzca un abundante ruido que impide percibir con claridad el trazado de las estructuras. De hecho, toda esta amplia mancha se corresponde con el área de máxima concentración de materiales constructivos delimitada mediante la prospección de superficie.

Por lo que respecta a la prospección de superficie, el análisis de los datos permite igualmente establecer la diferencia entre los tres sectores ya señalados.

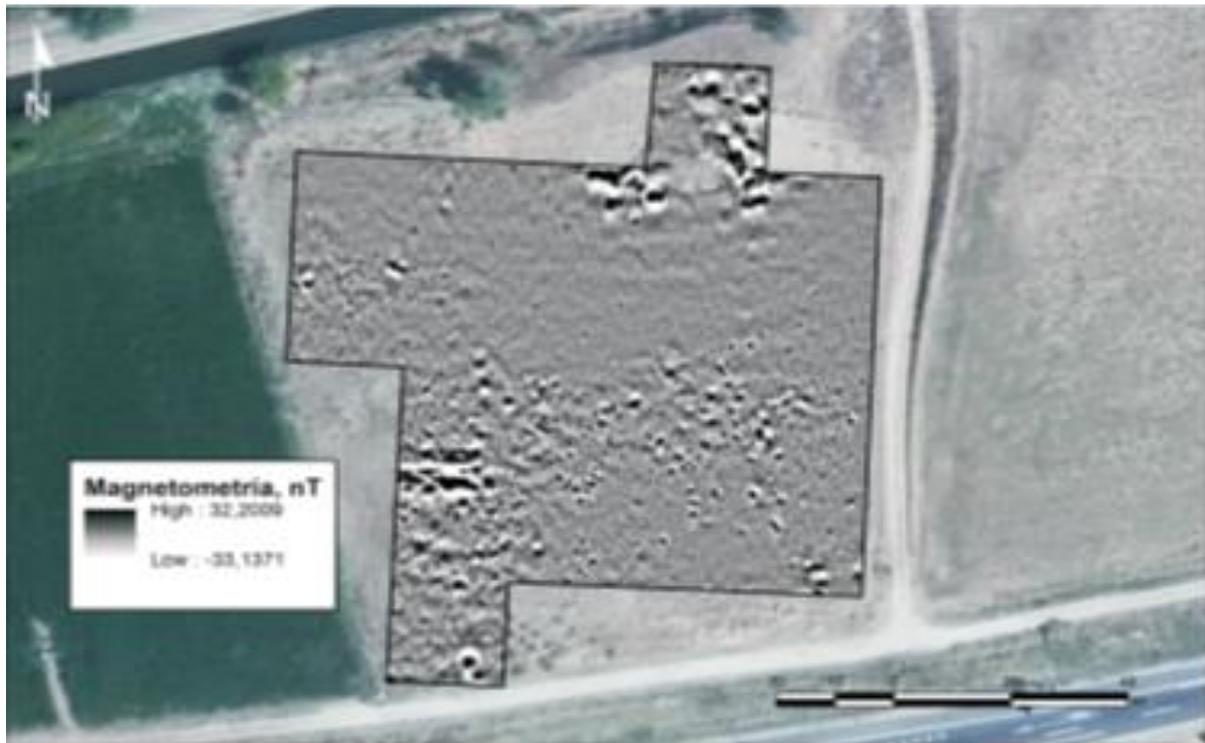


Figura 40 Resultados de la prospección geomagnética

DISCUSIÓN

Se delimitan, así, dos zonas de afección claramente diferenciadas dentro de la parcela objeto de la intervención.

- Zona A: su definición resulta obvia por la presencia del túmulo artificial correspondiente al edificio protohistórico. La prospección realizada añade en todo caso algún dato de interés para delimitarlo con más precisión.

- Zona B: abarcaría toda la zona Oeste y Sur de la parcela. La densidad de indicios parece corresponderse con un conjunto de construcciones de cronología alto imperial. La diversidad de materiales sugiere una funcionalidad residencial, sin que se hayan detectado indicadores de una actividad de producción, industrial o de almacenaje. En todo caso este complejo se prolonga más allá de los límites de la parcela prospectada, abarcando también parte de la localizada hacia el Oeste.

El nivel de certeza de este diagnóstico se ve condicionado por la posibilidad de que algunos de ellos sean, por sus propiedades intrínsecas o por el contraste con el medio que los envuelve, invisibles a los sensores utilizados.

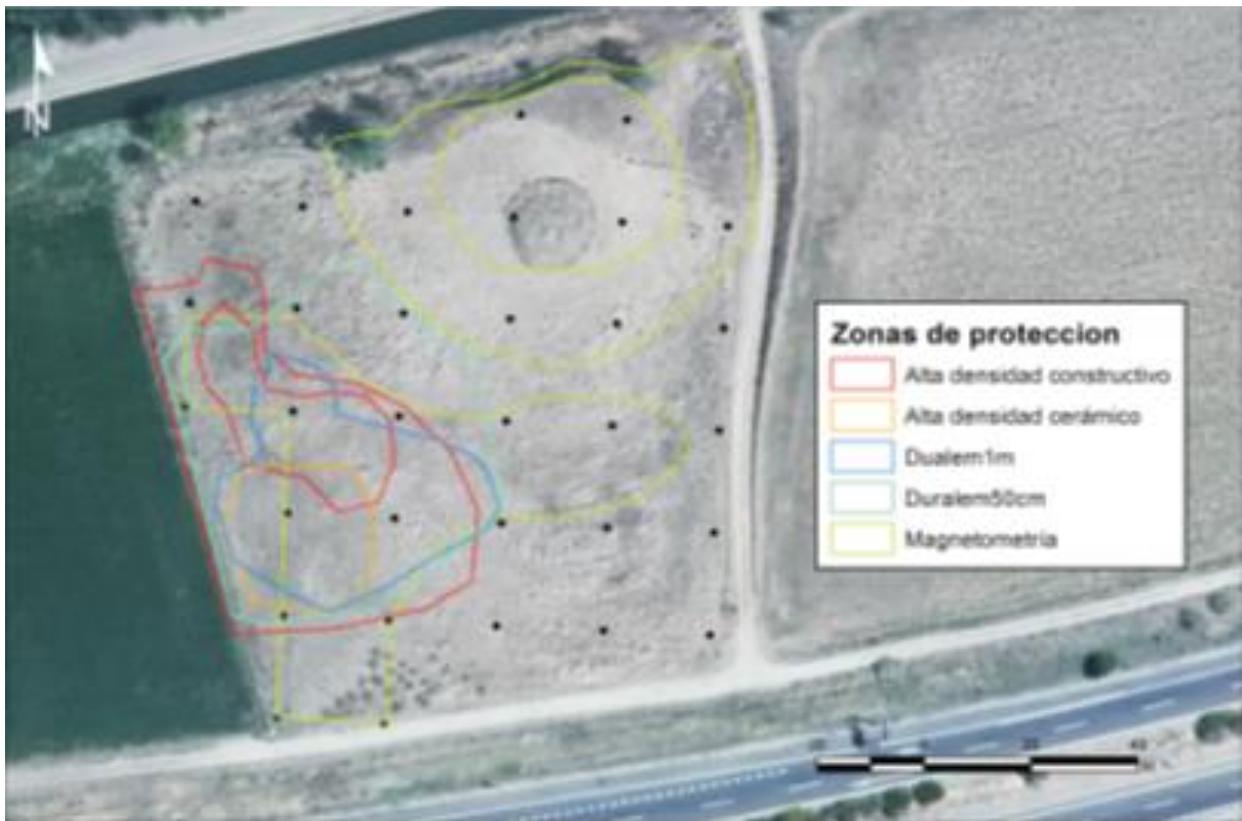


Figura 41 Propuesta de delimitación de las áreas con máxima probabilidad de afección de acuerdo



5.4. El caso de Horta da Torre: el impacto de la roturación de las dehesas sobre una gran villa romana.

ENCUADRAMIENTO

El yacimiento romano de Horta da Torre está situado cerca del Cabeço de Vide, Fronteira (Portugal). Algunas estructuras ya habían sido descubiertas y excavadas, pero en 2012, nuevos estudios confirmaron la calidad de los elementos estructurales, habiendo verificado que la Torre es una estructura de doble ábside. Las tuberías hidráulicas están situadas en el interior de la estructura, lo que indica la existencia de sistemas de agua de carácter recreativo y ornamental.

La historia reciente del lugar se compuso de destrucción sistemática, fue por orden de los propietarios para ganar tierras para la agricultura, ya sea por la acción de los cazadores y los detectores de tesoros (Carneiro, 2017).

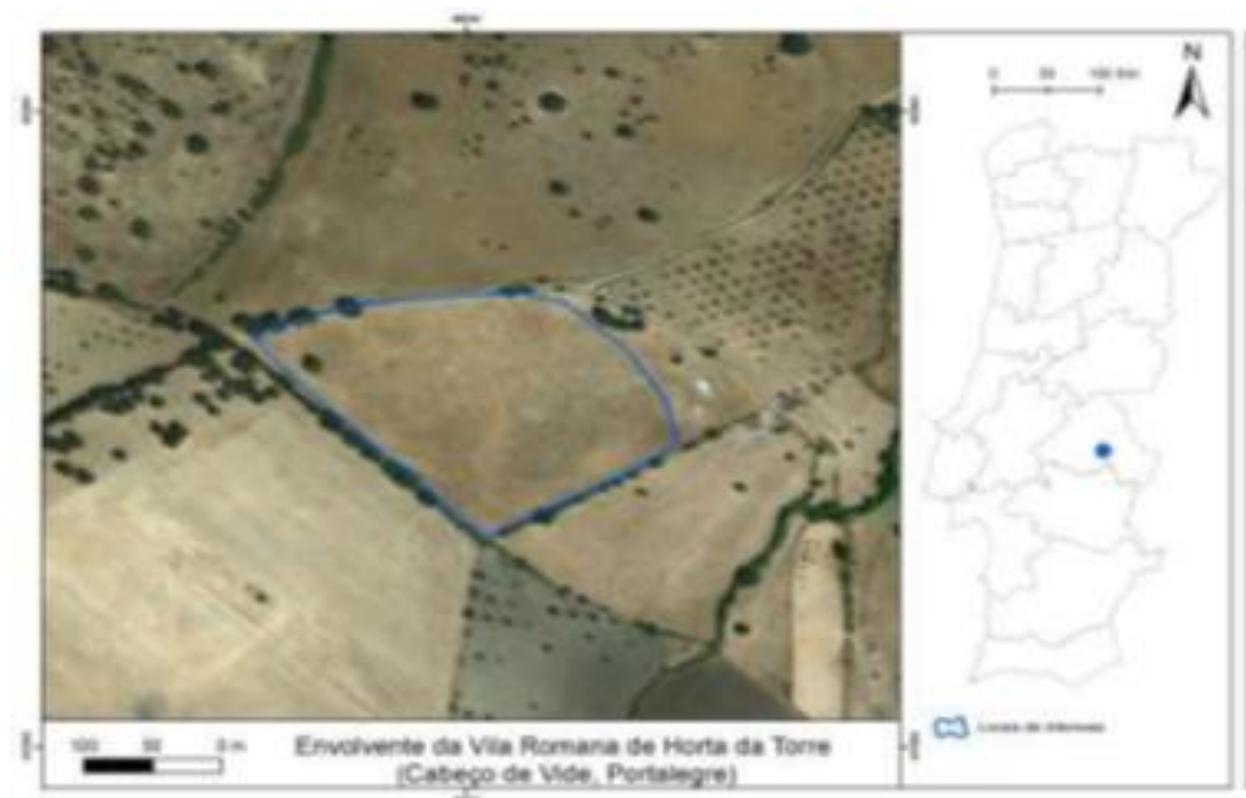


Figura 42 Localización geográfica del área del estudio

El objetivo es doble por un lado existe una necesidad de comprender la extensión de la villa más allá del área excavada en la actualidad, y por otro lado de explorar otros métodos de prospección extensiva para obtener información el *fundus* de la villa. En este caso, se planteó primero una prospección geofísica empleando el método de la conductividad en una gran superficie dedicada al pasto y en la que se encuentra la excavación de la villa romana, en segundo lugar, se prospectó empleando un georradar, una de las zonas donde los valores de conductividad eran más altos y que no había sido explorada con anterioridad. Recordamos que la superficie del edificio principal de la villa romana fue prospectado intensivamente por un equipo de IVAGRO-UCA y del proyecto Fronteira Landscape Project (Universidad de Leiden-Universidade de Évora).

MATERIALES Y MÉTODOS

CONDUCTIVIDAD

Los sistemas Veris son habituales en la recopilación de datos georreferenciados de la CE del suelo. Las medidas que el equipo recopila, se transmiten a través del medio físico del suelo, un par de electrodos (discos) inyectan corriente en el suelo mientras los otros electrodos miden la caída de voltaje, el valor de CE, en mS / m (mili Siemens por metro), registrado con el posicionamiento respectivo geográfico (GPS).

Para una correcta toma de datos es necesario que los discos penetren unos centímetros en el suelo, para que el sistema registre valores de Conductividad del suelo a profundidades de aproximadamente 30 y 80 cm. Los datos de CE y GPS se registran en el "DataLogger" del sistema Veris, en formato de texto ASCII, y luego se pueden usar en el software de Sistemas de Información Geográfica (GIS).

La textura y el contenido de humedad del suelo son características que influyen en las lecturas de CE. Para que el sistema registre datos de CE con calidad, es necesario que el suelo tenga cierto contenido de humedad, sin embargo, si es excesivo, los valores de CE pueden ser más altos.

Los levantamientos CE (Conductividad Eléctrica) se realizaron, utilizando el sensor Veris, el día 16/02/2019 para los alrededores de la villa romana de Horta da Torre. El equipo Veris fue acoplado a un tractor agrícola y las lecturas se recolectaron linealmente a una velocidad de alrededor de 8 km/ h, con espaciamento entre líneas de 5 a 10 metros dependiendo de las condiciones del terreno.

La información recopilada fue posteriormente tratada en un entorno GIS. Los datos iniciales, representados por puntos geográficos, se utilizaron para alimentar un interpolador

(IDW), con el fin de producir mapas continuos de CE, de las áreas de interés, para cada profundidad (30 y 80 cm).

GEORRADAR

Se empleó el método de prospección geofísica denominado *Ground-Penetrating Radar* (Conyers 2004; Schmidt et al. 2015), el georradar, que permite la detección de cambios en la composición de los materiales soterrados gracias al cambio en sus características dieléctricas.

El tipo de sensor utilizado, 250 mhz puede alcanzar una profundidad superior a la ofrecida por métodos similares utilizados en arqueología, según anteriores experiencias de trabajo la calidad de los datos es suficientemente buena como para plantear interpretaciones de estructuras soterradas. La profundidad depende de la conductividad de los materiales, siendo suelos salinos y arcillosos los entornos más difíciles puesto que la energía electromagnética se dispersa muy rápidamente y no retorna al receptor.

El equipo básico que será utilizado en las prospecciones en los yacimientos seleccionados ser básicamente un sensor Noggin de 250 mHz de la empresa Sensors&Software montado sobre el sistema Smart Cart.

INTEGRACIÓN DE DATOS

El método de análisis de datos geofísicos parte de una base deductiva generada por la prospección intensiva del área de la villa de Horta da Torre (Carneiro 2017) por el equipo IVAGRO-Fronteira Landscape Project (Carneiro et al. 2019). Esta prospección aún inédita, nos permite confirmar que el área inmediata a la excavación arqueológica se encuentra cubierta por edificio de grandes dimensiones orientado en torno a dos grandes patios. Esta área arqueológica coincide con los valores mas bajos de CE a la cota de 80 cm bajo la superficie actual, por lo tanto, sería una zona que presenta estructuras “densas”, por ejemplo, muros, derrumbes, etc., que impiden el tránsito de la corriente eléctrica. Por lo tanto, comparando visualmente los resultados de prospección con georradar y la prospección CE para el área anexa a la excavación podemos corroborar la hipótesis planteada de forma inductiva por los prospectores CE de que en dicha área pueden encontrarse vestigios arqueológicos soterrados, ya que la prospección se realizó sin el conocimiento de la primera prospección con georradar.

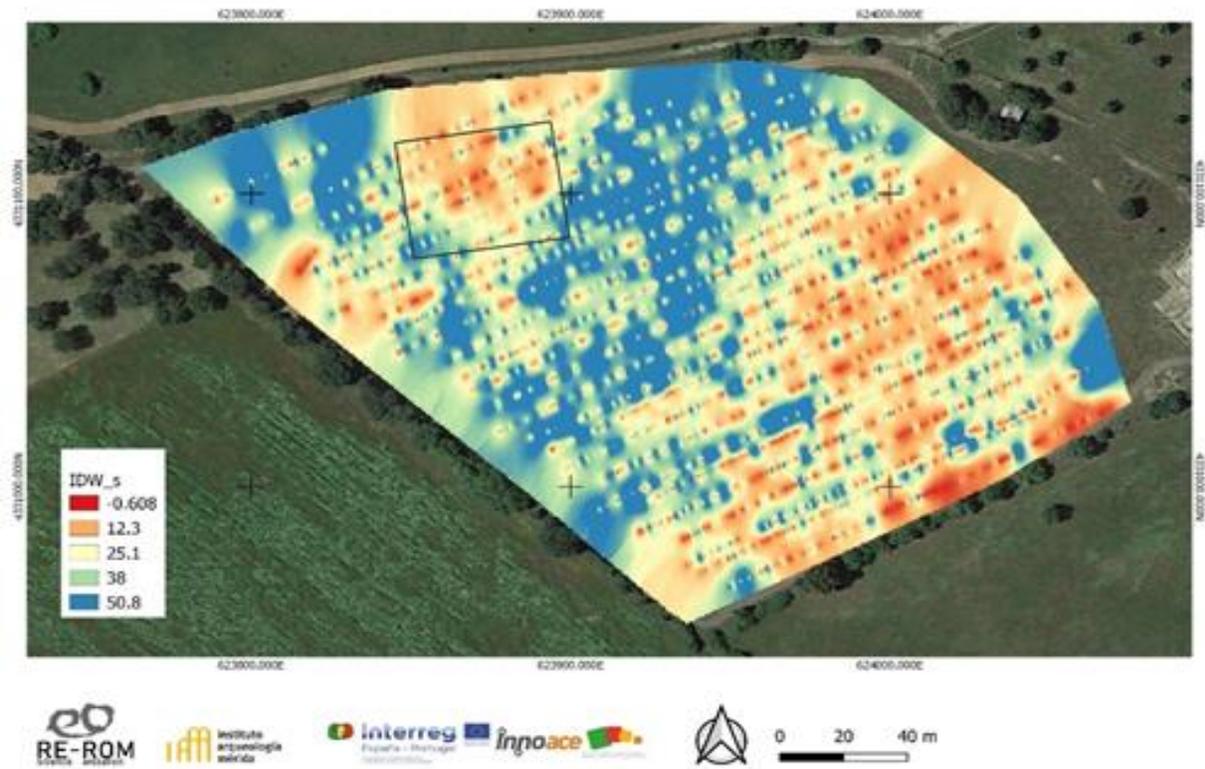


Figura 44 IDW CE a 30 cm y área de prospección GPR

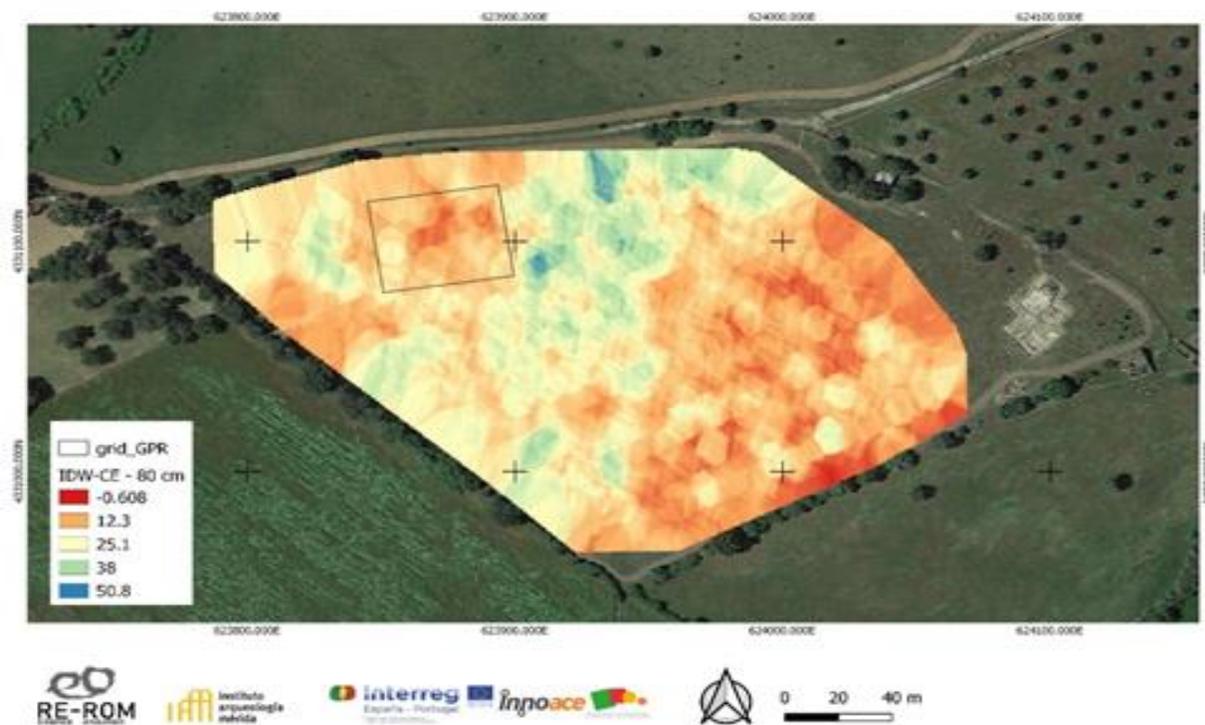


Figura 43 IDW CE 80 cm y área de prospección GPR

Este hecho, nos permite extender nuestra reflexión sobre el uso del espacio entorno al edificio principal de la villa ya que no toda la parcela fue prospectada en primera instancia. Siguiendo un razonamiento deductivo basado en la relación entre GPR y CE en el área de la villa, planteamos que otra zona de baja CE situada en el norte de la parcela.

Se ha planteado una prospección empleando un georradar Noggin de 250 mhz sobre un área de 1970 metros cuadrados sobre el área de baja CE al norte de la parcela para confirmar la presencia o no, de nuevas estructuras arqueológicas.

De todos los cortes de profundidad realizados mostramos aquellos que coinciden con la profundidad de los datos obtenidos con CE, es decir 30 y 80 cm. El primer corte de profundidad muestra reflexiones agrupadas en la zona donde CE mostraba valores bajos de conductividad. No obstante, de esta imagen no podemos realizar ninguna interpretación sobre el tipo de estructuras localizadas. Posiblemente estemos antes una zona de derrumbe o de concentración de piedras pertenecientes a una estructura arruinada. Esta concentración de piedras es incluso evidente en superficie.

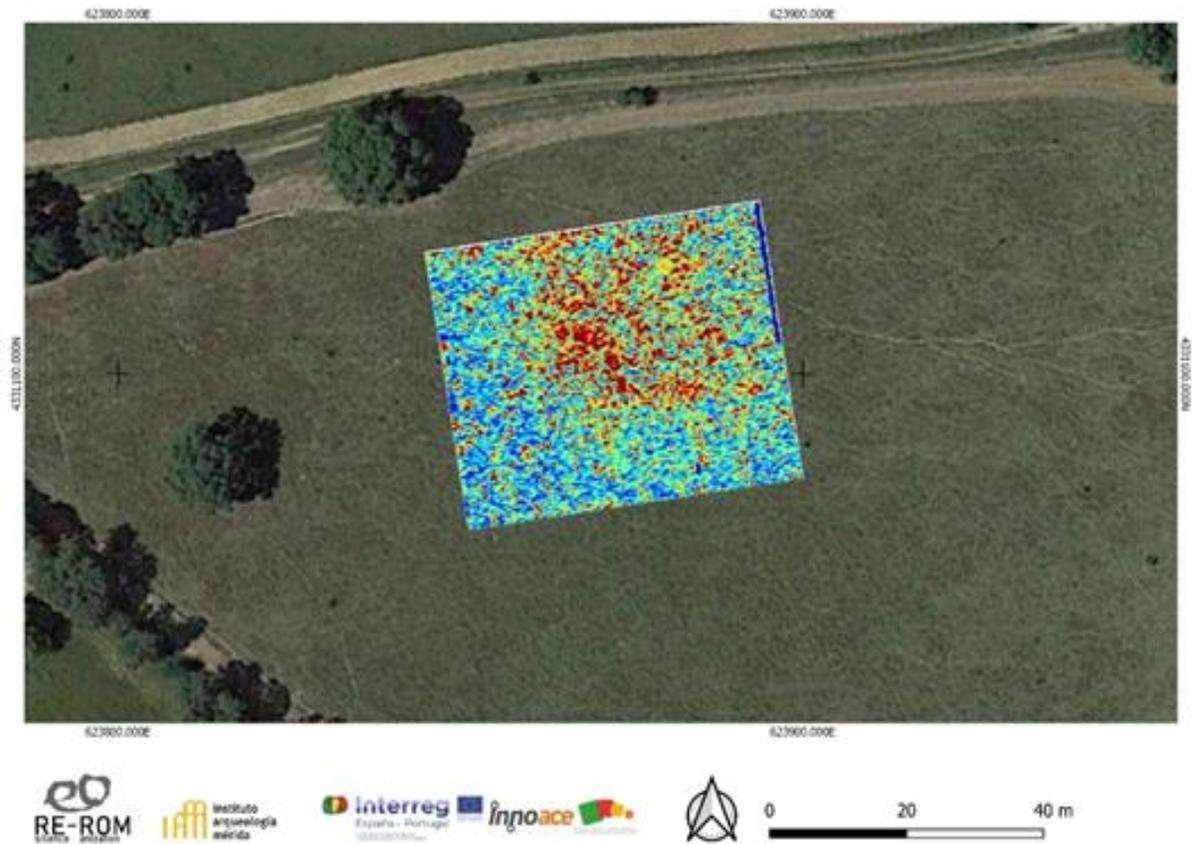


Figura 45 GPR Slice 20-40 cm

Por el contrario, el corte de profundidad a 80 cm bajo la superficie permite (junto a otros cortes) la interpretación de la planta de una pequeña estructura con algunos elementos que nos llevan a interpretarla como parte del complejo monumental de la villa de Horta de Torre. Los derrumbes que pueden localizarse aparecen también concentrados en la zona central de la zona de prospección, igual que muestran los resultados de CE.

Esta estructura se organiza entorno a un patio de 20 por 28 metros, quizás cuente con un pequeño corredor de aproximadamente 2 metros entorno al mismo y que se encuentra conservado en la zona oeste y sur del mismo. Dentro de este posible patio existe una de 10,3 por 6,5 metros, ubicada en su límite sur. Podemos considerar que se trata de un *impluvium* o de una estructura. Además, esta zona sur, al igual que la zona ubicada al este, están rematadas por pequeñas habitaciones, quizás *cubiculae*. En general, consideramos que la preservación de esta zona es precaria.

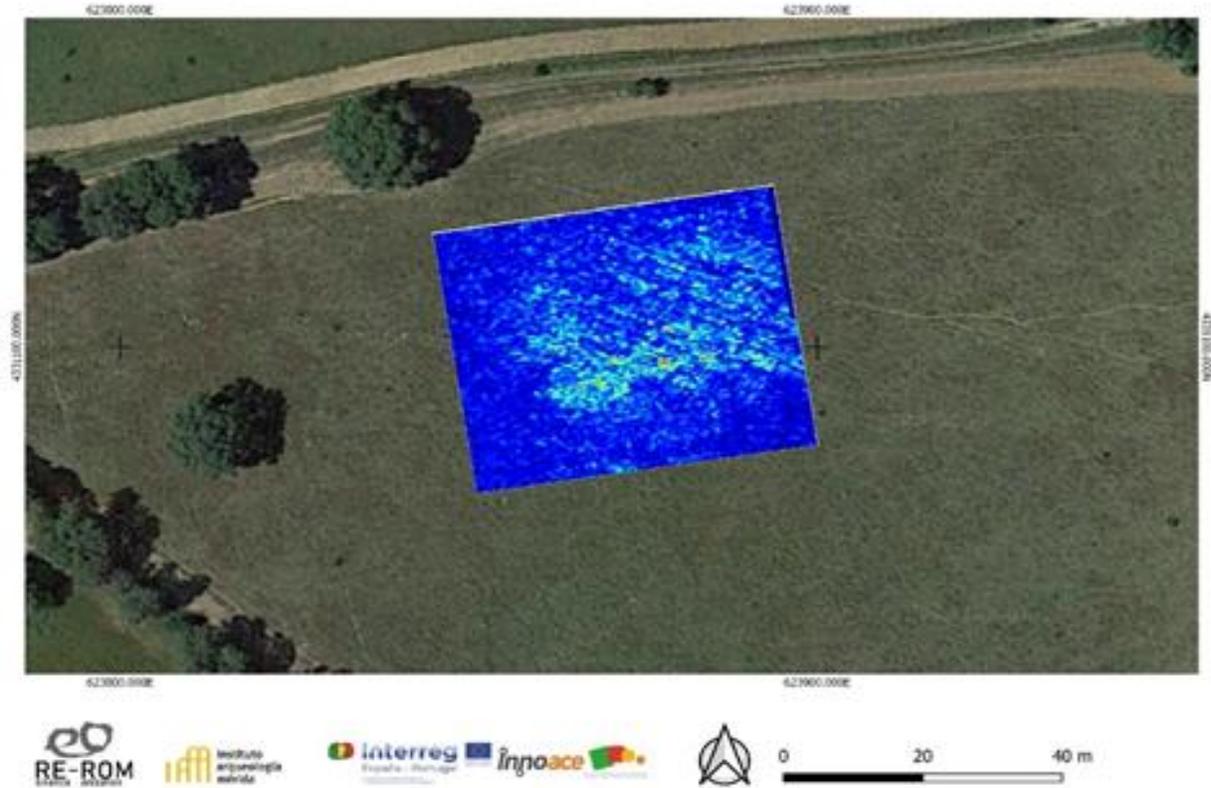


Figura 46 GPR Slice 70-90 cm

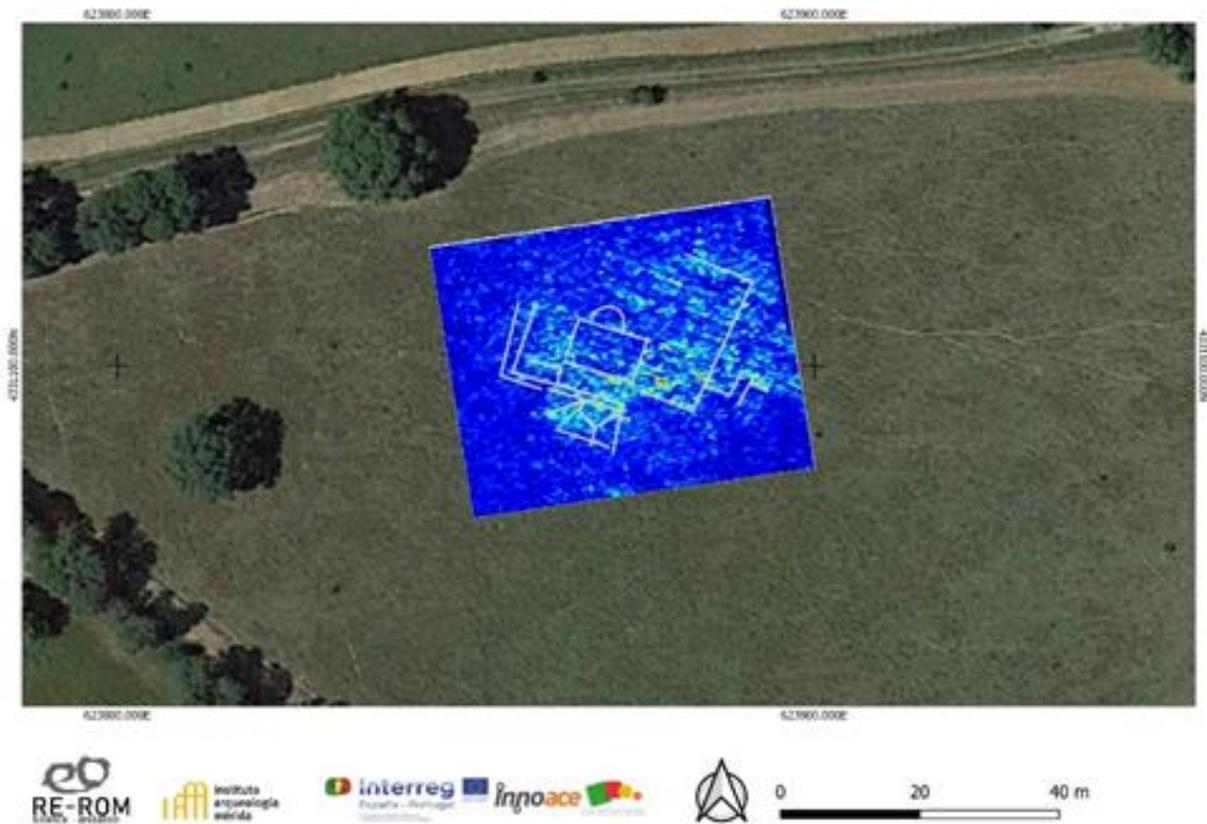


Figura 47 GPR Slice 70-90 cm con interpretación

MÉTODO CUANTITATIVO DE COMPARACIÓN

De forma experimental planteamos un método para comparar de forma cuantitativa los datos de CE y GPR a a dos profundidades, superficie (s) 30 y profundidad (d) 80 cm. Para ello hemos procedido siguiendo los pasos que se describen a continuación.

1. Extracción de cortes de profundidad coincidentes con los datos de CE a 30 y 80 cm de bajo la superficie. Para ello hemos generado cortes cada 20 cm con un solapamiento del 50%. De lo que obtenemos un corte entre 20-40 cm y otro entre 70 y 90 cm.
2. Extracción de los valores de amplitud de cada corte y de su posición en el espacio en dos dimensiones. Las coordenadas fueron provistas por el equipo Topcon conectado al sensor Noggin 250.
3. Extracción de los puntos de toma de datos CE dentro del polígono prospectado con GPR.

4. Cálculo de un buffer de 50 cm entorno a los puntos de toma de datos CE.
5. Identificación (ArcMap) de los puntos de toma de datos GPR con el buffer entorno a cada punto de toma de datos CE.
6. Creación de una tabla con los valores de CE para cada punto y las medias de los valores de amplitud de GPR a dos profundidades (30 y 80 cm) dentro de cada buffer.
7. Normalización de los datos entre 0 y 1.
8. Análisis estadístico

Los puntos 4, 5 y 6 se muestran gráficamente en la siguiente imagen. Los análisis espaciales se han realizado en ArcMap, el tratamiento de las tablas resultados ha sido efectuado en Excel y los análisis estadísticos en PAST y SPSS.

La tabla generada consta de los siguientes campos, de los cuales se han analizado 2 correlaciones: s normalizado y Amplitud a 30 cm normalizado; y finalmente d normalizado y Amplitud a 80 cm normalizado.

- FID: identificador del buffer de agregación
- S: valor de CE en superficie o 30 cm
- D: valor de CE en superficie o 80 cm
- Average of Amp_30: Valor de amplitud de datos GPR entre 20 y 40 cm
- Average of Amp_80: Valor de amplitud de datos GPR entre 70 y 90 cm
- S_norm: valor normalizado (0 a 1) de CE en superficie o 30 cm
- D_norm: valor normalizado (0 a 1) de CE en superficie o 80 cm
- A30_norm: Valor normalizado de amplitud de datos GPR entre 20 y 40 cm
- A80_norm: Valor normalizado de amplitud de datos GPR entre 70 y 90 cm

Se ha empleado un análisis de correlación bivariada de Pearson para analizar estas relaciones y comparar la posible coincidencia entre los resultados de estas dos técnicas estadísticas.

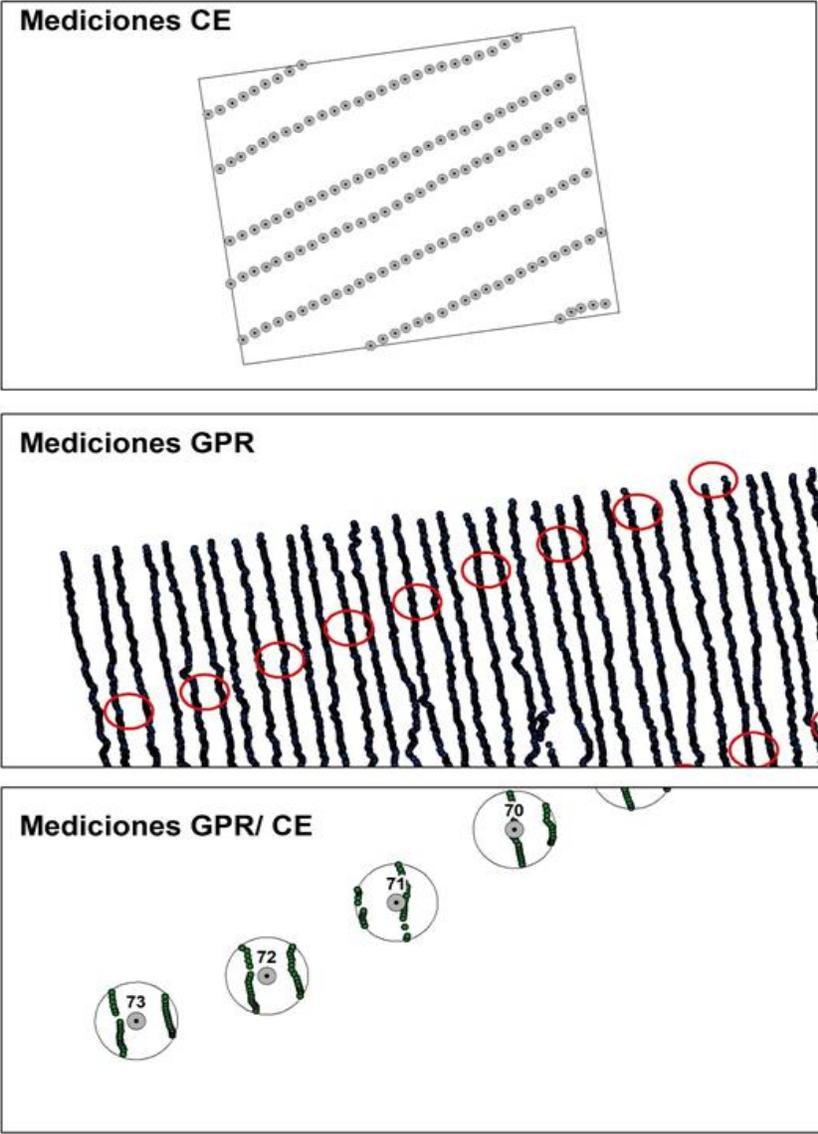


Figura 48 Resumen de la elaboración de la tabla de datos para el análisis comparativo.

5.5.-La Villa Romana De Pisões (Beja, Portugal). Una zona arqueológica asediada por la expansión del olivar intensivo

Introdução

Cada geração usa, cria, aumenta e destrói património. Não se pode guardar tudo o que herdámos, mas é importante saber o que importa conservar. Reconhecidamente a *Villa Romana de Pisões* é uma peça de património que nos chega com algumas mazelas, mas porque encerra mistérios do saber, da técnica e da vida humana de antepassados que nos fascinam e que desafiam a nossa capacidade de investigar e a nossa formação cultural, é um daqueles casos que importa manter, conservar, gerir, estudar e partilhar.

É uma circunstância que, independentemente do nível de responsabilidade e compromisso das autoridades que tutelam este património, colide com obstáculos sempre que se trata de resolver assuntos relacionados com a mobilização de recursos. Uma das formas de contornar algumas destas dificuldades é através da criação de dinâmicas que toquem múltiplas vertentes socioculturais, como ciência, educação, turismo, onde se podem diversificar oportunidades de financiamento e conseqüentemente potenciar os mecanismos de desenvolvimento sustentável. Contudo, não é possível alimentar esta dinâmica apenas com património. É vital criar as condições de atratividade, colocando magnificência ao projeto, assistindo-o com recursos humanos qualificados e dotando-o dos meios físicos adequados.

Assim, o sítio arqueológico de Pisões, situado na freguesia de Santiago Maior, concelho de Beja, classificado de Imóvel de Interesse Público pelo decreto lei nº 251/70 de 3 de junho de 1970 é reconhecido por todos – população local, entidades publicas, tecido empresarial, meio académico e científico – um património da maior relevância cultural, com enorme capacidade para mobilizar dinâmicas socioeconómicas segundo paradigmas baseados no conhecimento, na inovação e na racionalização de recursos capazes de responder aos importantes desafios sociais definidos para esta região. Com efeito, este sítio encerra uma das mais originais *Villae* romanas da Península Ibérica de valor arqueológico notável, descoberta acidentalmente na década de 60 do século XX. Na década de 1970, o arqueólogo amador Fernando Nunes Ribeiro liderou uma escavação prolongada que expõe praticamente todos os vestígios que podem ser observados hoje e edita um livro (Ribeiro, 1972) onde descreve a história da descoberta, resume a distribuição das estruturas nas áreas escavadas e lista os artefactos encontrados. Até à data, a lista de Ribeiro (1972) é a única fonte publicada sobre os materiais encontrados (e processo de classificação) na

primeira escavação dos anos 70 e na pesquisa arqueológica posterior realizada durante o ano de 1979 (Couto, 2007). As escavações arqueológicas de Ribeiro revelaram a *pars urbana* (área residencial) de um monumento singular dentro desses tipos de sítios na Lusitânia Romana. A planimetria mostra-nos um dos mais singulares tipos de átrios itálicos conservados no território português, composto por um pequeno peristilo com quatro colunas rodeado por mais de 40 pequenas divisões distribuídas à sua volta. Virado a sul, um grande pórtico com colunas abre frente a um enorme espelho de água com 40 metros de comprimento, um dos maiores deste tipo de residências particulares em toda a Península Ibérica (Alarcão, 1988). O desenho arquitetónico, o tipo de estruturas conhecidas (Pereira et al., 2013) e o refinamento da decoração, nomeadamente a grande qualidade dos materiais de revestimento do chão, mosaicos e mármore (Costa, 1983; Wrench, 1998), para além das diversas divisões revestidas de estuques policromos, traz à memória uma residência "luxuosa" (Lopes, 2000) com ocupação comprovada entre os séculos I e VIII dC (Alarcão, 1983). Ao lado da residência estão localizados os banhos termais, considerados os exemplos mais relevantes de banhos privados no território português, sendo notável o estado de conservação de alguns compartimentos e, principalmente, de todo o sistema de aquecimento que permite a circulação de ar quente entre paredes duplas e sob o pavimento dos quartos, baseados em um complexo sistema de telhado arqueado de tijolos, chamado hipocausto, excepcionalmente bem preservado (Reis, 2004).

Todas as áreas são cobertas por um sofisticado sistema de abastecimento de água que confirmam a bem documentada engenharia Romana relativa a sistemas de captura, transporte e armazenamento de água (Mays, 2008; Fornell Muñoz, 2009; Chanson, 2010). Além da rede de condutas e tanques, o sistema hidráulico é dominado pela represa Romana adjacente, construída em alvenaria de pedra e argamassa (Quintela et al. 1987), que poderá ter garantido uma parte do abastecimento de água para fins urbanos, rústicos e industriais (Romero, 1995).

Apesar de todas estas evidências arqueológicas, a compreensão completa de Pisões foi prejudicada porque as escavações foram realizadas por equipas não profissionais com metodologias que não integraram registos e análises cronostratigráficas, por isso é difícil entender a dinâmica histórica, as relações espaciais e as funções. Pese a consciência destes factos a verdade é que, pelas mais variadas razões, até hoje ainda não foi possível disponibilizar meios para estudar e divulgar convenientemente o sítio, com a agravante de nos últimos anos até a segurança e a conservação da *Villa* não terem sido assegurados convenientemente.

Conscientes desta realidade e das suas responsabilidades perante ela, a Universidade de Évora, a Direção Regional de Cultura do Alentejo e a Câmara Municipal de Beja decidiram conjugar esforços por forma a conferir ao sítio o rumo que ele suscita: investigação,

valorização e divulgação. Para o efeito foi produzido o “Plano de Ação para a *Villa Romana de Pisões*” (Plano 2016) que traduz estas aspirações e aponta caminhos para as alcançar a partir dos meios instalados nas três instituições nomeadamente ao nível capacidade empreendedora e competência científica e tecnológica instalada na Universidade nos domínios da Arqueologia, Geofísica, Arqueometria, Hidráulica, Arquitetura, Ciências Agrárias, Paisagismo, Computação gráfica, Turismo, Bioquímica, História; todas sustentadas por Centros de Investigação da Rede Científica Nacional.

Deste modo, pretende-se estabelecer no sítio arqueológico de Pisões uma dinâmica de trabalho científico multidisciplinar aplicado à Arqueologia e Ciências do Património que denominamos Campo Experimental para as Arqueociências e Ciências do Património da Universidade de Évora e que terá o seu campo de atuação estruturado em 3 eixos de ação:

1. Investigação e Desenvolvimento
2. Valorização Patrimonial
3. Divulgação e Formação

A operacionalização deste plano requer a existência de um espaço de acolhimento das atividades de investigação e divulgação, dotado dos meios que possibilitem a integração do Sítio Arqueológico de Pisões na oferta científico-cultural e turística da Região Alentejo. Pretende-se um edifício com impacto mínimo sobre a paisagem e sem prejuízo sobre as estruturas arqueológicas. Será uma estrutura que designamos por *Centro de Acolhimento, Interpretação e Investigação da Villa Romana de Pisões* e que, como o nome sugere, serve de espaço laboratorial às atividades de I&D e ao mesmo tempo de acolhimento ao visitante e a ações de formação formal e informal para públicos diversificados incluindo cursos breves, escolas de verão, campus internacionais, e oficinas de Arqueologia experimental ou outras iniciativas associadas à Arqueologia e ao Património.

MATERIALES Y MÉTODOS

PROSPEÇÃO GEOFÍSICA

A Geofísica é uma ciência que estuda a Terra por aplicação dos princípios e leis da Física. Na sua forma aplicada usa um conjunto de técnicas de investigação do subsolo a partir dos valores de várias grandezas físicas medidas à superfície. O resultado são modelos da distribuição espacial das propriedades físicas do subsolo, relacionáveis com as estruturas que compõem esse subsolo. Esses modelos são obtidos por processamento dos dados registados à superfície, através da aplicação de leis físico-matemáticas desenvolvidas para o efeito. O âmbito da aplicação destas técnicas é muito amplo uma vez que abrange o estudo

desde as regiões mais profundas da Terra até à deteção de estruturas muito superficiais. Os ensaios geofísicos apresentados neste relatório têm por objetivo avaliar a presença de estruturas subsuperficiais com potencial arqueológico e esclarecer a sua distribuição espacial no subsolo na área selecionada para a construção de acordo com o critério de impacto visual mínimo. Para aumentar o nível de confiança da prospeção geofísica, foi aplicada uma metodologia de análise baseada no cruzamento de resultados obtidos por três técnicas geofísicas não invasivas distintas: georradar (GPR), tomografia elétrica (TE) e indução eletromagnética (EM) (Figura 1). No caso do GPR foram aplicados dois programas de registo a) perfis em grelha para cobertura integral da área em análise, com vista a processamento 3D; b) perfis isolados nas áreas envolventes da *Villa* com vista à deteção de refletores compatíveis com estruturas arqueológicas. Relativamente à tomografia elétrica foram efetuados perfis sobre malha regular por forma a ocupar a área escolhida. A indução eletromagnética foi aplicada sobre perfis dispersos com o objetivo de procurar anomalias de suscetibilidade magnética e condutividade elétrica a dois níveis de profundidade (0,75 m e 1,5 m).



Figura 49 Dispositivos experimentais utilizados na prospeção geofísica em Pisões

O Georradar (GPR)

O georradar é o método eletromagnético mais recentemente adotado pela Arqueologia e atualmente um dos preferidos devido à rapidez de aquisição de dados e à qualidade dos modelos produzidos. O alcance e resolução desta técnica variam com a frequência das antenas utilizadas, que vão tipicamente dos 100 MHz a 1,6 GHz, em aplicações arqueológicas, e que possibilitam, respetivamente, a deteção de estruturas entre os 15 m e os 5 cm de profundidade. As antenas mais utilizadas para fins arqueológicos rondam os 400MHz; com elas conseguem-se alcances próximos dos 2 m e resoluções que rondam os 20 cm.

O funcionamento do georradar consiste na transmissão de pulsos eletromagnéticos com determinada frequência através de uma antena (Tx) dirigida para o subsolo e na

receção, noutra antena (Rx), da parte da energia desses pulsos refletida nas estruturas enterradas no solo. Cada registo corresponde à parte da energia desse pulso de onda que regressa novamente à antena durante um determinado após a emissão. A amplitude registada em cada instante é relacionável com as propriedades elétricas e magnéticas do meio atravessado em cada profundidade. O registo sequencial destes pulsos de onda numa antena que se arrasta ao longo de determinado perfil pode ser representado num diagrama bidimensional denominado radargrama. O radargrama surge então sob a forma de uma imagem que dá uma visão invulgar da distribuição pelo subsolo das propriedades eletromagnéticas das estruturas que constituem o meio por onde as ondas se propagam (condutividade elétrica, constante dielétrica e permeabilidade magnética). A interpretação do radargrama permite estimar a localização das interfaces entre estruturas de diferentes naturezas eletromagnéticas, que é como quem diz entre materiais com propriedades diferentes. Por interpolação de radargramas contíguos é possível modelar tridimensionalmente a distribuição espacial das estruturas sob a superfície. Há que referir que embora esta técnica seja muito poderosa ela também tem as suas limitações. A principal limitação tem a ver com a baixa penetração das ondas eletromagnéticas em meios de alta condutividade elétrica como sejam os solos argilosos. É uma limitação que afeta a prospeção em Pisões, onde o solo é argiloso.

1.1.1. Tomografia Elétrica (TE)

Os métodos elétricos foram os primeiros a ser aplicados na Arqueologia e continuam a ser bastante utilizados, pois os modelos de resistividade que produzem possibilitam estimar a localização e distribuição espacial das estruturas soterradas. Modernamente os dados de elétrica são processados mediante técnicas numéricas de inversão por forma a produzir modelos tomográficos de resistividade elétrica. Do ponto de vista experimental a técnica consiste na injeção de uma corrente elétrica contínua através de dois elétricos (de injeção) cravados no solo a uma determinada distância um do outro e na medição da diferença de potencial resultante, entre outros dois elétricos (de medição) também cravados no solo. As posições dos elétricos de injeção e de medição vão variando segundo uma sequência pré-determinada, por forma a conseguir-se uma boa cobertura de pontos de medida. Atualmente a aplicação da técnica faz-se segundo um perfilamento multieléctrodo (várias dezenas) (Figura 1) cujos pontos de injeção e medição são controlados por computador por forma a se obterem automaticamente centenas de pontos de dados utilizados para produzir, por inversão, secções verticais bidimensionais de resistividade do subsolo (modelos).

1.1.2. Indução eletromagnética (EM)

Outra classe de métodos extensivamente utilizada em Arqueologia são os chamados métodos eletromagnéticos de indução. Os mais comuns permitem simultaneamente a

medição da condutividade elétrica e da suscetibilidade magnética do subsolo. As profundidades a que esses parâmetros podem ser estimados depende do número de bobines de e da distância entre elas. Os mapas de condutividade elétrica aparente do solo e suscetibilidade magnética obtidos com esta técnica servem de guia para posicionar anomalias que podem ser produzidas por materiais de diferentes naturezas enterrados no solo.

A técnica consiste na indução de um campo magnético variável produzido por uma bobine transmissora (Tx) colocada junto da superfície do terreno. Pelo facto de o solo ser condutor, esse campo induz correntes de Foucault (ou “eddy”) as quais produzem uma perturbação no campo magnético gerado que pode ser avaliada a partir das correntes induzidas numa outra bobine recetora (RX) situada também sobre o terreno e a uma curta distância da bobine emissora.

A profundidade de penetração depende da frequência da bobine emissora e da distância entre as bobines emissora e recetora. Geralmente as duas bobines encontram-se montadas sobre um suporte que as posiciona a uma distância fixa uma da outra. Esse conjunto é deslocado em intervalos regulares ao longo de perfis onde realiza sequências de medidas.

Em cada ponto de medida obtém-se um resultado dos parâmetros a medir no ponto situado a meia distância entre a bobine emissora e recetora e a uma profundidade que depende da frequência usada, bem com da polarização das bobines (horizontal ou vertical). Atualmente há dispositivos destes que possuem mais que uma bobine recetora. É o caso do equipamento que dispomos, Geonics EM38-MK2 (Fig. 2) que mede simultaneamente a condutividade e a suscetibilidade magnética do solo em vários níveis de profundidade e sem precisar de contato direto com ele. Este equipamento possui duas bobinas recetoras, separadas por 1 m e 0,5 m relativamente à bobina emissora, que fornecem dados em intervalos eficazes de profundidade de 1,5 m e 0,75 m quando o equipamento é posicionado na orientação de dipolo vertical, e 0,75 m e 0,375 m, respetivamente, quando orientado horizontalmente.

1.1.3. Método magnético (MAG)

O método magnético consiste na medição do campo magnético à superfície no local a prospectar, tendo como principal objetivo a investigação da subsuperfície. É um método que pode ser aplicado em diversas áreas científicas, como a Geologia e Arqueologia.

De acordo com Kearey et al. (2002), a maioria dos minerais constituintes das rochas não são efetivamente magnéticos, no entanto, certos tipos de rocha contêm minerais magnéticos em quantidade suficiente para produzirem anomalias magnéticas significativas, assim como objetos feitos pelo Homem que contenham ferro na sua composição.

Deste modo, o método magnético possui um vasto campo de aplicação, desde uma escala pequena, como em Arqueologia e Engenharia, para a detecção de estruturas enterradas, por exemplo, vestígios de muros em ambiente Romano, a uma escala maior, como em Geologia, para investigar estruturas geológicas de caráter regional, geralmente associadas a depósitos metálicos. Os levantamentos magnéticos podem ser realizados em terra, mar e ar, sendo facilmente aplicados e por isso amplamente usados.

A variação do conteúdo mineral com comportamento magnético das rochas próximas da superfície provoca modificações locais no campo magnético medido à superfície. As fontes de anomalias magnéticas locais não podem estar localizadas a grandes profundidades uma vez que ultrapassada a temperatura de Curie as rochas perdem as suas propriedades magnéticas. Em geral, as anomalias magnéticas estão associadas a níveis superficiais da crosta terrestre.

Em Arqueologia, o objetivo é analisar as anomalias produzidas por estruturas enterradas no sítio arqueológico, de forma que a prospeção magnética deve ser orientada, tanto a nível metodológico como a nível instrumental, para separar as medidas experimentais do campo magnético total (F) para se obter apenas as anomalias mais superficiais provocadas pelas estruturas (F_{anom} , na Figura 50).

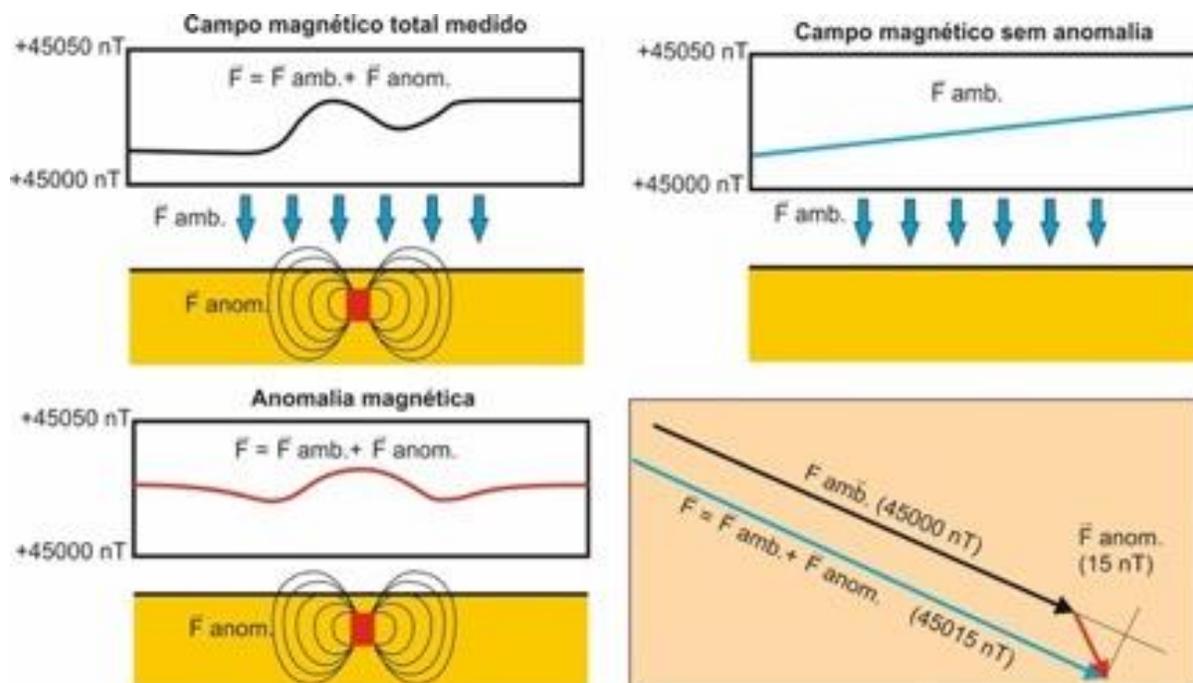


Figura 50 Representação esquemática do conceito de anomalia magnética. A medição inclui todas as contribuições, do campo magnético ambiente e produzido pela anomalia superficial. O objetivo é eliminar o campo ambiente (F_{amb}) e isolar a anomalia (F_{anom}) para ser

interpretada. Em Arqueologia, as anomalias geralmente são de valor muito baixo (entre os ± 20 nT), pelo que os magnetómetros têm que ser muito sensíveis, já que devem discriminar 1 μ o/ooo.

Com estas anomalias mais superficiais isoladas é elaborado o mapa magnético da zona prospectada, obtendo-se uma planimetria magnética que pode ser interpretada (Figura 51). Normalmente, devido ao design do dispositivo experimental, as anomalias magnéticas são produzidas por corpos enterrados situados até profundidades de aproximadamente 2 m, e que no contexto de um sítio arqueológico é atribuída origem antropogénica (como por exemplo, depósitos cerâmicos, fornos ou muros).

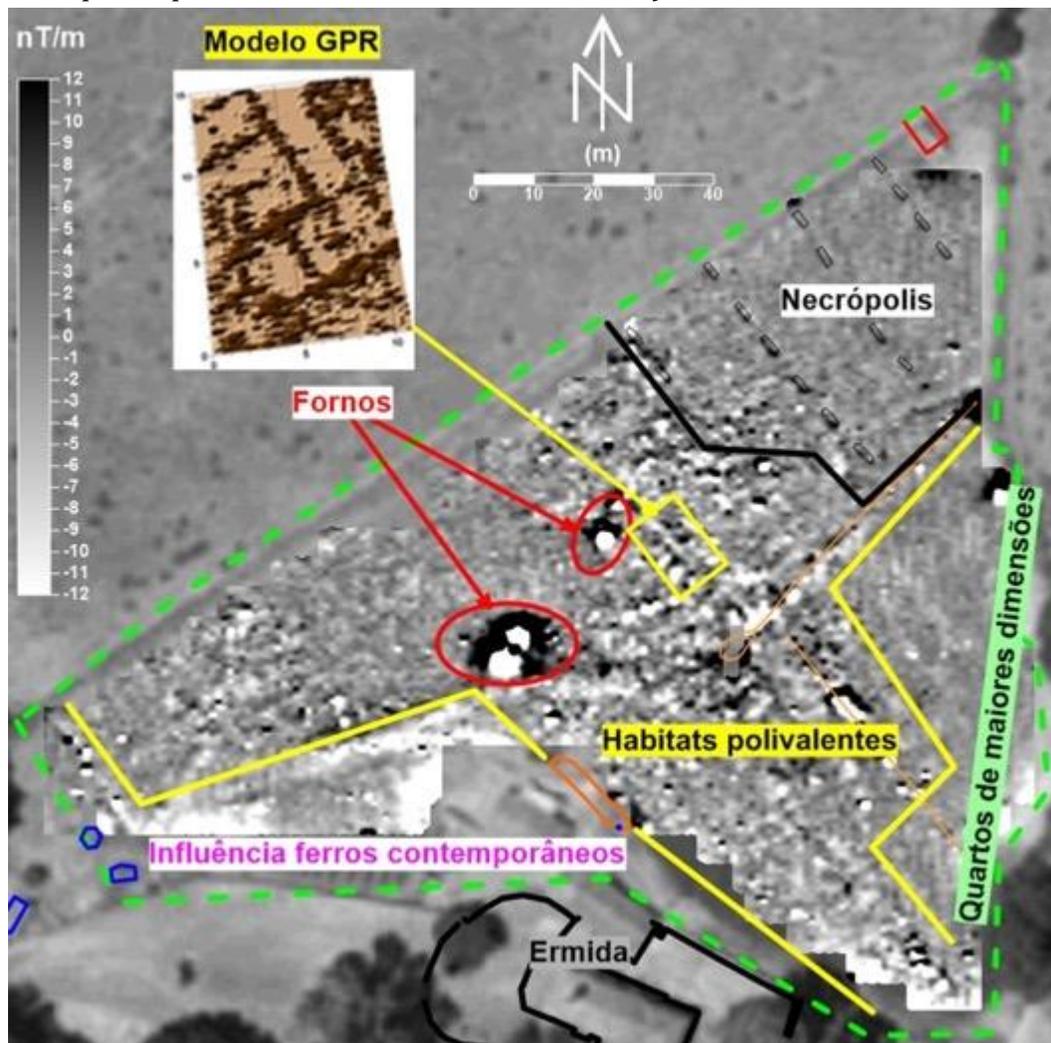
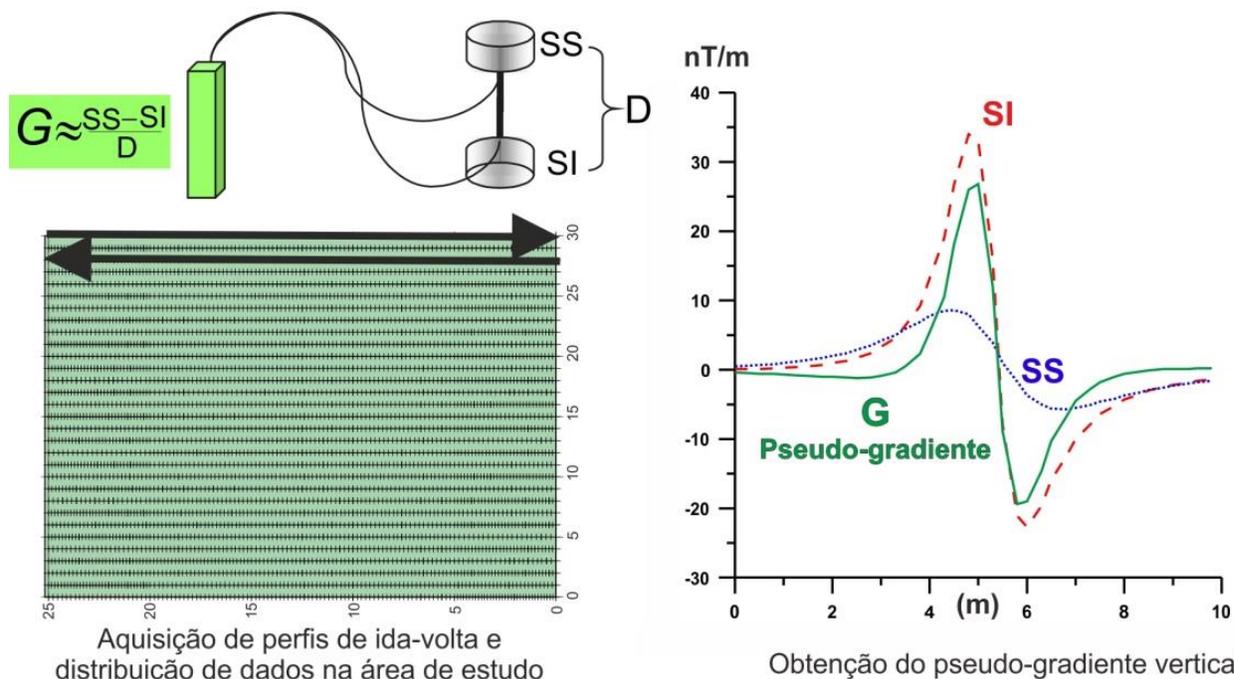


Figura 51 Mapa de anomalias magnéticas na zona da Necrópole do Sítio Romano de El Guijo (Córdoba, Espanha). Note-se que o alcance das anomalias está situado entre ± 12 nT. A zona de habitats possui dados de GPR-3D que ajuda a interpretar os dados magnéticos. Adaptado de Teixidó et al. (2010).

Em Arqueologia, quando se aplica o método magnético por norma opta-se pela configuração em modo gradiómetro vertical para detetar anomalias mais superficiais. A Medição do campo em pseudo-gradiente vertical



Aquisição de perfis de ida-volta e distribuição de dados na área de estudo

Obtenção do pseudo-gradiente vertical

unidade básica de um gradiómetro é formada por dois sensores separados por uma distância fixa e pequena (no que respeita à distância aos corpos que provocam a anomalia). No caso de um gradiómetro vertical (Figura 52), ambos os sensores medem o campo total \vec{B}_T , no entanto, o sensor inferior (SI) está mais afetado pelas estruturas superficiais, de forma que a diferença do campo medido pelos dois sensores possa isolar as anomalias produzidas por esses corpos.

Figura 52 Esquema de aquisição de dados com gradiómetro vertical e representação gráfica dos dados dos dois sensores inferior (SI) e superior (SS). Os dados dos dois sensores são subtraídos e divididos pela distância (D) que os separa para se obter o valor de gradiente (G). A aquisição é realizada em perfis paralelos, modo zig-zag, cobrindo a totalidade da área de estudo.

O processo de aquisição de dados é efetuado de modo a que se crie uma malha de dados com densidade suficiente para que seja possível a identificação das estruturas. Geralmente os dados são adquiridos em perfis paralelos separados de igual distância, em modo zig-zag, a uma velocidade baixa para que se faça uma boa amostragem ao longo do perfil (Figura 53a). Uma vez obtidos todos os dados, é necessário efetuar interpolação espacial para produzir o mapa de anomalias (Figura 53b) que corresponde à sua distribuição espacial.

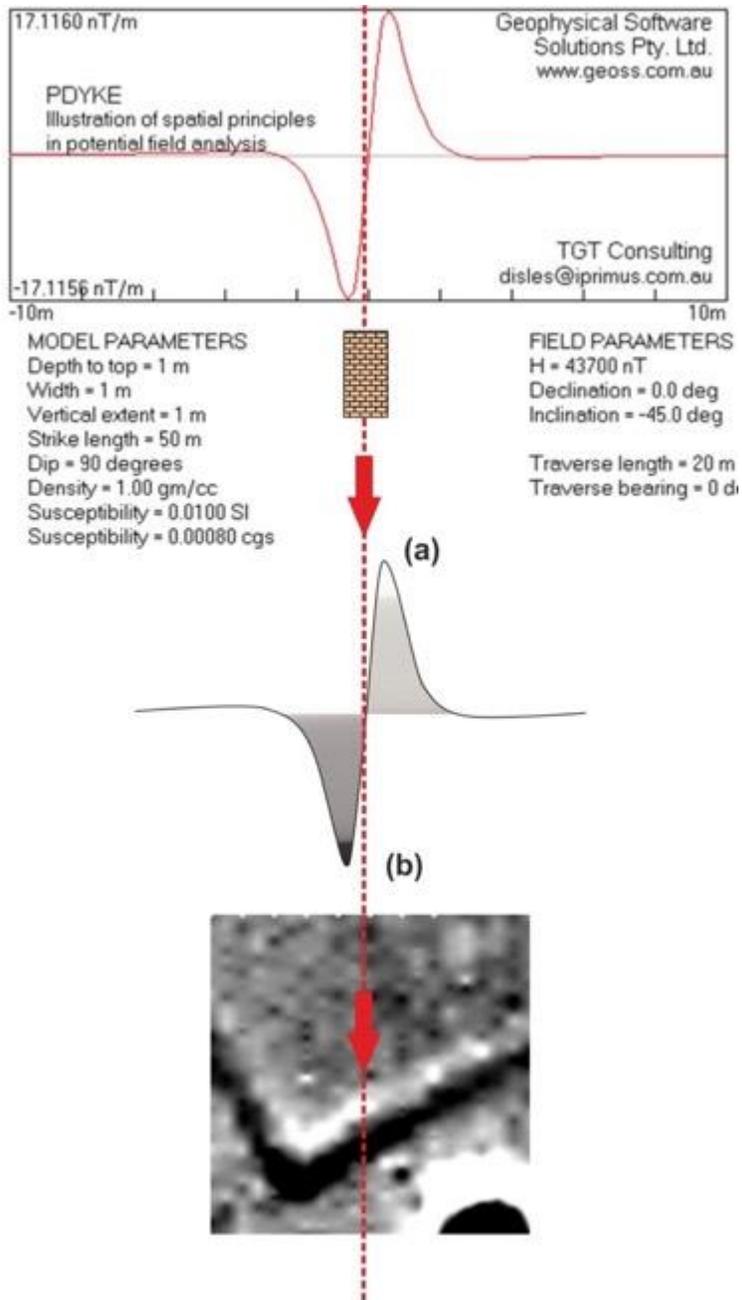


Figura 53 (a) Anomalia magnética produzida por um corpo de 1 m de altura, enterrado a 1 m de profundidade, que simula a secção de um muro. (b) Mapa de anomalias magnéticas construído através da atribuição de uma gama de cores em função das amplitudes das anomalias. Neste exemplo (Peña et al., 2008), são exibidos alinhamentos retilíneos compatíveis com um muro. Neste local existem vestígios de fornos com forma circular. Os resultados geofísicos foram confirmados por escavação. Escala de anomalias de ± 10 nT/m.

Resultados preliminares da Geofísica

Embora atualmente já tenha sido feita prospeção geofísica em várias áreas distribuídas pelo campo arqueológico, no início da prospeção foram efetuados levantamentos experimentais, para estudo de uma área de implementação de um edifício que se pretendia construir no local, assinalada na Figura 6.



Figura 54 Vista aérea do sítio arqueológico de Pisões com indicação das áreas de registo segundo cada uma das técnicas geofísicas utilizadas.

1.1.4. Resultados de GPR

Os registos de GPR foram realizados com um equipamento da marca GSSI, modelo SIR-3000, munido de antena monoestática de 400 MHz. A condução da antena ao longo dos

perfis e o transporte dos restantes módulos, foi executada com um carrinho equipado com roda tacométrica calibrada, para registo simultâneo da posição ao longo dos perfis (Fig. 2). O processamento de GPR incidiu sobre um total de 45 perfis distribuídos por duas áreas (ver Fig. 4). É de salientar que devido à natureza do solo os registos estão muito atenuados, o que dificulta o tratamento de sinal. Foi um processamento conduzido para definir um modelo 3D de amplitudes de reflexão que permite ser visualizado sob a forma de tomogramas em planos horizontais ou verticais. A figura 4 mostra cortes desses modelos relativos às duas áreas consideradas, onde se destaca a maior anomalia na área 1.

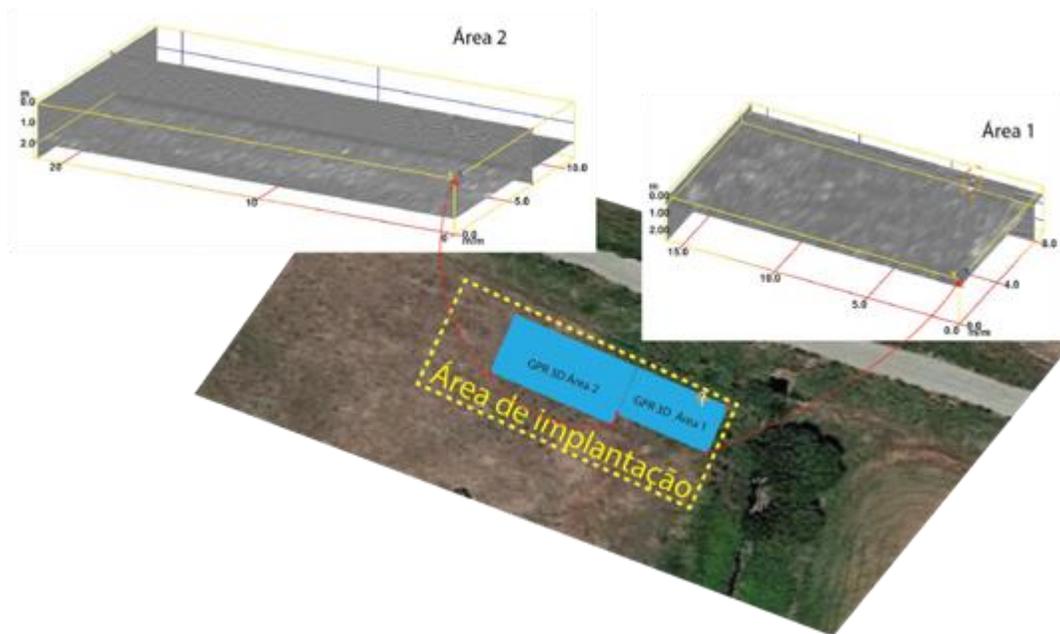


Figura 55 Cortes horizontais e verticais nos modelos 3D de amplitudes de reflexão GPR, relativos às duas subáreas prospectadas da área de implantação. O refletor mais expressivo das duas áreas encontra-se assinalado por uma elipse de cor laranja no modelo da área 1.

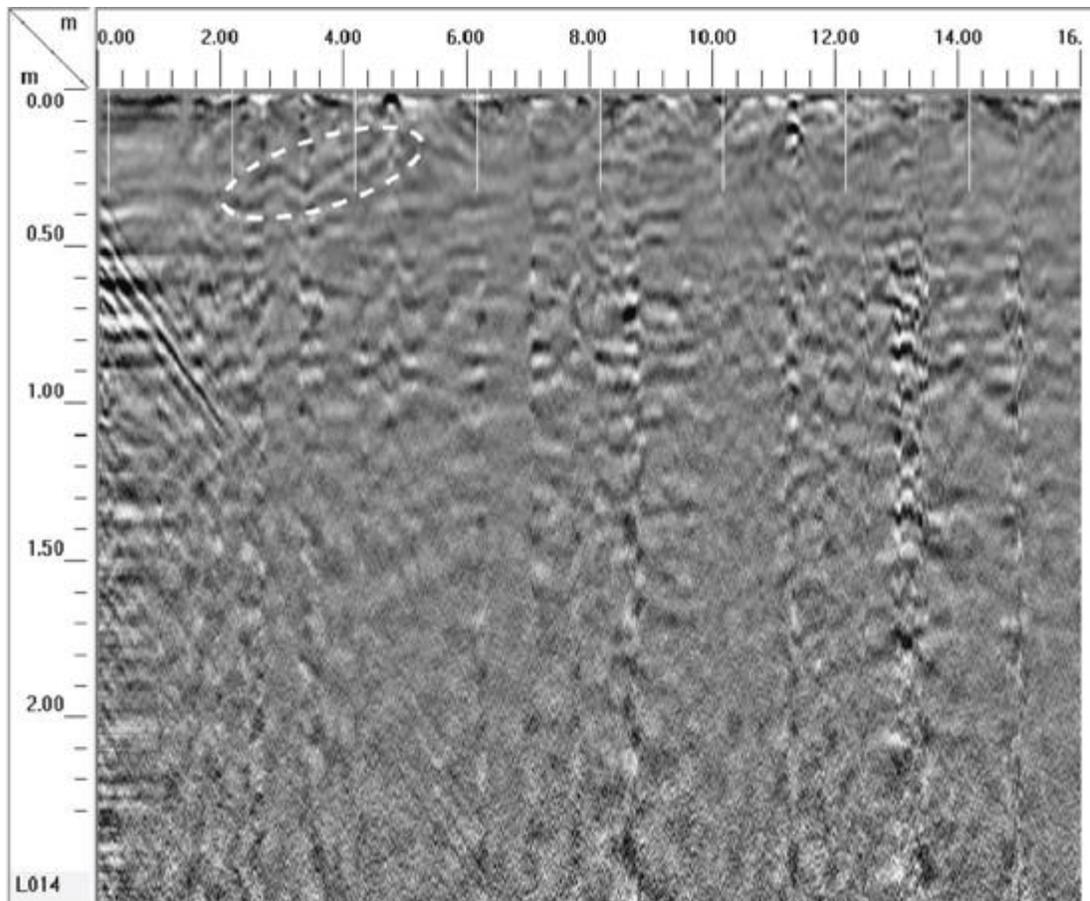


Figura 56 Radargrama processado relativo à área 1 onde se assinala (elipse de cor branca) o refletor correspondente ao assinalado na Figura 4.

1.1.5. Resultados de EM

Os registos EM foram efetuados com um sistema Geonics EM38-MK2 equipado com GPS diferencial para localização automática dos dados. Na área de implantação apenas foi realizado um perfil (em dois sentidos) paralelo à estrada e a cerca de 2 m da vedação. A Fig. 6 identifica a localização dos registos no terreno e apresenta os valores da condutividade e da suscetibilidade magnética medidos ao longo do perfil. É bem visível uma forte anomalia em ambos os parâmetros medidos, cuja localização no terreno está assinalada sobre o mapa da zona.

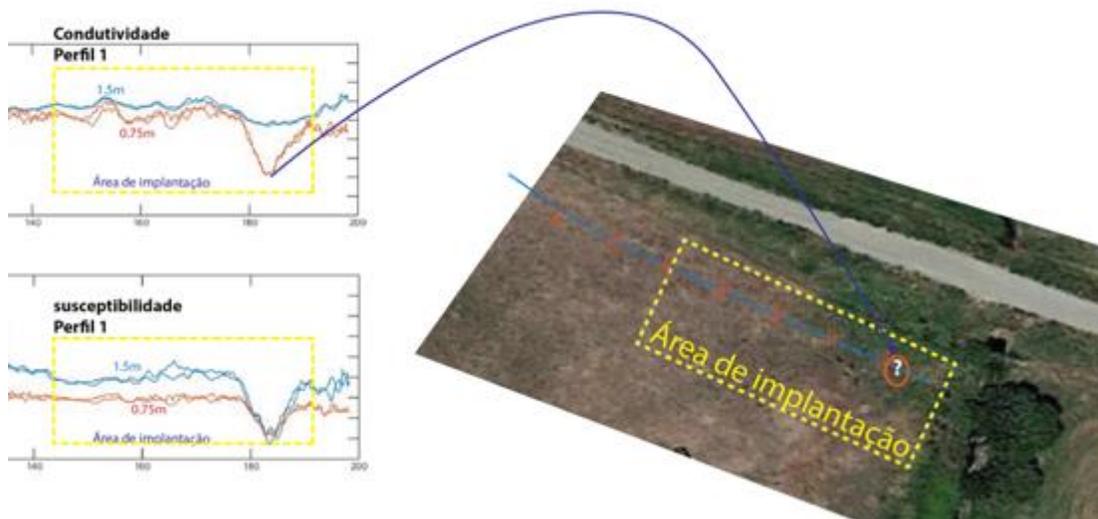


Figura 57 Painel da esquerda - valores da condutividade elétrica e da suscetibilidade magnética registados ao longo de um perfil representado a azul na figura do painel da direita, que indica a posição da anomalia visível nos dados.

1.1.6. Resultados da TE

Os registos de elétrica foram efetuados com um dispositivo de tomografia elétrica marca PASI, com 32 elétrodos dispostos segundo perfis lineares e com separação entre elétrodos de 0.5 m. Foi usada uma configuração de aquisição dipolo-dipolo. De acordo com esta configuração cada perfil tem o comprimento de 15.5 m, pelo que para se conseguir maiores extensões de varrimento foi preciso deslocar sucessivamente o dispositivo ao longo da mesma linha. Desta forma, mediante três instalações, conseguiram-se perfis com 46.5 m de comprimento. A fim de cobrir a área de implantação foram feitas sondagens segundo quatro alinhamentos paralelos e separados de 1.5 m. A Fig. 7 (painel da esquerda) apresenta um esquema da geometria dos levantamentos de elétrica. O cálculo dos modelos topográficos foi feito por inversão linear dos valores de resistividade aparente. Para o efeito foi usado o software RES2DINV. Posteriormente os resultados foram concatenados e interpolados (com o software Golden Voxler) para produzir o modelo 3D de resistividade representado na Fig. 8.

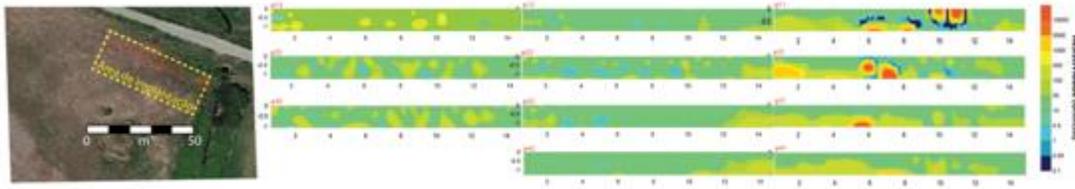


Figura 58 Painel da esquerda- indicação da área onde se montaram os 11 perfis de 32 elétrodo cada, para o registo de dados de elétrica, cuja inversão produziu os modelos de resistividade elétrica (tomografia) mostrados no painel da direita.

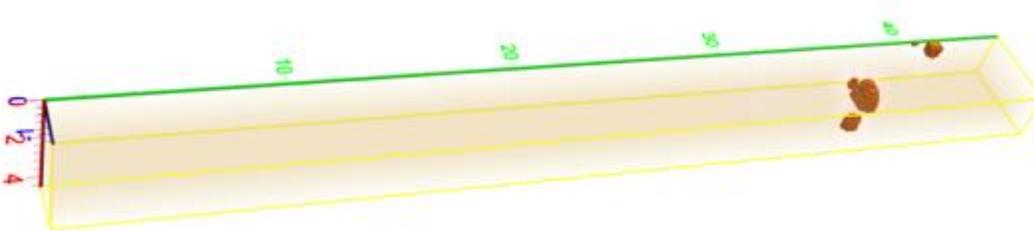


Figura 59 Modelo 3D de resistividade elétrica onde se notam sobressaem as zonas onde se registam as maiores anomalias de resistividade elétrica.

1.2. PROSPEÇÃO GEOFÍSICA INTENSIVA

Numa primeira etapa foi planificada uma prospeção magnética intensiva em modo pseudo-gradiente vertical aplicada em vários setores (Figura 60) de modo a cobrir a superfície com maior potencial de interesse arqueológico. Sobre o mapa de anomalias magnéticas resultante foi selecionado o setor A1 para realizar provas de deteção GPR, devido à grande possibilidade de existirem estruturas hidráulicas de abastecimento das termas.

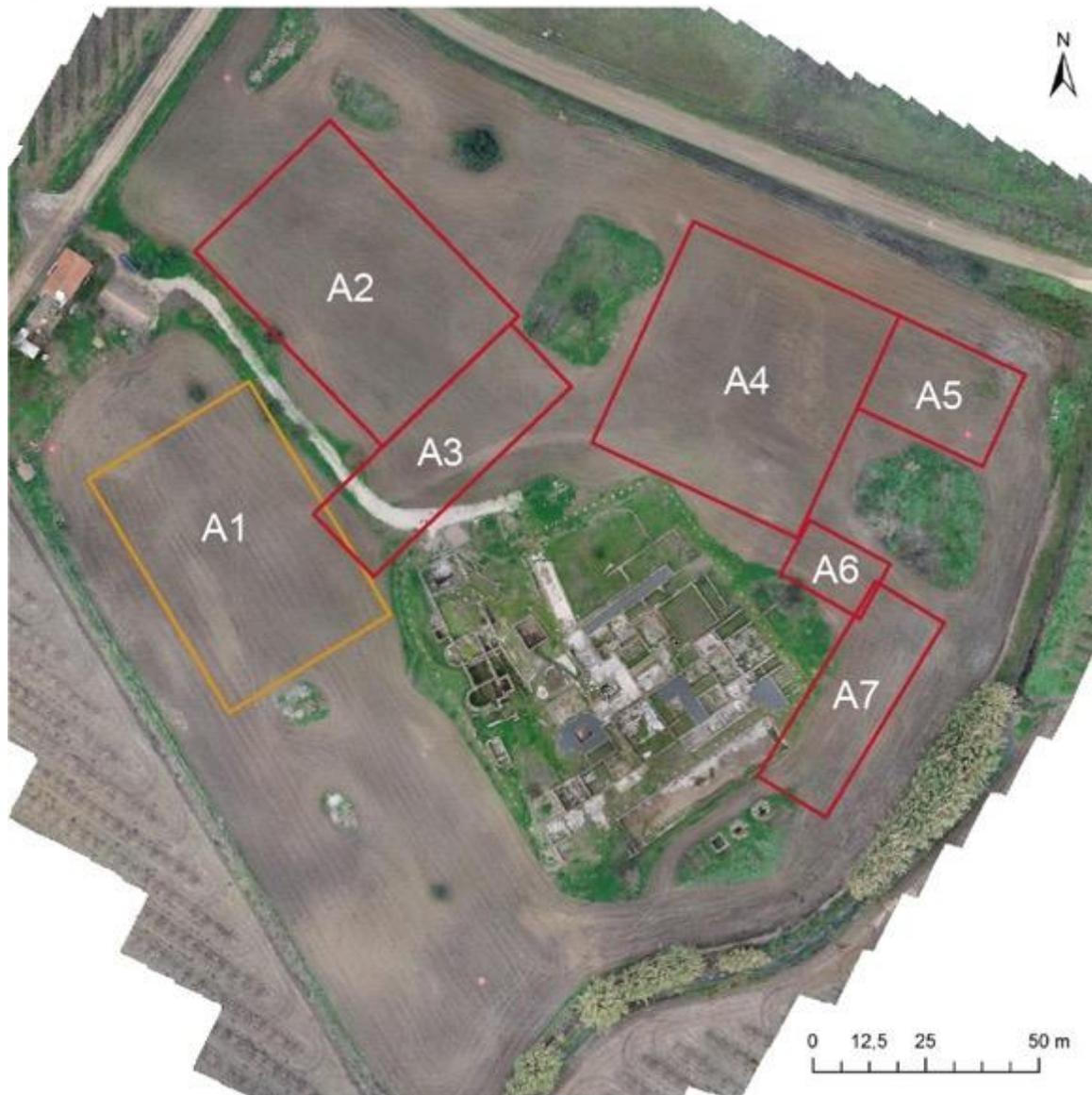


Figura 60 Localização dos setores onde foram efetuados levantamentos geofísicos. O levantamento de GPR foi efetuado no setor A1. O levantamento magnético foi realizado em todos os setores.

1.2.1. Prospeção magnética

Aquisição e análise dos dados magnéticos

A aquisição magnética foi efetuada em modo de pseudo-gradiente vertical com um *array* de magnetômetros de precessão protónica *overhauser* (GEMSYS GSM-19). Este levantamento foi realizado através do varrimento de todos os setores em perfis paralelos (zig-zag) espaçados de 0.5 m, com controlo de marcas a cada 10 m, para posterior correção de desfasamentos (Figura 61). No total foram adquiridos 417 perfis que somam uma distância linear de 21240 m.

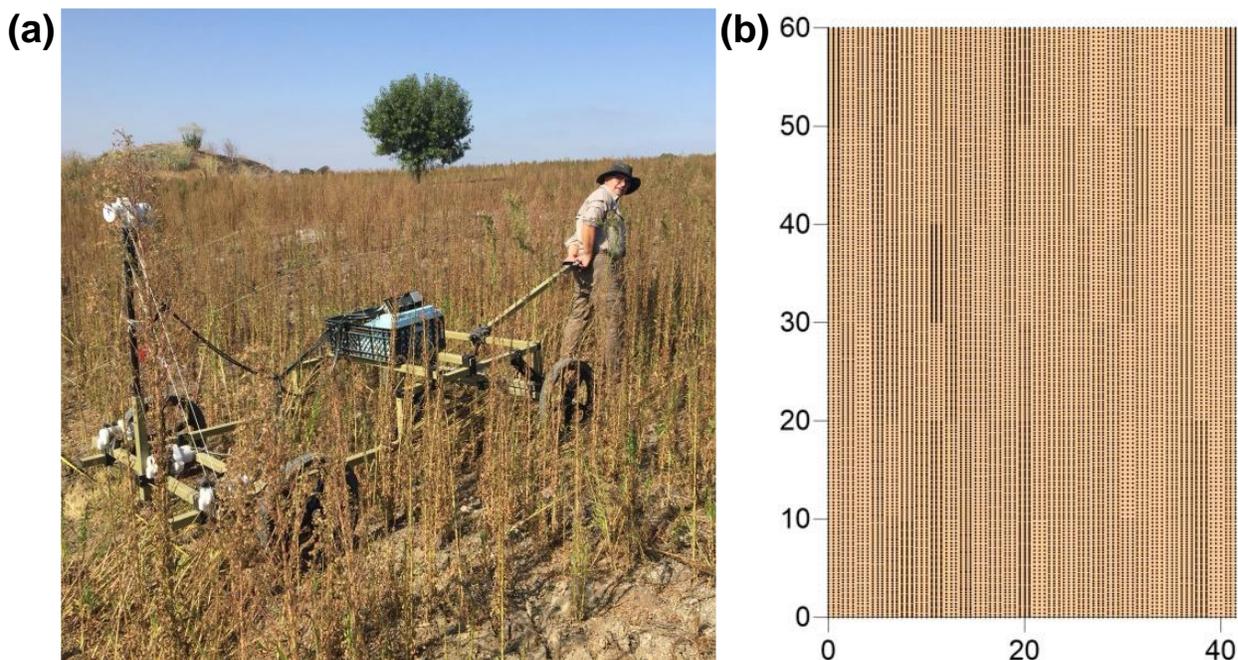


Figura 61 (a) A aquisição de dados magnéticos foi realizada com um array de 4 magnetômetros *overhauser* dispostos em T invertido como se mostra na fotografia. (b) Esquema final da malha de pontos obtidos pelo varrimento dos perfis em modo zig-zag. Cada ponto corresponde a um valor em bruto do gradiente magnético resultante da diferença entre o valor medido em cada sensor inferior e o sensor superior (distância de separação vertical de 1 m). A distribuição de pontos no espaço é irregular devido à variação da velocidade do transporte do array.

Antes do processamento houve necessidade de analisar os dados brutos, para planificar o fluxo de operações e determinar os parâmetros a fixar nos algoritmos. Nesta primeira aproximação aos dados magnéticos foram detetadas duas características relevantes, exibidas na Figura 62: (i) Distribuição dos valores médios do gradiente magnético das anomalias onde se distinguem duas gamas de valores, distribuídas por várias zonas da área: uma de valores baixos, compreendidos entre ± 10 nT/m, e outra com valores médio elevados (este aspeto será posteriormente analisado). ii) Dependência da direção de aquisição dos perfis que produz nos mapas um “bandado de fundo” característico.

Para avaliar a relação entre o ruído de fundo e o sinal contido em cada setor foi realizada uma análise espectral bidimensional (Bras & Rodriguez-Iturbe, 1985; Ripley, 2005) através do cálculo dos espectros de energia 2D e distribuição espacial. A Figura 63 apresenta diagramas com os resultados desses cálculos para a área A1. O espectro de amplitudes (Figura 63b) evidencia uma componente predominante em torno do centro do espectro ($k=0$), que corresponde à direção de aquisição N-S, enquanto que para as outras direções possui um comportamento simétrico. Por outro lado, a distribuição espacial da energia (Figura 63c) também indica um eixo de anisotropia na direção N-S.

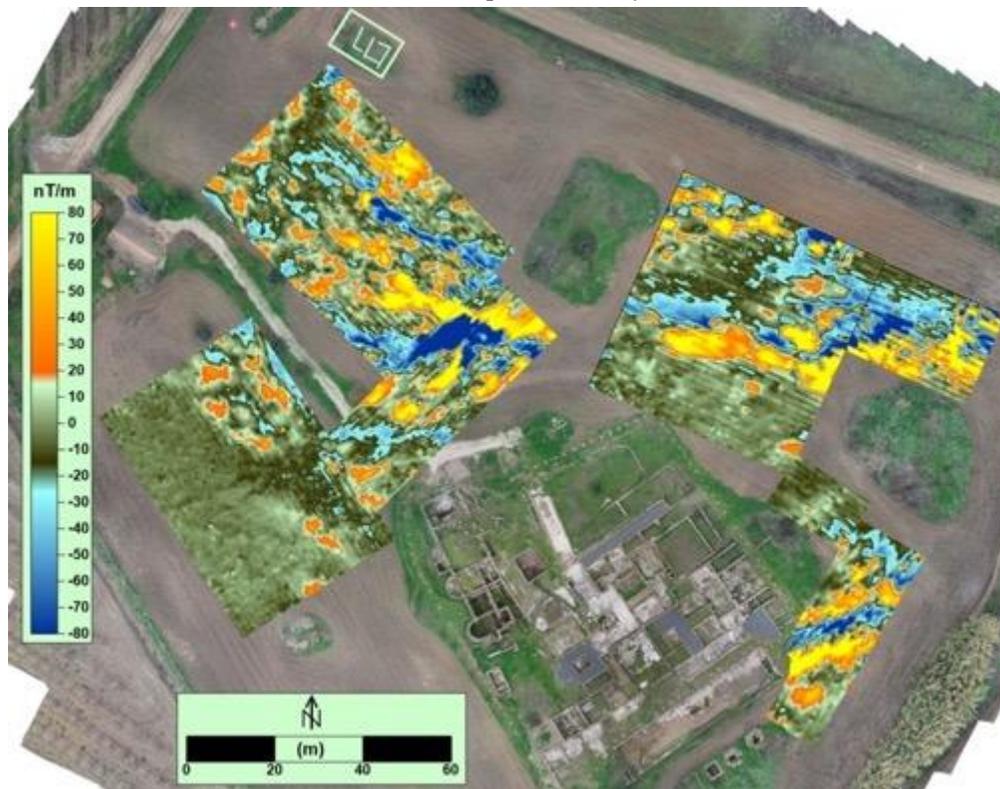


Figura 62 Mapa de anomalias do campo magnético (dados brutos), em que se observam várias sub-zonas com valores médios distintos: Uma parte da superfície prospectada apresenta valores médios elevados e a restante valores médios baixos. Nesta fase do processamento ainda é visível em todos os setores uma forte dependência da direção de aquisição dos dados. A distribuição irregular dos dados foi corrigida através de interpolação para criação de malhas regulares.

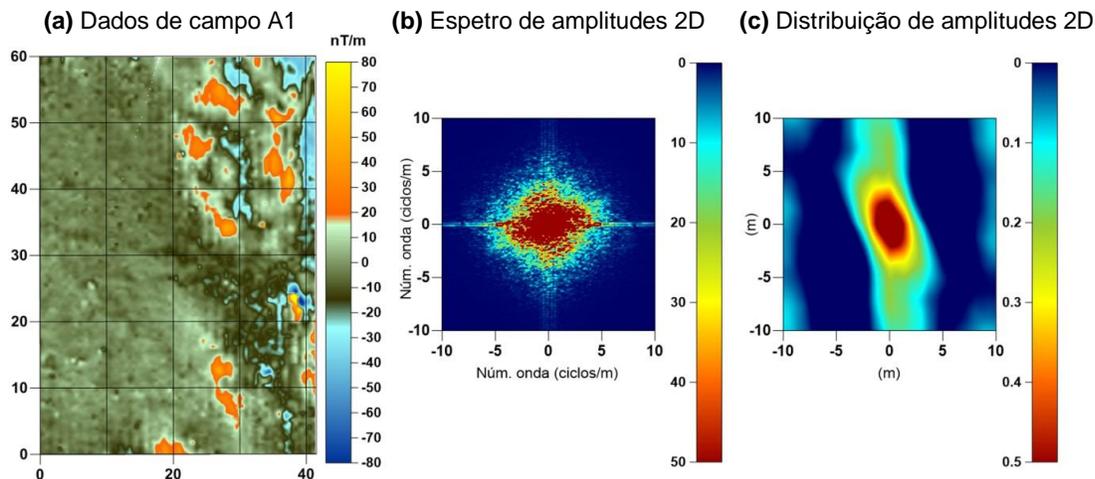


Figura 63 Análise espectral do sinal de campo correspondente à área A1. (a) Mapa de anomalias magnéticas analisado. (b) Espectro de amplitudes que representa a periodicidade espacial do sinal, onde se lê um alcance aproximado de ± 5 ciclos/m. (c) Distribuição espacial de amplitudes estendida ± 10 m de cada ponto da malha.

Processamento do sinal magnético

Na Tabela 1 estão indicados os passos do processamento aplicado a todos os setores magnéticos, cujo efeito das operações está representado na Figura 64. Antes de se aplicarem estas operações é necessário corrigir os efeitos de paralaxe e construir malhas regulares com algoritmos próprios.

Tabela 1 Fluxo de processamento para dos mapas de anomalias magnéticas.

Processos	Objetivo/Parametrização
Clipping a ± 20 nT/m	Para potenciar as anomalias de tipo induzido
Eliminação do bandeado	Mediante filtros de media móvel
Aplicação do filtro Gaussiano	350
Aplicação do filtro passa-banda	350 – 4000
Redução ao polo magnético	Maior definição gráfica

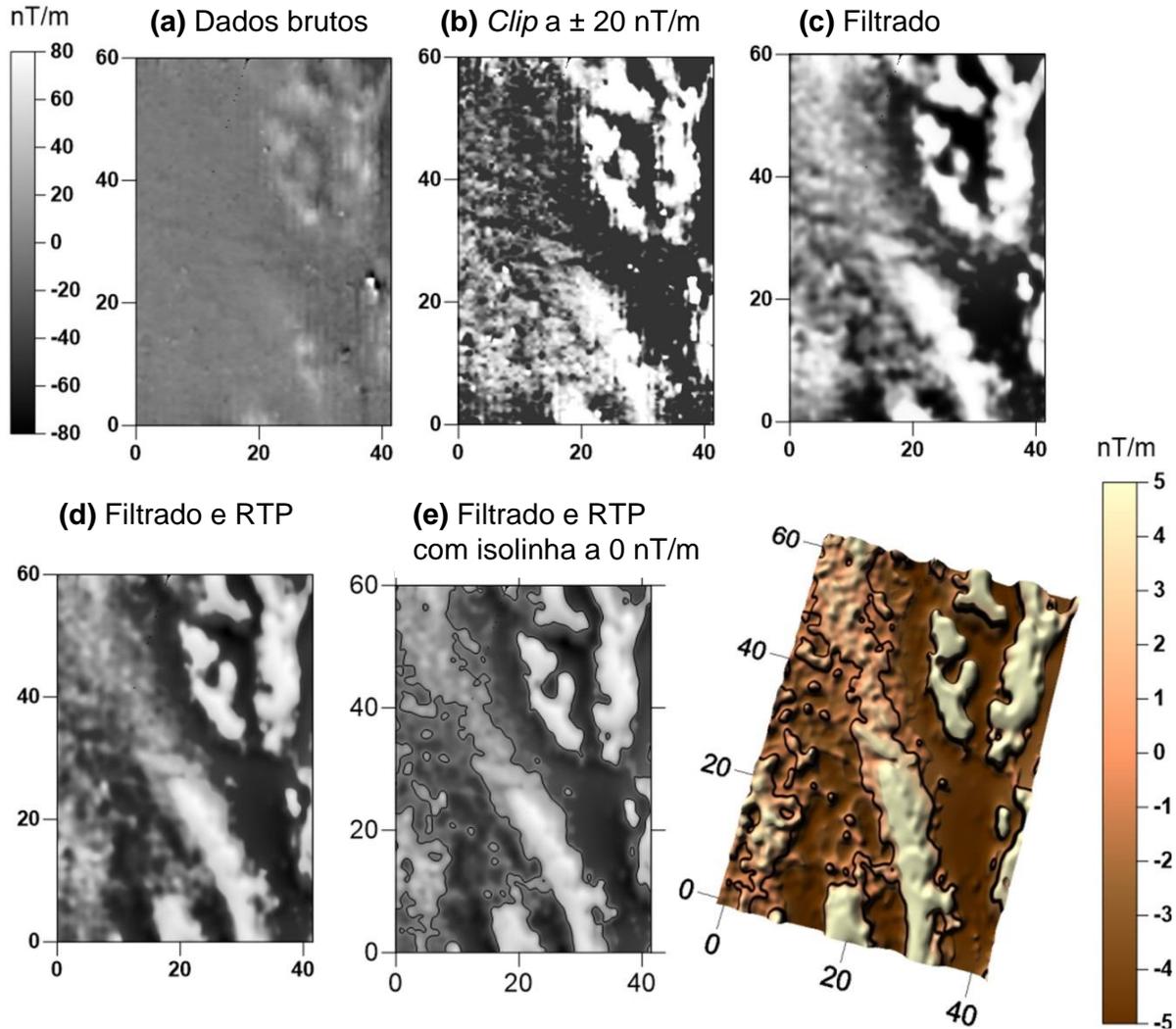


Figura 64 Resultados do processamento na área A1. Projeção dos dados brutos (a), para definição do intervalo de valores de amplitude a considerar, em que se pode observar que a maioria das amplitudes estão definidas entre ± 20 nT/m (b). (c) Resultado dos filtros para eliminação do bandado. (d) Dados filtrados com redução ao polo magnético. (e) Mesmo conjunto com representação da isolinha correspondente a 0 nT/m. A última imagem é o mesmo mapa magnético representado em relevo.

Em primeiro lugar foi realizado um estudo para definição do intervalo de valores significativos para cada mapa de anomalias (Figura 64a), de forma a eliminar-se todas as anomalias mais fortes, atribuídas a magnetismo do tipo férrico, para se poder realçar as anomalias do magnetismo induzido (Figura 64b). A maioria dos valores significativos encontram-se definidos entre ± 20 nT/m, que corresponde a magnetismo induzido (estruturas de alvenaria, entre ± 10 nT/m) e remanescente (materiais argilosos cozidos).

O bandado de fundo foi eliminado com um filtro Gaussiano e um filtro passa-banda, ambos aplicados no domínio espectral no programa Oasis montaj (Geosoft, Inc.). O resultado de cada sequência foi combinado num único conjunto final (Figura 64c). Adicionalmente foi também aplicada a operação redução ao polo magnético (RTP) ao mapa de resultante com o objetivo de “verticalizar” as anomalias magnéticas (Figura 64d).

O mapa de anomalias final da área A1 encontra-se representado nas imagens da Figura 64e, onde se pode observar variações espaciais de amplitude que definem alguns alinhamentos que parecem sugerir tratar-se de vestígios de condutas. Desta forma, na Figura 65 está representado o mapa de anomalias do conjunto das sete áreas resultantes do mesmo processamento.

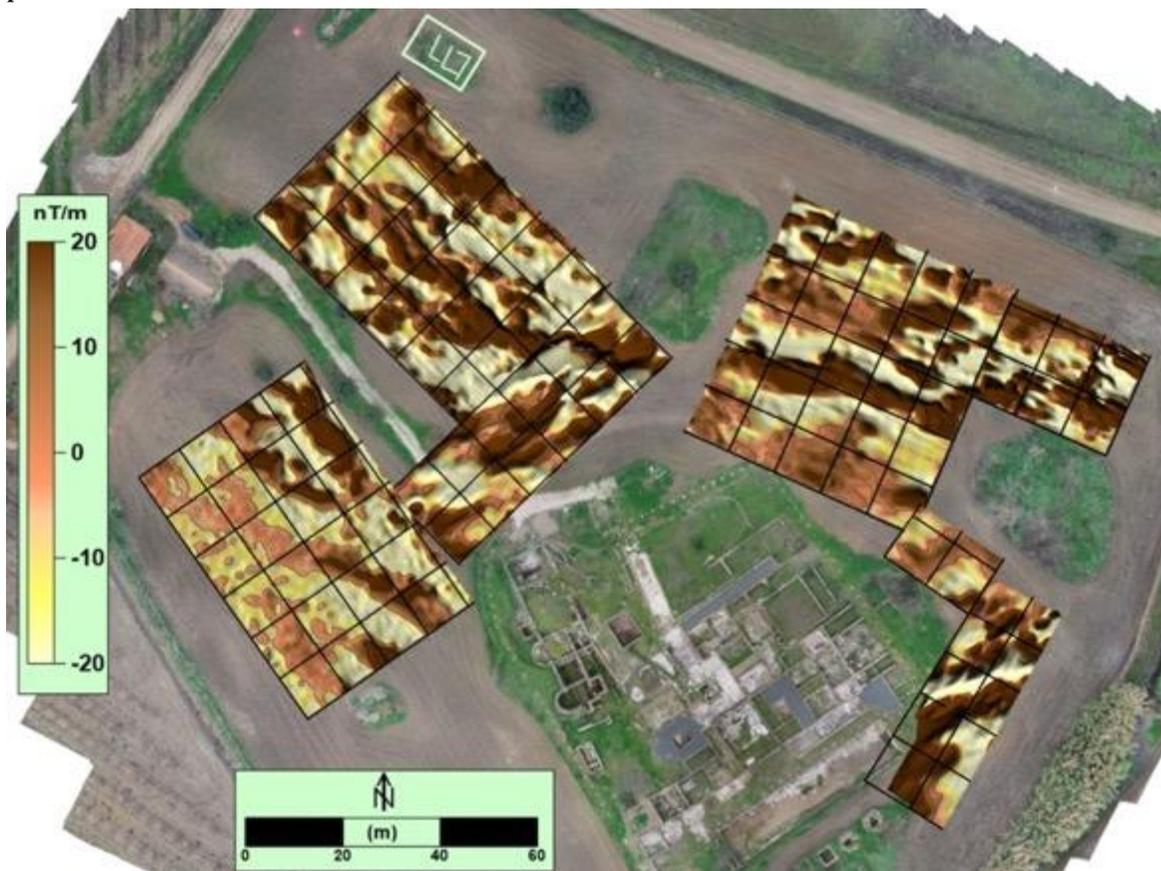


Figura 65 Resultados dos levantamentos magnéticos de gradiente vertical realizados nas 7 áreas de estudo prospectadas. Todos os conjuntos de dados foram filtrados com as mesmas sequências de operações, adaptadas a cada conjunto de dados, com aplicação adicional da redução ao polo magnético.

1.2.2. Prospecção GPR

Nas secções anteriores foi mencionado que a exploração GPR foi realizada em modo experimental na área A1 já que o mapa de anomalias magnéticas apresenta um agrupamento de valores elevados na metade NE e de valores baixos na outra metade. Foi também considerada a grande possibilidade de existirem estruturas hidráulicas, dado que parecem existir indícios arqueológicos que indicam a presença de condutas do tipo aqueduto nas imediações e que o traçado mais provável para o fornecimento de água às termas passará na área A1, com orientação NW-SE em direção às termas já que o declive do terreno possui direção de inclinação SE.

Aquisição e análise dos dados GPR

Na Figura 66 está exibido o detalhe da exploração de GPR efetuada no setor A1, que consistiu no varrimento do terreno pelas antenas segundo perfis paralelos espaçados de 0.5 m, em modo zig-zag, com a mesma orientação dos perfis magnéticos. Neste caso a aquisição foi planificada tendo em conta que se presumia que o sinal de GPR tivesse baixa qualidade, razão pela qual foram utilizadas antenas de duas frequências, 400 e 200 MHz. Pretendia-se determinar o grau de deteção, tendo em consideração um dos campos de aplicação das antenas destas frequências, a prospecção arqueológica, mencionado no Capítulo 2. A antena de 400 MHz possui um alcance médio entre 0.2 e 2.5 m, e para a antena de 200 MHz entre 0.3 e 4 m.

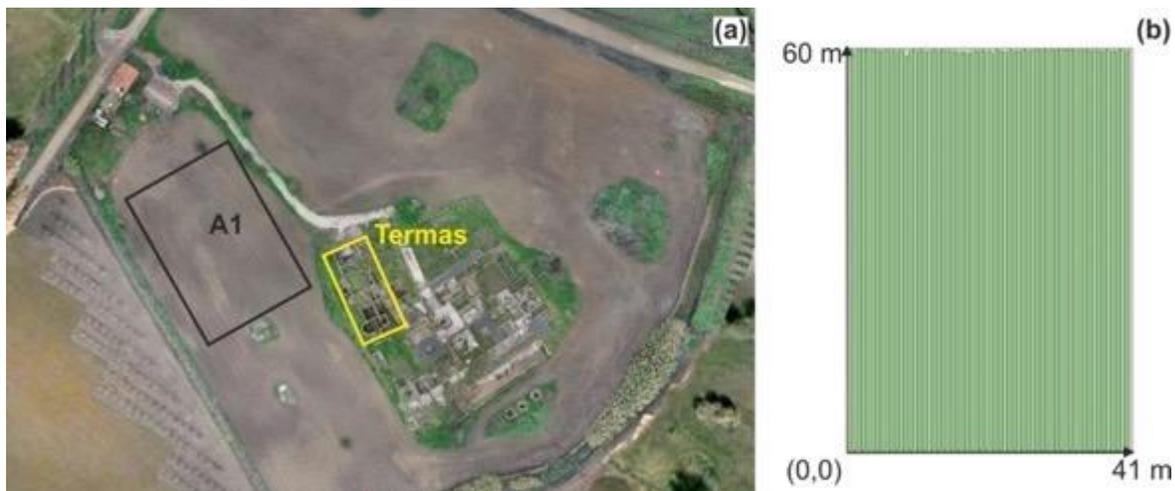


Figura 66 (a) Vista detalhada do setor A1 explorado com prospecção magnética e GPR. (b) Esquema de aquisição dos perfis de GPR, numa área de 41 x 60 m, adquiridos em modo zig-zag, espaçados de 0.5 m e com a mesma direção dos perfis magnéticos.

Na Tabela 2 encontram-se representados os parâmetros que configuraram o sistema, para a aquisição com as duas antenas de GPR.

Tabela 2 Parâmetros de aquisição do conjunto de dados de GPR-3D obtidos com as duas antenas de GPR.

Parâmetros de aquisição	Antena de 400 MHz	Antena de 200 MHz
N.º de perfis	83	83
Distância entre perfis	0.50	0.50 m
Taxa de amostragem	40 traços/m	20 traços/m
Espaçamento horizontal (<i>dy</i>)	0.025 m	0.050 m
N.º de amostras/traço	1024	1024
Alcance temporal	60 ns	100 ns
Espaçamento entre amostras (<i>dt</i>)	0.06 ns	0.001 ns
Filtro IIR passa-banda	100-850 MHz	50-600 MHz

A análise dos dados foi precedida da avaliação de alguns aspectos cruciais: i) relação sinal-ruído dos conjuntos de dados; ii) intervalo de frequências do sinal refletido.

Após a análise individualizada dos radargramas brutos foram selecionadas duas porções homólogas de cada um dos conjuntos (Figura 67), em que foram definidos intervalos de frequências desses dados (Figura 68).

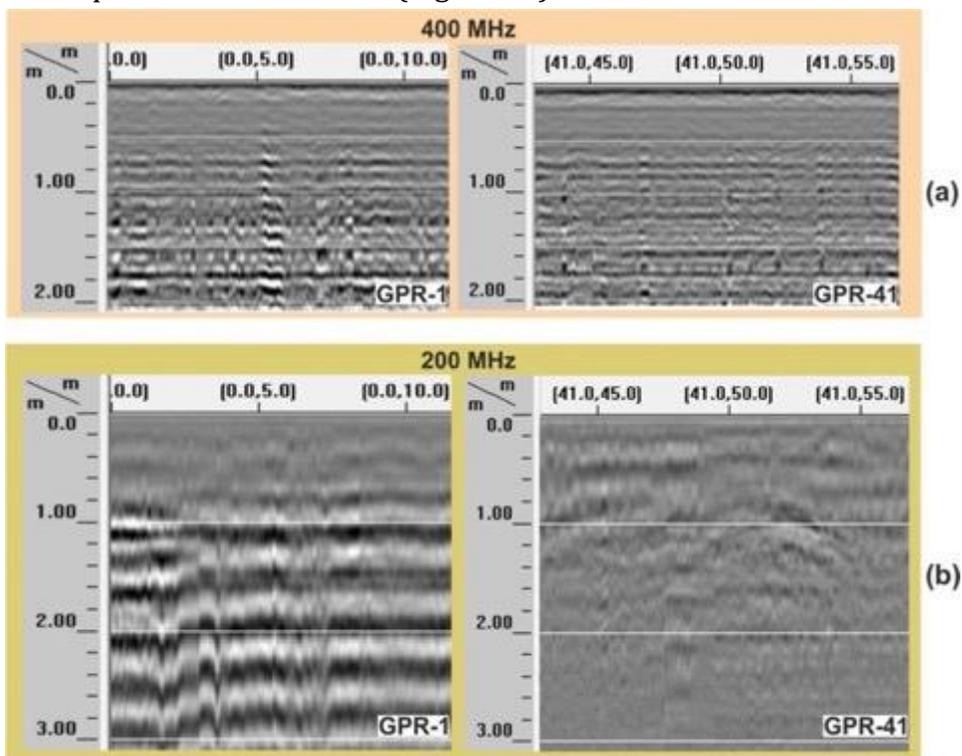


Figura 67 Porções de radargramas de campo homólogos, pertencentes aos dois conjuntos de dados de GPR (200 MHz e 400MHz).

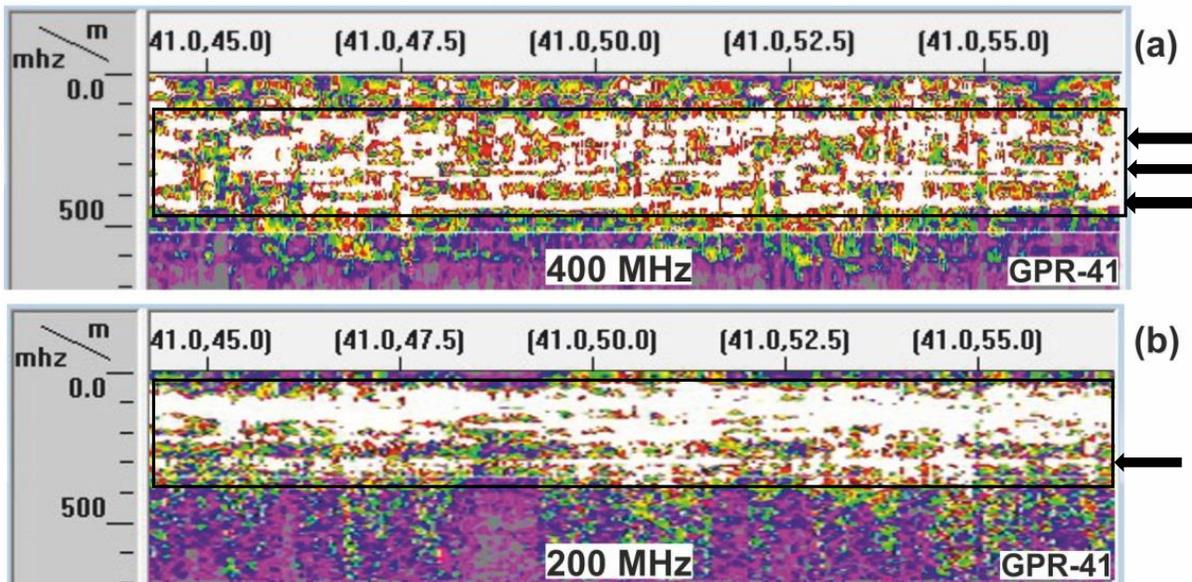


Figura 68 Espectros de frequências das duas porções dos radargramas considerados na Figura 67, correspondentes aos dados de 200 MHz e 400 MHz. As áreas mostram onde existe maior energia refletida (indicada pela cor branca). As setas indicam a energia correspondente aos primeiros harmónicos do background.

A análise dos dois espectros permite observar que a energia refletida conserva o padrão de radiação da energia emitida (intervalo de frequências entre os valores definidos pelos filtros na aquisição). Nota-se também que no espectro da antena de 400 MHz (Figura 68a) são detetadas bandas de mono-frequência que correspondem a reflexões múltiplas provocadas pelos “ecos” da onda aérea (primeiros harmónicos do *background* a 160, 260 e 420 MHz). Nestas bandas está concentrada a maior parte da energia, o que explica a falta de sinal útil. Por outro lado, para a antena de 200 MHz há uma banda densa de energia refletida entre os 50 e 350 MHz sobreposta ao *background*, indicando a presença de sinal útil.

A não deteção de sinal útil que se observa na antena de 400 MHz pode dever-se à alta condutividade do terreno de Pisões (aluviossolos/Barros Negros de Beja), que produz uma barreira à propagação da OEM, em que há uma forte atenuação (Oliveira et al., 2015), confirmada pela determinação do parâmetro *skin depth* (δ). Para uma atenuação de 1.81 (calculada para este solo considerando a sua composição argilosa húmida: $\sigma = 50$ mS/m e $\epsilon_r = 27$), $\delta = 0.55$ m. Nesta pouca profundidade de penetração, a estimativa de percentagem de energia refletida é de 5.15 % da energia emitida, o que significa que o meio atenua

drasticamente o sinal emitido e que a energia não chega à profundidade do estrato arqueológico, que como se verá posteriormente, o seu teto está localizado a cerca de 0.5 m da superfície.

Por outro lado, se se considerar uma velocidade de propagação das OEM de 0.058 m/ns (determinada experimentalmente a partir da análise de alguns perfis obtidos nesta área), o comprimento de onda central para a antena de 400 MHz neste terreno é de $\lambda \cong 0.14$ m. Aplicando o critério de *Huygens*, $\frac{\lambda}{4} \cong 0.035$ m, que corresponde à dimensão das partículas que se podem ser detetadas. O diâmetro médio dos aluviossilos e limos de Pisões varia entre 0.004 e 0.064 m, pelo que a maioria destas partículas deverão interatuar com o pacote energético da OEM produzindo reflexões pontuais em todas as direções (*scattering*, Capítulo 2), provocando a dispersão da energia.

Ao efetuar-se os mesmos cálculos para a antena de 200 MHz, obtém-se um comprimento de onda central de $\lambda \cong 0.29$ m, com $\frac{\lambda}{4} \cong 0.07$ m, de forma que é produzido menos *scattering* e há maior penetração. Isto significa que com esta antena é possível detetar, neste tipo de terreno, estruturas enterradas entre 1 e 2.5 m de profundidade, como é o caso do perfil GPR-41 da Figura 67.

Também foi realizada uma estimativa para o valor de velocidade média aplicando a operação de migração a uma porção de radargrama que contenha hipérboles de difração a diferentes profundidades e em várias localizações do perfil. No radargrama considerado (Figura 69) foram calculadas velocidades através do ajustamento da largura e abertura das hipérboles (H), tendo sido identificados três tipos de materiais:

- H1 - Nível em torno dos 10 ns, com $v=0.016$ m/ns, correspondente a solo orgânico com águas pluviais, com constante dielétrica de 6.4.
- H2 - Nível em torno dos 23 ns, com $v=0.058$, correspondente a material calcário húmido pertencente a estruturas de alvenaria, com constante dielétrica de 8.0.
- H3 - Nível em torno dos 30 ns, com $v=0.095$ m/ns, correspondente a material limo-argiloso húmido do material encaixante, com constante dielétrica de 2.5.

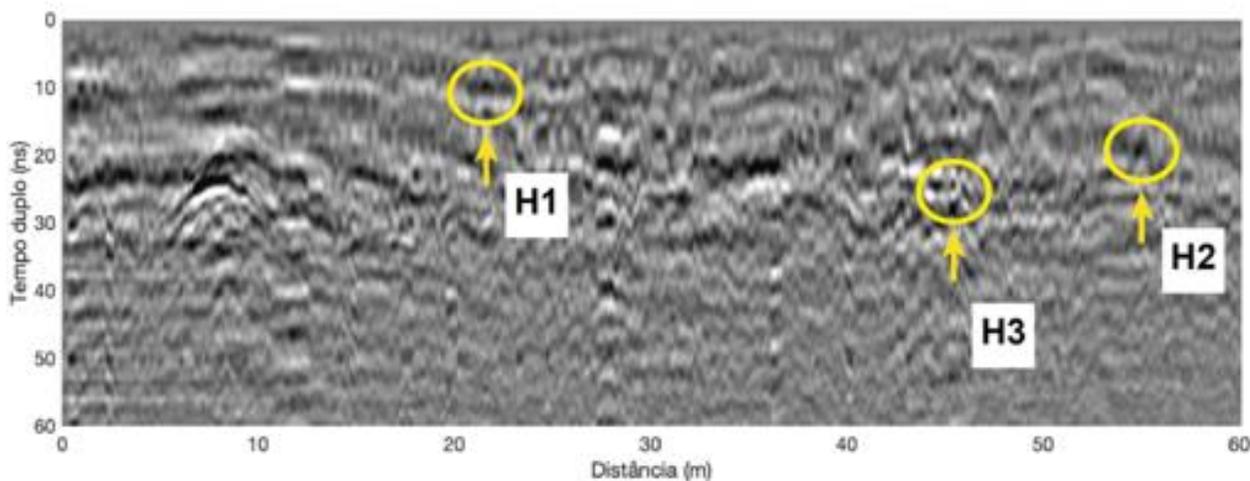


Figura 69 Radargrama obtido com a antena de 200 MHz. Determinação de alguns valores de velocidade de materiais a partir do colapso das hipérbolas de difração.

Nesta prospeção foi considerada uma constante dielétrica de 14, valor determinado experimentalmente considerando uma velocidade de 0.08 m/ns.

Processamento convencional

Os dados de GPR seguiram três estágios de processamento. Primeiro foi realizado um tratamento padrão com a finalidade de obter um primeiro modelo (3D-GPR1) que sirva de base de comparação dos algoritmos próprios de melhoramento do sinal-ruído apresentados nos capítulos anteriores. Na Tabela 3 encontra-se sintetizado a sequência de procedimentos aplicada neste nível de processamento.

Tabela 3 Fluxo de processamento convencional aplicado aos dados de GPR (antena de 200 MHz).

Operação	Parametrização
Correção da posição	Shift de 3.60 ns
Remoção dos ecos da onda aérea	Remoção do ruído de fundo
Desconvolução	Operator length: 31; Prediction lag: 11; Prewhitening: 10; Gain: 3
Filtro FIR temporal	Filtro passa-alto 150 MHz
Filtro FIR espacial	Remoção de ruído de fundo: 512 traços
Ajuste de ganho	10 pontos (linear, dB): 4, 13, 8, 8, 8, 8, 4, 4, 4

Antes de se aplicar o processamento efetivo foi constatada a existência de um desalinhamento dos perfis que pode ser provocado por diferenças nas distâncias registadas pelo odómetro da antena devido a irregularidades do terreno ou diferenças topográficas entre os perfis. Este erro de paralaxe provoca um efeito tipo “pente” entre os perfis (Figura 70) que deve ser corrigido antes do restante processamento.

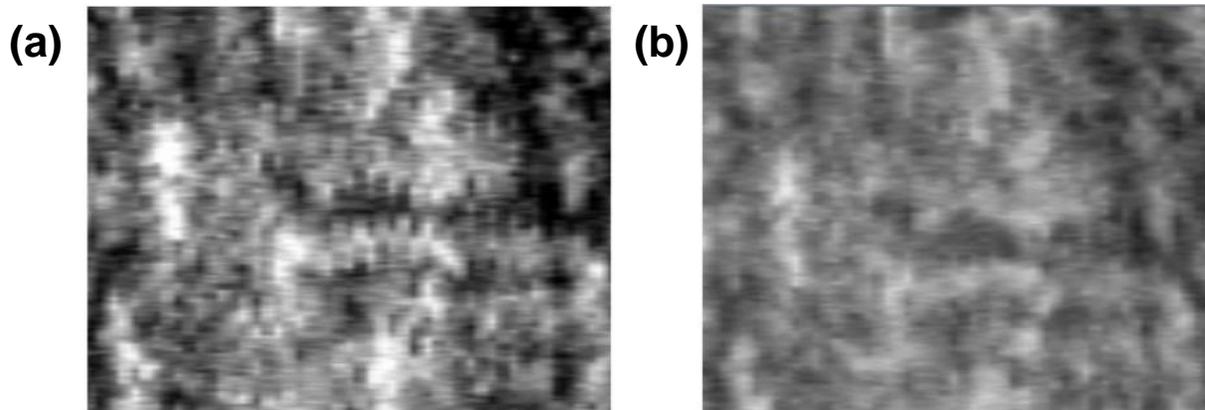


Figura 70 Efeito da correção da paralaxe, antes (a) e depois (b).

O efeito do processamento resumido na Tabela 3 está representado nos perfis de GPR da Figura 71a-b, nos quais se constatou a baixa qualidade dos dados, em que as poucas estruturas que se detetam estão rodeadas de ruído ambiental com atributos próximos do sinal útil (amplitude e frequência), de forma que a percetibilidade espacial das reflexões correspondentes a estruturas é baixa. Neste contexto foi aplicada a transformada de *Hilbert* em modo amplitude (Figura 71c-d) de modo a “empacotar” a energia e melhorar a visibilidade. A conversão em profundidade foi efetuada considerando a constante dielétrica média de 14.

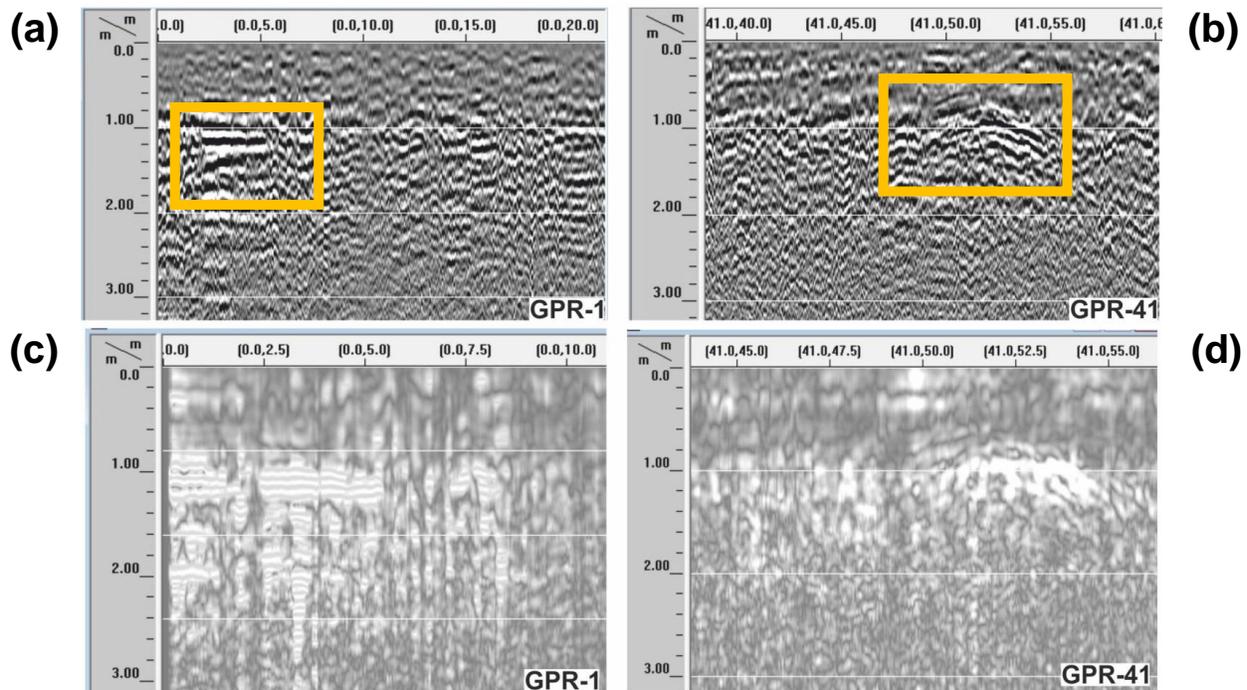


Figura 71 (a-b) Porções de radargramas, os mesmos exibidos na Figura 67, depois de aplicar o fluxo de processamento aos dados. O baixo valor da razão sinal-ruído obriga a aumentar a amplitude do sinal, o que provoca o aumento do ruído envolvente. (c-d) A transformada de Hilbert foi aplicada para empacotar a energia e assim aumentar a visibilidade das imagens 3D. A sombreado vermelho foi assinalado o nível de interesse onde se podem encontrar estruturas arqueológicas, localizado entre 0.6 e 2 m de profundidade.

O passo seguinte nesta etapa de processamento foi a determinação do estrato de interesse arqueológico com a finalidade de construir uma superfície definida pelos dados mais significativos presentes nas camadas que ocupam determinado volume do modelo 3D de GPR, designada neste trabalho por superfície de cobertura (*cover surface*, Peña & Teixidó, 2013). Esse nível produtivo está localizado principalmente entre os 0.6 e 2 m de profundidade (Figura 71c-d). A superfície de cobertura que se obteve (Figura 72a) mantém a má qualidade dos dados, caracterizada por uma série de alinhamentos de sinal com direção N-S (sistema de referência local), cuja existência se deve a irregularidades da superfície causadas por sulcos agrícolas (marcas de arado). Esse efeito foi atenuado pelo processamento dos dados com a aplicação de um filtro horizontal, no entanto, devido ao forte *aliasing* (harmónicos secundários), o efeito bandeado persiste, dificultando a visualização correta dos dados.

Tratamento específico 2D da superfície de cobertura

Com o objetivo de aumentar o sinal coerente da superfície de cobertura considerada, foi realizado um novo teste baseado em técnicas de estatística geoespacial através do cálculo do semivariograma experimental dos dados da superfície de cobertura (Matheron & Armstrong, 2012). Pretende-se com este procedimento obter informação sobre a distribuição dos valores situados em torno de um ponto de uma malha. Esta informação pode ser representada em modo gráfico (Figura 72d), em que o eixo das abcissas corresponde à distância radial com centro no ponto considerado e o eixo das ordenadas corresponde à variância média dos valores e das distâncias especificadas. O semivariograma experimental representa a tendência estatística de como se distribuem espacialmente os valores e pode ajustar-se a uma curva analítica para ser utilizada na interpolação para gerar uma malha 2D.

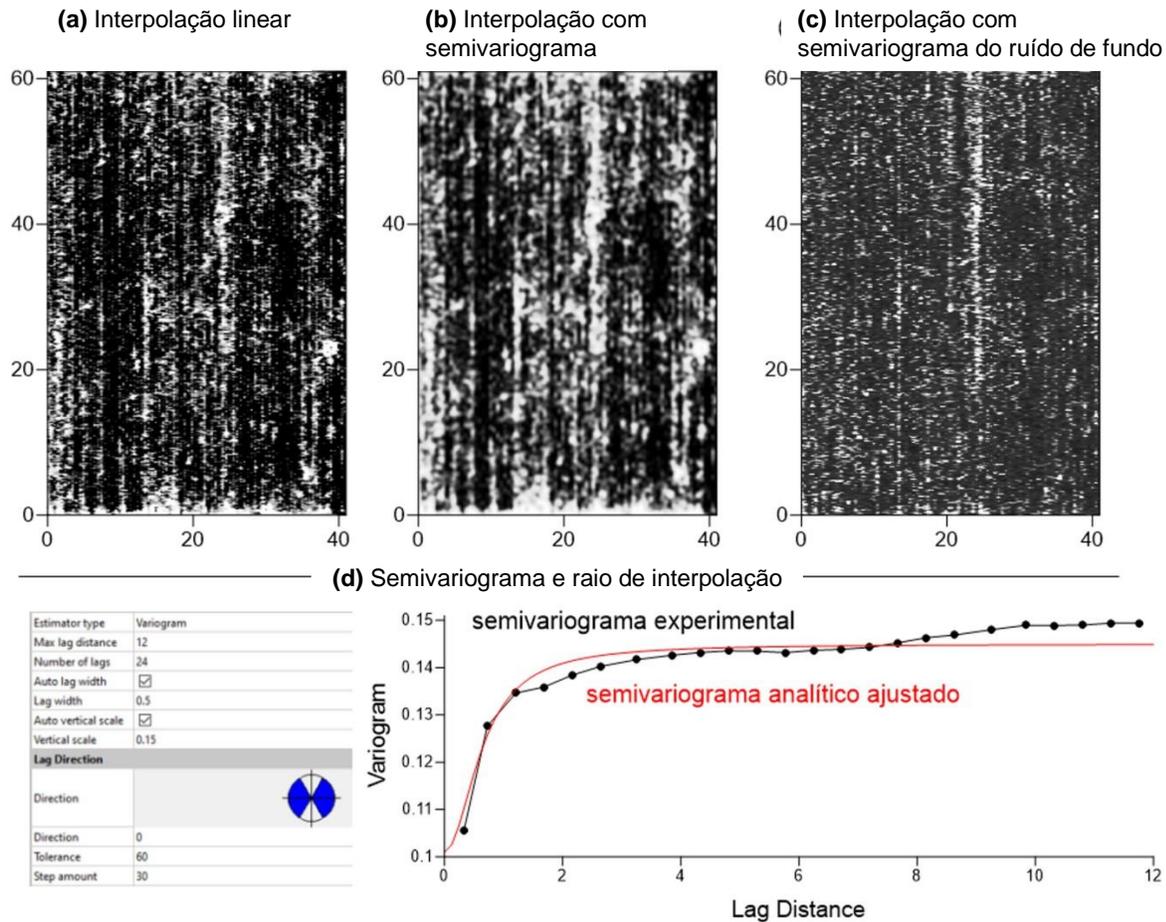


Figura 72 (a) Superfície de cobertura do conjunto GPR1 obtida por interpolação linear com o método de krigging de várias camadas a diferentes profundidades. (b) Mesmos dados depois de aplicar a interpolação a partir do semivariograma analítico. (c) Slice extraído a 3.65 m de profundidade com uma espessura de 0.25 m, que corresponde ao nível do ruído de fundo. (d) Área de influência da interpolação representada no círculo com setores de cor azul (30°N-30°S) e representação do semivariograma experimental obtido com a respetiva curva de ajuste.

Neste caso, o semivariograma experimental foi aproximado por um polinómio quadrático (escala 0.044 e fator de anisotropia de 1.25), que contém um efeito pepita de variancia 0.1 (*nugget effect*). Com a determinação desta regra, foram interpolados os dados com restrição a uma área circular com uma lag de 12 pontos, em que foram excluídos os setores angulares de 30º centrados a norte e sul do ponto (círculo azul na Figura 72d). O resultado desta interpolação (Armstrong, 1989; Hengl, 2009; Kanankege et al., 2018) está representado na Figura 72b, em que o efeito pepita provocou uma diminuição do ruído mais próximo de cada ponto, suavizando a imagem. O semivariograma permitiu aumentar o sinal mantendo um nível de ruído bandado mais estável.

Na Figura 72c está representado um corte horizontal à profundidade de 3.65 m, com espessura de 0.25 m, que foi interpolado com o mesmo semivariograma. Dado que foi obtido a uma profundidade a um nível inferior as estruturas, a maior parte do seu sinal corresponde aos ecos produzidos pelos sulcos do arado (ver partes inferiores dos radargramas da Figura 71).

Para avaliar a relação entre o sinal contido nas superfícies de cobertura e do ruído de fundo foi realizada uma análise espectral bidimensional (Bras & Rodriguez-Iturbe, 1985; Ripley, 2005). Na Figura 73 estão representados os espetros de amplitude e a distribuição espacial de energia, quer para a superfície de cobertura quer para o ruído de fundo (de forma similar à análise da malha de anomalias magnéticas A1 da Figura 63).

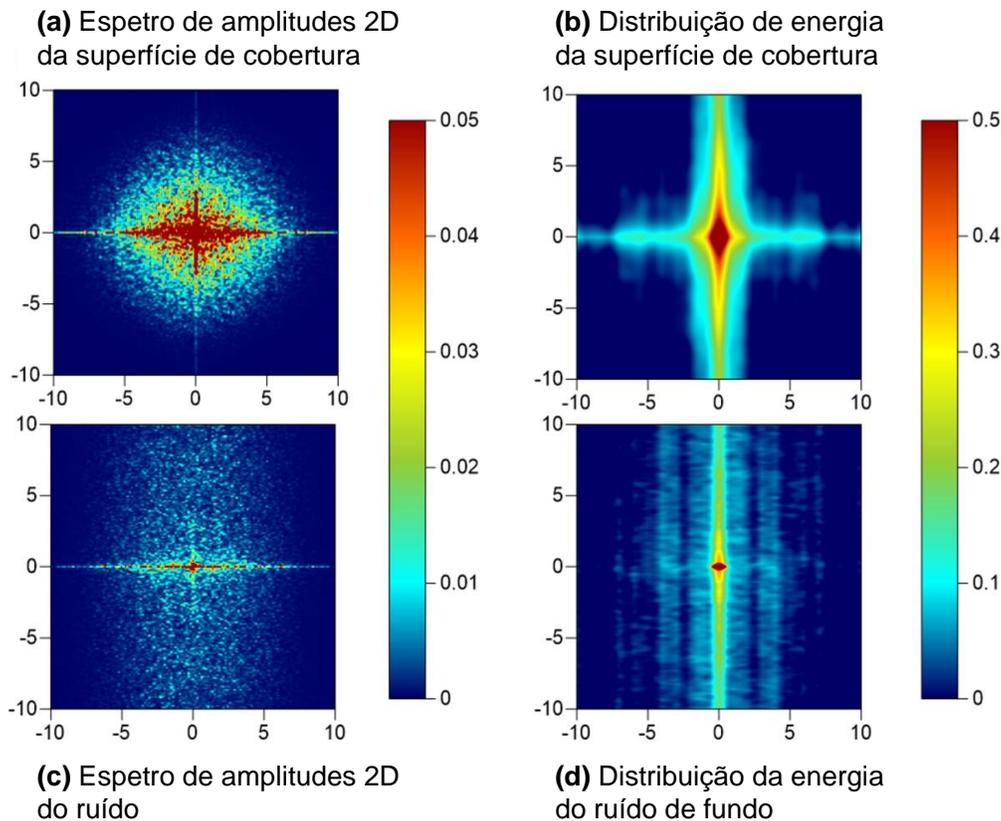


Figura 73 *Análise espectral 2D do sinal. (a,c) Espectros de amplitudes que mostram a periodicidade espacial do sinal das duas superfícies consideradas. (b,d) Distribuição espacial de energia para as mesmas superfícies, que indicam as direções preferenciais da anisotropia.*

Neste caso, o espectro de amplitudes evidencia uma maior contribuição energética com componente vertical, de direção N-S, no centro do espectro ($k=0$), que é mais evidente no espectro do ruído de fundo (Figura 73a,c). Por sua vez, a distribuição espacial de energia mostra também uma componente vertical que se estende a ± 10 m de cada ponto, assim como também para os lados com um alcance de ± 5 m (Figura 73b,d).

O resultado desta análise sugere que a eliminação do efeito dos sulcos é uma tarefa complexa devido a que as frequências correspondentes ao ruído se encontram fortemente sobrepostas ao sinal útil, sugerindo a aplicação de um filtro direcional controlado para eliminar esta contribuição vertical sem produzir artefactos.

Antes de se aplicar o filtro achou-se oportuno atenuar o ruído da superfície de cobertura através da aplicação da subtração parcial com o “slice” do ruído de fundo. De modo a ter-se uma homogeneização dos dados e um maior controlo da diferença entre os conjuntos de dados, estes foram primeiro normalizados e só depois feita a subtração ponderada,

mediante a fórmula: $a_{ij} - (0.3 \times b_{ij})$; em que a_{ij} representa cada ponto na malha da superfície de cobertura dos dados e b_{ij} cada ponto homólogo da malha dos dados correspondentes ao ruído (Figura 74a). O resultado obtido representa uma diminuição do ruído de aproximadamente 30%. Este valor foi determinado através de vários ensaios utilizando diferentes valores de percentagem de eliminação do ruído, 50, 75 e 100%.

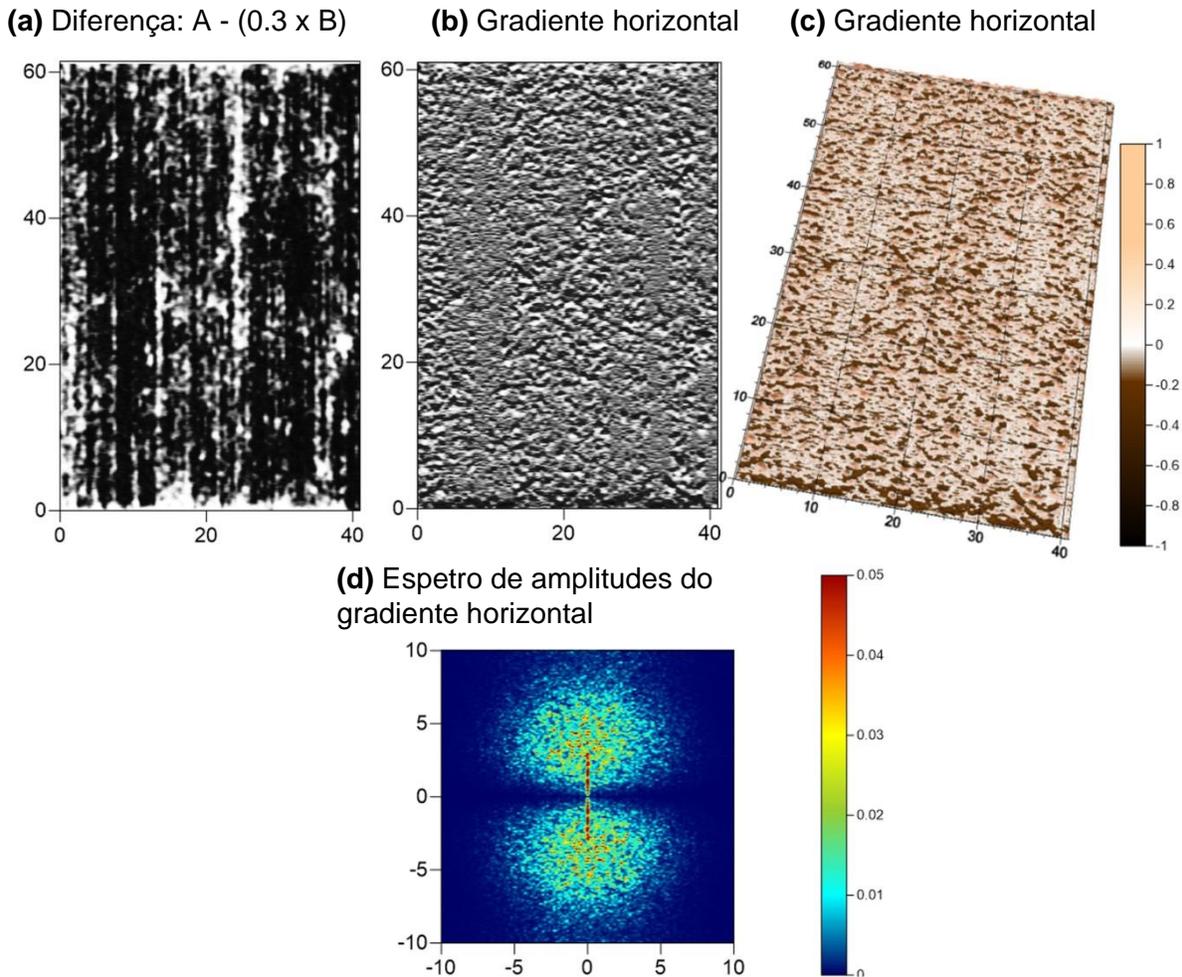


Figura 74 Processo de eliminação do bandado. (a) Superfície de cobertura normalizada resultante da diferença entre a superfície da Figura 72b e o ruído de fundo da Figura 72c. (b) Gradiente horizontal da superfície anterior. (c) Gradiente horizontal mostrado em (b) com outro tipo de representação espacial e outra escala de cor. (d) Espectro de amplitudes da superfície de cobertura obtida.

Face à impossibilidade de aplicar filtros de frequência para eliminar o bandado vertical que persiste foram consideradas algumas funções numéricas correspondentes a filtros não lineares (W. Brown & Crane, 1969; Nikolaidis & Pitas, 2000; Wiggin, 2001), que operam com os pontos vizinhos de cada ponto da malha (mediana, classificação, desvio padrão, variância, gradientes direcionais).

De todos os ensaios realizados, a operação mais satisfatória foi o gradiente horizontal, que permite detetar bordos do sinal nas direções entre 0 e 180° (Brown & Crane, 1969). Na Figura 74b,c estão representadas as superfícies obtidas a partir do gradiente horizontal com valores normalizados. As duas imagens correspondem ao mesmo conjunto de dados, mas com representação em modos gráficos diferentes para uma melhor visualização dos dados. Foi calculado o espectro de amplitudes 2D destes dados (Figura 74d), que permite observar que o ruído bandado foi eliminado com sucesso.

Na Figura 75 estão representados os modelos obtidos pelas várias etapas de processamento aplicadas: processamento básico (a); 3D-GPR1 – interpolação dos dados com técnicas de *kriging* e filtros espaciais (b).

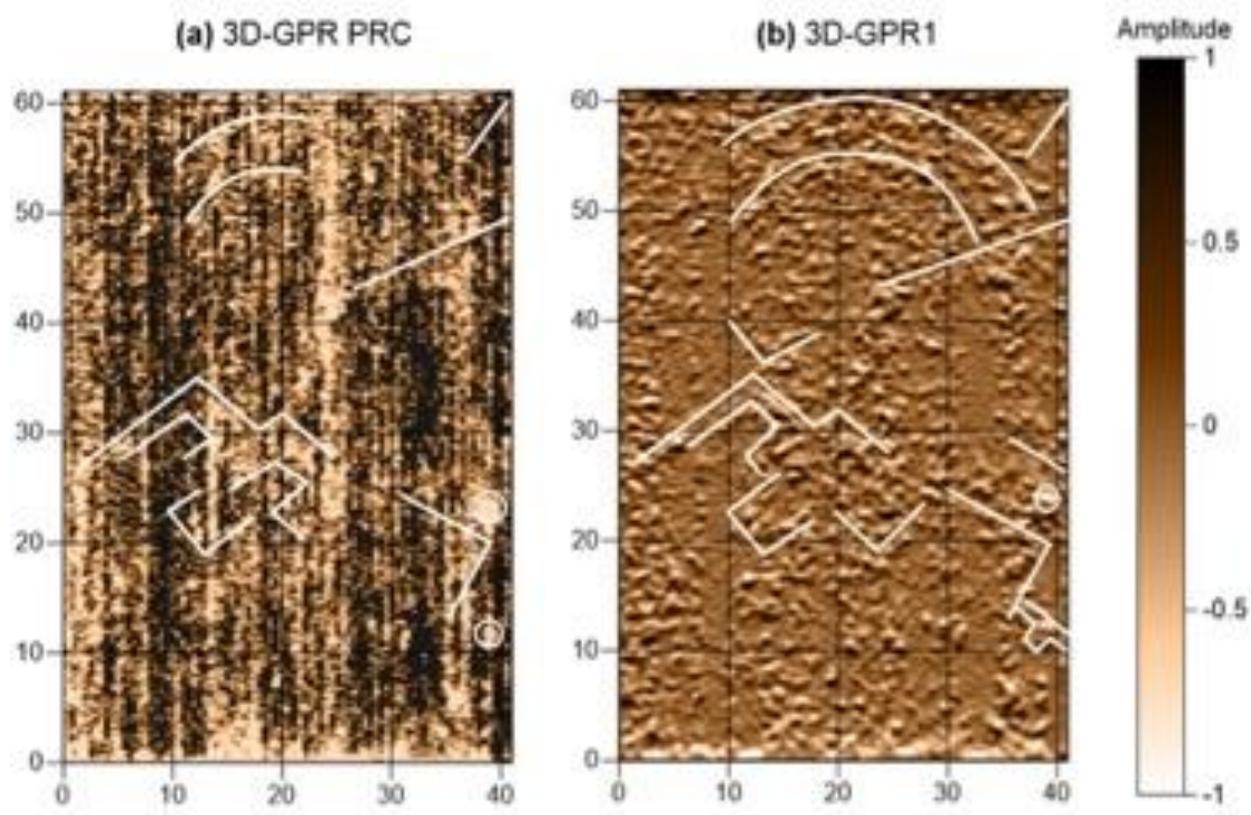


Figura 75 Etapas do processamento avançado aplicado aos conjuntos de dados de GPR-3D do setor A1 de Pisões. (a) 3D-GPR PRC, resultante do processamento básico. (b) 3D-GPR1, resultante da interpolação pelo método de *kriging* com semi-variograma. Foram traçadas algumas linhas para facilitar a observação dos alinhamentos mais significativos.

Considerações Finais sobre o levantamento Geofísico de Pisões

Analisando conjuntamente os resultados das quatro técnicas aplicadas em Pisões podemos concluir que:

- A aplicabilidade das técnicas não é a mesma num local como Pisões, isto é, há métodos que produzem imediatamente bons resultados, que possibilitam a averiguação da presença de estruturas arqueológicas enterradas, como é o caso dos métodos de tomografia elétrica, indução eletromagnética e magnético. O método de georradar não foi capaz de produzir resultados com a qualidade desejada para que seja possível estudar a subsuperfície.
- Os métodos elétrico e eletromagnético permitiram determinar que as camadas superficiais (até cerca de 1.5 m de profundidade) do subsolo sob a área escolhida para a implantação do edifício do Centro de Estudos e Interpretação apresentam em quase toda a sua extensão uma grande uniformidade relativamente à resistividade elétrica, constante dielétrica, e suscetibilidade magnética. Esta uniformidade nas propriedades físicas do solo indicia um subsolo com pequena probabilidade de encerrar estruturas arqueológicas, a menos que sejam estruturas cujas propriedades físicas registadas não se distingam das correspondentes propriedades do meio envolvente. Contudo, numa pequena extensão da área de implantação escolhida verificam anomalias nas propriedades físicas registadas. Este facto pode dever-se à presença de uma estrutura de origem arqueológica ou natural. Contudo, mesmo que se venha a confirmar-se a origem arqueológica das anomalias registadas, como abrangem uma pequena extensão e ainda por cima junto a uma extremidade da área de implantação será fácil encontrar uma solução construtiva compatível com a referida anomalia. Uma das soluções poderá passar por integrar a estrutura na própria construção; outra solução será desviar uns metros uma das extremidades do edifício por forma a não interferir com as estruturas encontradas.
- O levantamento magnético intensivo permitiu a criação de um mapa de anomalias magnéticas de vários setores em volta da parte urbana de Pisões. Estes resultados sugerem que existe uma grande quantidade de estruturas enterradas de diversas tipologias, desde vestígios de muros, condutas, vestígios de locais de fogueiras e fornos e cavidades. Os resultados foram obtidos através da aplicação de um vasto conjunto de técnicas de processamento que combinam operações clássicas com operações avançadas de filtragem dos dados, de modo a realçar as anomalias magnéticas de interesse arqueológico.
- O método de georradar foi aplicado intensivamente apenas num dos setores do levantamento magnético. Após o estudo dos dados foi possível confirmar a existência de um problema com a aplicação deste método num local como Pisões. A composição argilosa do solo provoca uma atenuação da propagação das ondas eletromagnéticas no meio. No entanto, a dimensão das partículas de argila também interfere na propagação da onda eletromagnética, criando fenómenos dispersivos, o que também provoca atenuação. Este fenómeno, observado para a antena de 400 MHz é

compatível com os valores dos parâmetros geofísicos calculados para esta antena. Considerando uma antena de 200 MHz, os parâmetros calculados apesar de estarem no limite de detecção indicam que a antena desta frequência poderá ser capaz de produzir resultados de permitir a análise da subsuperfície e por esse motivo foi realizado novo levantamento com essa antena. Os resultados obtidos, em termos de análise de perfis isolados, permitem observar alguns refletores sugestivos da presença de estruturas do tipo conduta hidráulica. No entanto, a qualidade dos dados continua com problemas que impedem a detecção de refletores que indiquem a presença de estruturas enterradas no local.

- Ainda no método de GPR, usando uma abordagem de processamento considerando a estatística geospacial dos dados, através da análise do semivariograma e do uso dessa informação para nova interpolação dos dados, permitiu que se reduzisse um efeito gráfico de bandado dos dados, o que teve como consequência aumentar a perceptibilidade de alinhamentos de reflexões com possível correspondência a estruturas enterradas.
- Em suma, a aplicação de métodos geofísicos em locais com problemas de detecção como é o caso de Pisões, sugere que existe uma necessidade de estudar metodologias que possam permitir resolver este problema.

Bibliografia e fontes documentais relevantes no âmbito das obras ou intervenções propostas;

Alarcão, J. (1983). Portugal romano. Lisboa. Editorial Verbo, Coleção História Mundi.

Alarcão, J. 1988. - O Domínio Romano em Portugal, Publicações Europa -América, Lisboa.

Bras, R. L., & Rodriguez-Iturbe, I. (1985). Random functions and hydrology. Adison-Wesley. Reading, Massachusetts.

Chanson, H. (2010). Hydraulic engineering in Roman times: From hydraulic structures to water conveyance. In International Symposium on Water and City in Kanazawa-Tradition, Culture and Climate (pp. 43-51). Steering Committee of International Symposium on Water and City in Kanazawa.

Costa, M. L. (1983). Contribuições para o estudo de alguns dos mosaicos da *Villa Romana de Pisões*, Arquivo de Beja (2ª Série), 2, pp. 95 – 122

Couto, M. (2007). Balnevm da *Villa romana de Pisões*, Análise Formal e Funcional. Dissertação de Mestrado em História da Arte, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas. Universidade Nova de Lisboa. 188p.

Fornell Muñoz, A. (2009). Control y uso del agua en las *Villas* de la Bética. LG Lagóstena Barrios, JL Cañizar Palacios y L. Pons Pujol (coords): *Aquam perducendam curavit*. Captación, usos y administración del agua en las ciudades de la Bética y el occidente romano, Cádiz, 365-381.

Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An introduction to geophysical exploration*.

Lopes, C. (2000). A cidade romana de Beja: percursos e debates acerca da "civitas" de Pax Ivlia (PhD Thesis).

Mays, L. W. (2008). A very brief history of hydraulic technology during antiquity. *Environmental Fluid Mechanics*, 8(5), 471-484.

Oliveira, R. J., Neves, S., Caldeira, B., & Borges, J. F. (2015). Estudo geoarqueológico com recurso a georradar e magnetometria no povoado do Outeiro do Circo (Mombeja, Beja). *Geonovas*, 28, 99–103.

Peña, J. A., Teixidó, T., Carmona, E., & Sierra, M. (2008). *Prospección magnética y radar 3D como métodos para obtener información a priori en la planificación de una excavación arqueológica. Caso de estudio: Yacimiento del Cortijo de Quintos (Córdoba, España)*.

Pereira, C., Soares A. M., Soares R. M. (2013). Os mausoléus da *Villa* romana de Pisões: a morte no mundo rural romano. *Revista Portuguesa de Arqueologia* v.16 pp. 303–321. Plano 2016 – Plano de Ação para a *Villa* Romana de Pisões, Universidade de Évora, Maio de 1916.

Quintela, A.C., Cardoso, J.L., Mascarenhas, J.M. (1987). *Aproveitamentos Hidráulicos Romanos a Sul do Tejo. Contribuição para a sua Inventariação e Caracterização*. Lisboa: EPAL – Empresa Portuguesa de Águas Livres, S.A., 236 p

Reis, Maria Pilar (2004) *As termas e os balneários romanos da Lusitânia*. (Studia Lusitana 2), Mérida, Museo Nacional de Arte Romano.

Ribeiro, F. N. (1972). *A Villa romana de Pisões*. Comissão Municipal de Turismo, Beja.

Ripley, B. D. (2005). *Spatial statistics* (Vol. 575).

Romero Corral, R. M. (1995). La presa romana de Torretejada (Belalcázar, Córdoba). *Anales de arqueología cordobesa* 6, 295-309.

Teixidó, T., Peña, J. A., & Carmona, E. (2010). *Prospección geofísica en el Yacimiento Romano del Guijo, Córdoba (España)*.

Wrench, L. I. (1998). Transições de signos: os motivos representados num mosaico da *Villa romana de Pisões*, Revista da FCSH, 247-255, ISSN 0871-2778.

7. CONCLUSIONES: LAS LECCIONES APRENDIDAS

Al cabo de todo el proceso que ha conllevado la ejecución de nuestra tarea en el marco del proyecto INNOACE, podemos extraer numerosas lecciones que podrían ser de utilidad para proseguir con la línea de investigación propuesta, y para aportar soluciones a las empresas y otros agentes interesados en obtener frutos de ella. En esta última sección queremos ofrecer de manera resumida una serie de recomendaciones y observaciones que sinteticen todo este aprendizaje.

7.1.-Orientaciones para la Administración

Las administraciones públicas, en tanto que organismos responsables de la custodia del territorio, tienen la obligación de coordinar las diferentes intervenciones que se realizan en el mismo desde diferentes frentes, desde la explotación agrícola hasta la conservación de sus valores culturales. Las herramientas cuyo uso combinado se ha ensayado en nuestra tarea son capaces de proporcionar un gran volumen de información y, lo que es más importante, una enorme capacidad de análisis de los datos para tomar decisiones adecuadas y así evitar que dichas actividades se interfieran mutuamente, e incluso para que se beneficien unas de otras. No obstante, un requisito fundamental para aprovechar estas capacidades es que exista una buena coordinación entre los diferentes departamentos, de manera que exista una información cruzada útil respecto a los siguientes aspectos:

- Localización y extensión de elementos de interés patrimonial.
- Realización de obras de construcción, tanto para la instalación de actividades industriales, construcción de instalaciones agrícolas o creación de infraestructuras (canalizaciones, conducciones, pistas o caminos etc).
- Cambios de uso de los terrenos: arranque de cultivos, nuevas plantaciones, nivelaciones, subsolaciones etc.

Sería en este sentido sumamente recomendable que se establecieran protocolos de información y procedimientos preventivos que facilitaran la detección de posibles incompatibilidades:

- Implantación de procedimientos preventivos de prospección e inspección previa en los terrenos que van a ser afectados por una transformación.
- Notificación de la obligación por parte de propietarios y promotores de informar de toda modificación que potencialmente afecte a la conservación de elementos de interés histórico y arqueológico.

La observancia de un sistema de información compartida de este tipo redundaría en la agilización de los trámites y plazos para las actividades de transformación, de manera análoga a como ya sucede (o debería suceder) en el caso de la realización de proyectos de obra civil (de planta o de trazado) en los que rutinariamente ya se incluyen los estudios arqueológicos previos. En la situación actual, la ausencia de obligación para notificar muchos de los cambios que implica la actividad agrícola intensiva, deviene en situaciones complejas y nada beneficiosas para las partes implicadas: paralización de las explotaciones que afectan restos arqueológicos, y con más frecuencia, destrucción de los mismos a gran escala sin conocimiento ni tiempo de reacción por parte de la Administración. En este sentido, los protocolos de trabajo y los sensores empleados en el presente proyecto permitirían la realización de diagnósticos rápidos y fiables para delimitar y ponderar la importancia de posibles restos en el interior de las explotaciones. Del mismo modo que la Agricultura de precisión facilita un tratamiento y un uso de los recursos adaptado a las características especiales de cada localización espacial, evitando el manejo de las parcelas como bloques uniformes, el uso de estos sistemas de detección permitiría identificar los elementos arqueológicos, delimitando las zonas de potencial afección, evitando así que la actividad preventiva afectase a una superficie mayor de la estrictamente necesaria. Podríamos así evitar un proceso de destrucción y pérdida de la memoria que opera de manera silenciosa en las zonas rurales, a veces a una escala enormemente amplia.

7.2.-Orientaciones para los agricultores

Los agricultores constituyen el elemento decisivo en la compleja cadena de intereses que conciernen a la contemporización de la explotación de la tierra y la conservación y estudio del patrimonio histórico que esta alberga. El predominio de una mentalidad focalizada de manera casi exclusiva en el beneficio económico es el principal obstáculo para lograr que se tengan en cuenta otras consideraciones, tomando como punto de partida el hecho de que habitualmente nos encontramos en terrenos de titularidad privada. Por todo ello, las recomendaciones orientadas hacia este colectivo deben centrarse en enfatizar el mensaje positivo de que la presencia de elementos de interés arqueológico, como mínimo, no tiene por qué suponer un perjuicio. Esta valoración debe en cambio incidir en las potenciales vías de beneficio para el agricultor:

- Al identificar con precisión dónde se localizan los elementos susceptibles de requerir protección, se minimizan las medidas que para ello se tengan que implementar, reduciendo con ello su impacto en el normal desarrollo de la actividad agrícola.
- Los datos obtenidos en el estudio de las parcelas pueden aportar directamente información útil para mejorar su gestión agronómica.

- La presencia de elementos arqueológicos no tiene necesariamente que conducir al menoscabo o pérdida de la propiedad o a la inhabilitación de los terrenos para su explotación. La realización de un trabajo preventivo permite planificar adecuadamente el proceso, y en su caso la liberación de esos espacios para continuar con su actividad normal.
- En el mejor de los casos, la recuperación y puesta en valor de este patrimonio puede suponer un valor añadido, creándose nuevos recursos para el ocio y el turismo, e incluso para la promoción de los productos agrícolas (por ejemplo la asociación de los valores culturales de una tradición vitivinícola atestiguada arqueológicamente en los terrenos de las explotaciones actuales).

La transmisión exitosa de estos mensajes es uno de los mayores retos para lograr la sinergia que proponemos, y requiere de una labor informativa y de sensibilización muy importante a través de:

- Reuniones informativas para asociaciones de agricultores, cooperativas y empresas.
- Organización de talleres demostrativos.
- Difusión en los medios específicamente orientada a un público no especializado.

Por último, un aspecto clave en esta comunicación exitosa con los agricultores es atender a la diferente naturaleza de las explotaciones. En este sentido, por lo que respecta al ámbito de Extremadura, nos encontramos con un panorama muy diverso que es fundamental entender de cara a las actuaciones sobre el territorio. Esta realidad comprende dos escenarios principales. Por un lado nos encontramos con un gran número de pequeños agricultores, con una media de edad avanzada y que desarrollan una actividad tradicional. Por otro lado, vemos cada vez más la expansión de grandes explotaciones de carácter intensivo, con monocultivos y prácticas que tienden a ser bastante agresivas con la configuración natural y cultural de los paisajes agrarios tradicionales. Es a este colectivo al que hay que dirigir con más énfasis el mensaje de que es posible conciliar una actividad productiva con una gestión sostenible, ya que es el que cuenta con las herramientas y capacidades para sacar provecho de la información geoespacial que obtenemos a través de las prospecciones geofísicas y la teledetección.

7.3.-Orientaciones para los investigadores.

Para concluir, es fundamental que los profesionales, investigadores y tecnólogos tanto de la agronomía como del Patrimonio Histórico, adopten una serie de recomendaciones de buena práctica. Estas se refieren en primer lugar a los métodos y procedimientos de trabajo, pero también, y no menos importante, a la habilidad para interactuar con otros agentes sociales y colectivos afectados por este tipo de intervenciones.

Respecto a lo primero, las experiencias que hemos desarrollado permiten definir una serie de procedimientos recomendados a lo largo de todo el proceso que va desde la planificación previa hasta el análisis de los datos y su presentación, que pasamos a resumir:

1. Planteamiento previo del estudio. Es preciso hacer una revisión exhaustiva de toda la documentación cartográfica que podamos reunir sobre la zona objeto de intervención, a fin de obtener un conocimiento detallado, tanto de su configuración actual (topografía, uso del suelo, potenciales limitaciones) como de sus transformaciones a lo largo del tiempo. Esto último es especialmente relevante a la hora de interpretar correctamente los resultados de los trabajos de prospección y teledetección. Puede dar la clave explicativa de anomalías de potencial interés histórico o arqueológico y puede permitir descartar otras generadas por la presencia de construcciones recientes (desmontes y movimientos de tierra, antiguas lindes de parcelas, construcciones desaparecidas etc). Esta documentación consiste principalmente en:
 - 1.1. Cartografía digital, tanto series actualizadas como antiguas. Si las primeras son útiles como referencia para la interpretación del paisaje actual, las segundos son valiosos documentos para comprender la evolución histórica del territorio y entender la configuración de los espacios agrarios tradicionales.
 - 1.2. Series históricas de fotografías aéreas, principalmente las gestionadas e integradas en el catálogo de datos del IGN, que van desde los años 40 del siglo XX hasta la actualidad. Esta fuente es de gran relevancia para los objetivos del proyecto, ya que permite conocer la evolución de los cultivos y ponderar el impacto de sus transformaciones (plantación de nuevas especies, arranque de otras, requerimientos de arado y nivelación de determinados cultivos...).
 - 1.3. Modelos digitales de elevaciones. Para un estudio de zonas de extensión limitada, es especialmente recomendable la utilización como fuente de los vuelos LIDAR gestionados por el PNOA, ya que es una información con buena resolución espacial que puede ser procesada con herramientas TIG para analizar en detalle las características del terreno. Podemos así generar capas derivadas para el análisis geométrico de la superficie del relieve (pendientes, orientaciones, sombreado analítico, índices de apertura positiva etc). Dichas capas pueden revelar la presencia de estructuras arqueológicas en el subsuelo, así como identificar rasgos a escala micro de la topografía que pueden ser significativas para la interpretación del sitio.
 - 1.4. Información temática digital sobre otras variables relacionadas con la configuración del terreno: usos del suelo, geología, geomorfología etc.
 - 1.5. Imágenes satelitales. En la actualidad cada vez es más fácil obtener un gran volumen de datos digitales procedentes de diferentes tipos de sensores, si bien es cierto que la mayoría de los datos disponibles en acceso abierto tienen una baja resolución espacial que los hacen de relativo valor en la búsqueda de indicios de interés

arqueológico. Son en cambio de especial utilidad en la caracterización agronómica, y pueden ofrecer una escala de trabajo intermedia para combinar ambos aspectos del estudio previo de una zona.

2. Planificación del trabajo de campo. Una vez realizada la valoración previa de la zona objeto de intervención, es recomendable estructurar bien la toma de decisiones de cara a la realización del trabajo de campo. Es igualmente fundamental asegurarse de cumplir todos los requisitos legales para el desarrollo de la campaña.

2.1. Respecto a esto último, es imprescindible recabar las preceptivas autorizaciones en función del tipo de trabajo que se pretenda realizar y su localización.

2.1.1. De manera general toda intervención arqueológica (y la realización de prospecciones está bien tipificada como una de ellas) requiere de la autorización por parte de la Administración autonómica, que es la que detenta las competencias en materia de Patrimonio Cultural. Para recabar dicho permiso es necesario presentar un proyecto de intervención en el que se exponga el plan de trabajo, los medios materiales requeridos, además de acreditar la titulación requerida para el desarrollo de esta actividad.

2.1.2. Aunque en el caso de la legislación de Extremadura no es un requisito para el desarrollo de las prospecciones, es más que recomendable contar además con la autorización expresa y por escrito de los propietarios de las parcelas en las que se va a desarrollar el trabajo. Además del deber ético de informar y respetar un espacio que es propiedad privada, esto prevendrá potenciales molestias e interferencias de nuestro trabajo en la actividad normal de las fincas.

2.1.3. Para determinados trabajos como la toma de imágenes con drones hay que añadir los requerimientos legales y limitaciones impuestas para este tipo de actividad, tanto respecto a los operadores de estos dispositivos, como a las zonas de exclusión por motivos de seguridad o de protección medioambiental.

2.2. Elección de los métodos adecuados. En función de las condiciones específicas del terreno (tipo de cultivos y usos del suelo presentes, estado del terreno, humedad, compactación, presencia de vegetación etc) se tomarán las decisiones adecuadas en cuanto a los métodos de trabajo que son compatibles.

2.2.1. Un aspecto clave en este sentido es la adaptación a los ciclos temporales de la actividad agrícola. Así, en los cultivos arborícolas (olivar, frutales, viñas) contamos con una amplia visibilidad superficial y una superficie llana que facilita la inspección del terreno, pero que es inviable en las etapas de recolección. Por su parte los cultivos herbáceos limitarán el acceso a los terrenos en los meses de crecimiento y maduración, permitiendo en cambio el trabajo sobre el terreno tras la siega. A la inversa, la franja temporal de maduración es el momento idóneo para monitorizar el estado de la vegetación con sensores aéreos (visible, multiespectral, térmico) en busca de un desarrollo diferencial que pueda indicarnos la presencia de estructuras enterradas.

- 2.2.2. De manera más específica, el empleo de métodos debe de ser cotejado con la presencia de elementos en el terreno que potencialmente pueden afectar la calidad o validez de las mediciones. Así por ejemplo la prospección geomagnética o por inducción electromagnética son incompatibles con algunos sistemas de acondicionamiento del terreno. Como por ejemplo la instalación de espalderas de alambre en los viñedos. También la compactación y grado de humedad del suelo pueden determinar la viabilidad de algunos trabajos. Así la prospección geoelectrica requiere de una buena penetración de los electrodos en el terreno y un grado de humedad intermedio. Por su parte equipamientos pesados como un georradar multicanal pueden encontrar gran dificultad para trabajar en suelos pedregosos o poco compactados. De manera general, los métodos que no requieren contacto físico con el terreno como la prospección geomagnética facilitan mucho la adaptación a una diversidad de condiciones.
- 2.3. Definición de sistemas de referencia para la toma de datos. En la actualidad se ha generalizado el uso de dispositivos que se vinculan en tiempo real a sistemas de posicionamiento mediante el empleo de protocolo NMEA⁸, tanto para sensores terrestres como aéreos. Esto permite la georreferenciación directa de las mediciones de campo, lo cual hace más ágil la toma de datos y facilita una evaluación más rápida de los resultados. En cualquier caso, es recomendable asegurarse de que este trabajo garantice una cobertura lo más homogénea posible de la zona de estudio, pues las discontinuidades y vacíos en la distribución de las mediciones dificultará en extremo la interpretación de los datos. Así pues, cabe establecer las siguientes pautas:
- 2.3.1.1. Es recomendable una evaluación previa sobre el terreno antes de iniciar la toma de datos para organizar la cobertura de las zonas de interés.
 - 2.3.1.2. Tanto si se dispone de una conexión GPS para el sensor como si es necesario balizar sobre el terreno una cuadrícula de referencia, es necesario crear previamente en un entorno SIG estas referencias para posteriormente replantearlas en el terreno. También en esto es recomendable un conocimiento directo previo para asegurarse que las localizaciones de dichas referencias son adecuadas y no hay ningún obstáculo que impida su replanteamiento.
3. Desarrollo del trabajo. Para el buen desarrollo de las campañas es recomendable seguir unos protocolos fijos, más allá de las características específicas de los equipos.
- 3.1. Comprobación de los componentes/calibración: este tipo de trabajos es técnicamente complejo y requiere del uso combinado de múltiples equipamientos y dispositivos. Por ello es muy recomendable el uso de “checklists” para evitar olvidos y pérdidas que pueden fácilmente dar al traste con la campaña. Además es preciso

⁸ NMEA es una especificación combinada eléctrica y de datos entre aparatos electrónicos marinos y, también, más generalmente, receptores GPS. El protocolo NMEA es un medio a través del cual los instrumentos marítimos y también la mayoría de los receptores GPS pueden comunicarse los unos con los otros

poner cuidado en los procesos de calibración y a juste de algunos de los sensores a fin de que trabajen correctamente.

- 3.2. Documentación del proceso. Pese a que con los dispositivos actuales contamos con una geolocalización precisa de todas las actividades que se realizan en campo, es recomendable mantener otros métodos más convencionales para consignar las condiciones concretas en las que se desarrolló el trabajo. Es necesario sobre todo consignar las incidencias, variaciones respecto al plan inicial, progreso de la tarea, contratiempos en la toma de datos etc, a fin de poder luego valorar el efecto de estos factores en el resultado final. Igualmente importante es en este sentido registrar otros datos del contexto como las condiciones meteorológicas o las condiciones del terreno.
 - 3.3. Rigor en la georreferenciación. Otro aspecto esencial para el éxito del trabajo de campo es el de la calidad de los datos de posicionamiento. Sólo de este modo podremos luego cumplir uno de los objetivos esenciales de este tipo de investigación, que es el análisis cruzado de múltiples capas de información. Es recomendable en este sentido contar en los campos de ensayo con bases de referencia de alta precisión sobre las que estacionar y proporcionar correcciones a los receptores que trabajen en las sucesivas fases del estudio. Del mismo modo en la toma de puntos de apoyo o replanteamiento de cuadrículas se emplearán sistemas GNSS con corrección en modo RTK (Real Time Kinematics) fijo, aportando correcciones mediante radio siempre que la cobertura telefónica dificulte la conexión con las de redes de estaciones de referencia.
 - 3.4. Ajuste de la resolución. Una de las diferencias más destacables entre el uso agronómico y arqueológico de la geofísica se refiere a la resolución espacial de los muestreos. Es esencial entender la justificación de la especificidad de los procedimientos utilizados en ambas disciplinas para poder valorar adecuadamente el tipo de información que podremos obtener en cada caso. Estas diferencias vienen determinadas por los siguientes factores:
 - 3.4.1. Resolución espacial de los objetos investigados.
 - 3.4.2. Variables de interés
4. Procesado y análisis de la información. Por mucho cuidado que pongamos en la toma de datos y por muy representativa que sea la muestra obtenida, los resultados de nuestro estudio pueden ser completamente fallidos si no adoptamos los procedimientos adecuados para tratar digitalmente esta información. De manera común a casi todos los métodos que se describen en este manual, podemos señalar una serie de etapas principales:
 - 4.1. Corrección y filtrado: es necesario prestar atención a los múltiples factores que pueden haber interferido en el proceso normal de captura de datos y que pueden

generar distorsiones e interferencias. Habitualmente estas correcciones se realizan con herramientas de software específicas de cada uno de los sensores empleados:

- 4.1.1. Distorsiones geométricas provocadas por desajustes o desplazamientos en las pasadas de los sensores debidos a la irregularidad o los desniveles del terreno.
 - 4.1.2. Distorsiones radiométricas provocadas por una mala calibración de los sensores, por interferencia de la señal de otros aparatos electrónicos o por descompensaciones en la intensidad de la señal captada por algunos de los sensores en el caso de dispositivos multicanal.
 - 4.1.3. Introducción de valores anómalos debidos a incidencias en el proceso de toma de datos (por ejemplo, en el caso de prospecciones geoeléctricas por un mal contacto de los electrodos), o debido a la presencia de anomalías de gran intensidad provocadas por la presencia de elementos modernos (por ejemplo en el caso de la prospección geomagnética, por la proximidad de tendidos eléctricos o estructuras metálicas masivas).
- 4.2. Exportación. Una vez realizado el procesado básico de los datos, y a fin de integrar la información con los resultados de otras prospecciones, es esencial exportarlos utilizando formatos de datos estándar que puedan ser gestionados y analizados con otras herramientas TIG, fundamentalmente paquetes de software SIG.
- 4.3. Análisis de datos. Constituye el núcleo central del proceso de investigación, pues es la etapa en la cual podremos finalmente comprender la estructura de los datos y valorar su potencial para responder a nuestras preguntas. Respecto a los medios a utilizar para esta labor, la recomendación en este sentido es no depender de una única solución, explorando y combinando diferentes posibilidades. Igualmente deseable es que este proceso se base en herramientas de software libre. En cuanto al tipo de análisis a realizar, es imposible incluir aquí una enumeración detallada de todos los posibles geoprosesos, pero sí sintetizarlos en una serie de grandes grupos:
- 4.3.1. Análisis exploratorio: descripción de los datos a través de los estadígrafos de las muestras, valoración gráfica y numérica de la forma de las distribuciones.
 - 4.3.2. Generación de superficies mediante métodos de interpolación, valorando la fiabilidad de las predicciones en función de los algoritmos empleados, ajuste de los parámetros, y características de los datos de partida.
 - 4.3.3. Clasificación, segmentación: exploración del potencial para definir categorías discretas potencialmente asignables a rasgos del subsuelo.
 - 4.3.4. Modelización, detección semi-automatizada. Debe ensayarse de cara a la posible extrapolación de resultados, permitiendo reconocer de manera mucho más extensiva y generalizada este tipo de indicios, a partir del análisis de grandes volúmenes de datos.
 - 4.3.5. Análisis espacial: no deben dejarse en segundo plano los procedimientos clásicos de análisis espacial (patrones de distribución, indicadores de concentración, análisis de distancias etc.).

- 4.3.6. Fusión de datos. Es una recomendación especialmente pertinente en un proyecto de esta naturaleza, y se refiere a la capacidad de establecer correlaciones estadísticamente significativas entre los resultados obtenidos con los múltiples métodos empleados. El resultado es una ponderación de la consistencia de los diagnósticos que podemos hacer respecto a la naturaleza de los elementos enterrados en el subsuelo, dejando el menor espacio posible para una interpretación intuitiva basada en meras apreciaciones visuales. Estas últimas no deben ser en ningún caso la mera base para proponer la existencia de elementos de interés, cuya presencia debe de ser debidamente argumentada con una descripción apropiada conforme a los métodos correspondientes.
5. Elaboración de informes. Por último, es importante desarrollar la capacidad de comunicación de los resultados, atendiendo a la observación de protocolos coherentes en la redacción de informes, así como en la presentación cartográfica de los resultados y la descripción de métodos y resultados.
- 5.1. Cartografía. Es importante observar unos criterios uniformes en la representación cartográfica, incluyendo los siguientes elementos:
- 5.1.1. Leyenda con los elementos incorporados en la vista, correctamente identificados y con nombres de capa expresivos y breves.
- 5.1.2. Simbología adecuada a los elementos que se representen, de acuerdo con sus cualidades, naturaleza de los datos, etc.
- 5.1.3. Norte, escala y rejilla de referencia con indicación de las coordenadas, así como código identificativo del sistema de referencia.
- 5.2. Descripción: es recomendable sistematizar mediante números o letras las anomalías detectadas, para proceder en texto a una descripción de sus características. Estas últimas deben ser realizadas "geofísicamente", es decir, deben de ser formuladas en términos que permitan a los especialistas en esta disciplina comprender bien su naturaleza (forma, tamaño, profundidad estimada, magnitud etc)
- 5.3. Interpretación: finalmente, las lecturas que proponamos de cara a una valoración histórica, cultural o agronómica de los resultados deben ser justificadas y representadas de manera estandarizada, con una simbología que permita relacionar la valoración final con los datos originales. Unos y otros deben de ser presentados y bien documentados para permitir a otros investigadores someter a juicio nuestras conclusiones y poder aportar lecturas complementarias o alternativas a partir de la información de base.

En segundo y último lugar, pero no menos importante, más allá de recomendaciones técnicas, la buena praxis para lograr una sinergia exitosa entre Agricultura de Precisión e investigación arqueológica pasa por la observación de una serie de aspectos más

relacionados con la capacidad de comunicación y negociación entre diferentes disciplinas y agentes afectados. En este sentido podemos señalar algunas pautas a seguir:

1. Nuestra obligación es mantener bien informados a los propietarios agrícolas. Esto se debe observar en relación con aspectos básicos relacionados con el permiso de acceso a las fincas (que requiere normalmente una autorización por escrito), pero también incluye una labor más sensible y didáctica para aclarar las dudas de los dueños respecto a las potenciales consecuencias del descubrimiento de restos arqueológicos en su terreno. Obviamente es también recomendable informarles cumplidamente de los resultados y asesorarles respecto al potencial beneficio que puede llevar consigo la colaboración con los técnicos.
2. Comunicar e implicar a las administraciones, entendiendo su función de custodia del territorio y gestión tanto del patrimonio cultural como de las actividades agrícolas.
3. Mantener activamente canales abiertos de comunicación con los especialistas en las diferentes disciplinas, entender las particularidades de cada método y distintas formas de trabajar