

Prospecção gearqueológica de estruturas megalíticas com recurso a georadar (Almendralejo, Espanha) *Geoarcheological prospection of megalithic structures using Ground Penetrating Radar (Almendralejo, Spain)*

R. J. Oliveira⁽¹⁾, B. Caldeira⁽²⁾, J. F. Borges⁽³⁾, J. Pérez⁽⁴⁾, F. Gómez⁽⁴⁾, J. Figueria⁽⁴⁾, C. Pro⁽⁵⁾ e F. Blasco⁽⁶⁾

⁽¹⁾Centro de Geofísica de Évora, Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59, Évora, ruio@uevora.pt

⁽²⁾Departamento de Física e Centro de Geofísica de Évora, Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59, Évora, bafcc@uevora.pt

⁽³⁾Departamento de Física e Centro de Geofísica de Évora, Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59, Évora, jborges@uevora.pt

⁽⁴⁾Departamento de Expresión Gráfica, Universidad de Extremadura, Centro Universitario de Mérida

⁽⁵⁾Departamento de Física, Universidad de Extremadura, Centro Universitario de Mérida

⁽⁶⁾Ayuntamiento de Almendralejo

SUMMARY

In 1980, in Almendralejo, Spain, it was discovered the Tomb of Huerta Montero, a megalithic funerary monument, the best preserved in the Iberian Peninsula, dating from the Chalcolithic (Copper Age, about 4650 BC). According to the opinion of archaeologists, it is quite probable that there are similar buried monuments in the vicinity of the known tomb. This suspicion led to the geophysical study, carried out with the aim of identifying new structures in the vicinity of the necropolis discovered. The choice of geophysical method it was the GPR, because it is a non-invasive technique, accurate and rapid in its implementation. The results obtained allow us to conclude that there may be a structure of circular shape, with a diameter of about 7 m which may correspond to a funeral monument as there are a few meters, with a temporal thickness ranging between 13 and 21 ns deep. In the northern part of the structure there are two protrusions that may match an entry in the building or even the rest of the tunnel entrance.

1. INTRODUÇÃO

Em 1980, em Almendralejo, Espanha, foi descoberto um monumento funerário megalítico, dos mais bem preservados na Península Ibérica, datado do período Calcolítico (Idade do Cobre, aproximadamente 4650 a.C.) (Blasco Rodríguez e Ortiz Aleson, 1991).

O Sepulcro de Huerta Montero (Figura 1), assim chamado ao monumento funerário encontrado, foi escavado no substrato de calcário, até uma profundidade de cerca de dois metros, possuindo um comprimento total de 15,40 m, dividido em três partes. Os primeiros 7 m correspondem à rampa de acesso; os 4 m seguintes correspondem a um corredor que desemboca na câmara funerária; esta é circular, tem um diâmetro de 4,60 m e foi coberta por uma falsa abóbada. O sepulcro continha restos mortais de 109 pessoas que terão sido enterradas, estimando-se que ao longo de mil anos. Aparentemente os corpos eram colocados em posição fetal; os ossos encontram-se revolvidos por toda a câmara com a excepção dos quatro últimos enterramentos. Entre as ossadas foram encontrados objectos, que constituíam oferendas à pessoa falecida como era habitual na época, nomeadamente, vasos de argila, facas de sílex, pontas de flechas, ídolos talhados em falanges de veado e cavalo e contas de colar (Blasco Rodríguez e Ortiz Aleson, 1991).

De acordo com a opinião dos arqueólogos, é bastante provável que existam nas imediações desta necrópole outros monumentos semelhantes ao conhecido. Esta suspeita motivou o estudo geofísico e geodésico, levados a cabo com o objectivo de identificar novas estruturas na vizinhança da necrópole descoberta.

O levantamento geodésico para análise da morfologia da superfície foi feito através de fotografia aérea (com Drone) e GPS diferencial. A escolha do método geofísico foi o georadar, pelo facto de ser uma técnica não invasiva, precisa e de aplicação rápida. Para o levantamento de dados, basta o varrimento do radar sobre um conjunto de perfis previamente definidos. O processamento de sinal apesar de exigente, ainda assim pode ser realizado com rapidez. Mediante uma planificação adequada, os

resultados permitem inferir a existência de estruturas enterradas, ou cavidades, sendo possível uma visualização tridimensional, o que proporciona uma melhor interpretação da distribuição de estruturas que existam na sub-superfície. O nível de detalhe e alcance que se consegue atingir com esta técnica varia com o tipo de terreno, as condições morfológicas da superfície e com a frequência da antena usada.



Figura 1 – Sepulcro de Huerta Montero com esquematização das partes constituintes do monumento: (a) câmara funerária; (b) corredor de entrada; (c) rampa de acesso (Tomb of Huerta Montero with schematization of the monument: (a) burial chamber, (b) entry corridor, (c) access ramp).

A área de estudo, contendo o sepulcro de Huerta Montero, possui forma trapezoidal, de declive reduzido, quase aplanado. A litoestratigrafia na zona do sepulcro escavado é composta, do topo para a base, por uma capa de solo argiloso com uma espessura de 30 cm, depósitos calcários com uma espessura que varia entre os 40 e os 50 cm e arenitos de grão grosseiro com mais de 1 m de espessura.

2. ENSAIO DE GEORADAR

O georadar (GPR) é uma técnica que consiste no envio de pulsos electromagnéticos através de uma antena emissora (Tx) para o interior da terra, penetrando a sub-superfície até ao alcance permitido pela antena e pelo meio analisado (Davis e Annan, 1989). A antena receptora (Rx) recebe as ondas reflectidas pela estrutura do meio e pelas estruturas e interfaces que aí existirão. A análise dos pulsos recebidos permite a interpretação do interior das estruturas que se pretendem estudar. O campo de aplicação que se pode dar a esta técnica para análise e estudo da sub-superfície da crosta terrestre, ou de outras estruturas sólidas como o betão é muito vasto. O alcance e detalhe das imagens que se podem estimar a partir dos pulsos de GPR variam com o tipo de material, as suas condições e com a frequência da antena utilizada no ensaio.

Esta técnica é especialmente vocacionada para a investigação de objectos enterrados, cavidades em ambiente cárstico, identificação de litologias e estruturas no âmbito da engenharia civil (Davis e Annan, 1989; Kearey et al., 2002). A sua utilização em arqueologia e investigação forense são exemplos de sucesso. A rapidez da sua aplicação, com possibilidade de obtenção de resultados em tempo útil e com elevada precisão e fiabilidade na localização das estruturas é o principal argumento.

Os princípios físicos que conduzem à interpretação dos dados de georadar (radargramas) para a formação de uma “imagem” são similares aos usados por outras técnicas geofísicas como a reflexão sísmica, SAR ou sonar.

A propagação dos pulsos electromagnéticos de alta frequência produzidos na antena Tx depende das propriedades eléctricas do substrato e do seu conteúdo em fluidos aquosos, que se relaciona directamente com a porosidade e o grau de fracturação e alteração química (Davis e Annan, 1989; Kearey et al., 2002). O sinal reflectido pelo substrato, detectado na antena Rx, é armazenado no controlador do equipamento. A partir da análise das ondas electromagnéticas detectadas pelo georadar em cada posição da antena pode inferir-se sobre a velocidade e atenuação dos pulsos de onda reflectidos e daí a localização e propriedades eléctricas dos materiais geológicos que influenciam essas grandezas, que são a condutividade e a constante dieléctrica. A partir dos valores tabelados para cada material (Davis e Annan, 1989) é ainda possível estimar o tipo de material que constitui a estrutura identificada pelo reflector.

3. METODOLOGIA DO ENSAIO

A metodologia do ensaio de georadar compreende várias etapas. O rigor durante a aquisição é crucial para se obter resultados de qualidade.

A etapa inicial, antes de se iniciar o ensaio tridimensional, é a identificação e definição da grelha no terreno do levantamento, definindo cada perfil individual. Pode recorrer-se a cordas e pregos ou mesmo a tintas biodegradáveis de modo a que os perfis sejam paralelos entre si. A importância desta etapa relaciona-se com a precisão dos resultados. Um levantamento tridimensional cujos radargramas individuais não estejam completamente paralelos entre si vai ter má qualidade devido à introdução de informação incorrecta no processo de interpolação dos dados entre cada perfil.

Outro aspecto que se deve ter em conta, respeitante à precisão dos resultados, é a estabilidade da antena durante a execução do ensaio. É imperativo que o contacto entre a antena e o chão não possua obstáculos, como por exemplo pedras de elevada dimensão ou irregularidades no terreno. Um ensaio realizado em condições de terreno adversas irá originar ruído no radargrama, dificultando ou mesmo impossibilitando a sua interpretação.

Antes de se iniciar a aquisição do ensaio de georadar é necessário escolher os parâmetros de aquisição. É importante que se faça uma escolha adequada em função da antena que se utiliza e do material que existe no substrato rochoso. Cada antena possui parâmetros sugeridos pelo fabricante do equipamento que para a antena de 400 MHz são os seguintes: alcance de 50 ns, que pode aumentar-se até cerca de 60 ns sem comprometer os dados do ensaio, 512 amostras por scan, 3 pontos de ganho (modo manual),

filtro FIR passa alto de 100 MHz e passa baixo de 800 MHz, 120 scans por unidade de medida usada para calcular o deslocamento da antena (se a aquisição for no modo distância é o metro) e uma taxa de transmissão de 100 KHz.

No caso do estudo de Huerta Montero, foi planificada uma aquisição de perfis paralelos entre si de forma a conceber um radargrama tridimensional. Cada perfil individual possui 35 m de comprimento, a distância entre perfis é de 0,5 m e na totalidade foram feitos 75 perfis individuais, cobrindo uma área rectangular com 35 m de comprimento por 37 m de largura. Foi utilizada uma antena de 400 MHz, montada em “cart” equipado com um sistema de medição de distância electromecânico (odómetro). Durante a execução do ensaio de georadar foi realizado um levantamento topográfico com GPS diferencial de forma a registar a localização do ponto inicial e final de cada perfil de georadar, assim como de outros pontos essenciais para o estudo.

A aquisição foi realizada com o equipamento SIR-3000 (GSSI) no modo Quick-3D zig-zag (Figura 2), que implica introduzir a informação sobre o comprimento de cada perfil, a largura total do perfil 3D e o espaçamento entre perfis. Com a escolha deste modo apenas tem que se iniciar a aquisição para cada perfil individual, sendo a posição final determinada pelo equipamento, parando automaticamente a aquisição.

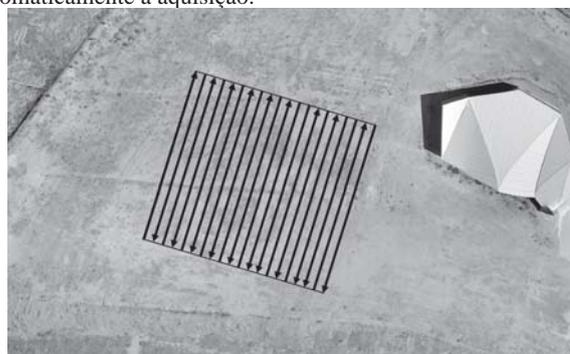


Figura 2 – Configuração em zig-zag adoptada para a aquisição dos perfis individuais (zigzag configuration adopted for the acquisition of individual profiles).

4. PROCESSAMENTO E TRATAMENTO DOS DADOS

O processamento e tratamento dos dados foi realizado mediante a utilização de dois códigos distintos, desenvolvidos para processamento de dados de georadar: o RADAN (GSSI) e o matGPR (MathWorks MATLAB). O objectivo do uso dos dois programas deve-se a colmatar as limitações específicas de cada algoritmo. O RADAN representa com eficiência um perfil tridimensional de georadar, no entanto é limitado em algumas operações de processamento e tratamento dos radargramas individuais. O matGPR é bastante eficiente no tratamento dos dados, colocando ao alcance do utilizador variados filtros e ferramentas potentes de migração e modelação, dando liberdade ao utilizador para modificar os parâmetros dos filtros. Todavia, ainda que tenha algumas ferramentas de representação tridimensional, é limitado no modo de visualização tridimensional, nomeadamente na manipulação das imagens. Essas ferramentas encontram-se em desenvolvimento e muito recentemente foi apresentada uma nova versão com melhorias significativas em relação à versão anterior, no entanto, ainda possuem limitações no modo de visualização tridimensional.

Assim, o processamento e tratamento dos dados vai ser descrito tomando como referência o matGPR devido a que, como foi referido, o utilizador possui com este programa mais controlo no tratamento de dados.

A primeira tarefa a realizar, ao iniciar-se o processamento, é abrir cada ficheiro individual da aquisição tridimensional de georadar e adicionar marcas referentes às posições de cada perfil relativamente ao terreno, permitindo ao programa ajustar os dados de forma a existir um espaçamento entre traços uniforme (Tzanis, 2013). A introdução desta informação é necessária devido ao

programa não conseguir ler com eficiência os parâmetros de aquisição, os quais incluem informação espacial proveniente do odómetro. Sem esta operação é impossível obter um perfil tridimensional com o matGPR, no entanto, existe a alternativa de se usar GPS durante a aquisição de georadar, porém de receptor passivo. Se for acoplado um sinal de proveniente de GPS diferencial, os dados do radar ficam contaminados pelo ruído electromagnético devido ao sinal rádio da comunicação entre as antenas do GPS diferencial. A alternativa mais viável é localizarem-se com precisão os limites de cada perfil individual e alguns pontos intermédios, para o caso de existir alguma alteração da altitude ao longo do perfil.

Realizada esta etapa podem-se tratar os dados, sendo possível correr uma macro de forma a tratar todos os ficheiros da mesma forma na mesma operação, evitando-se tratamentos diferentes entre cada perfil individual. O tratamento consistiu na correcção da posição do sinal, remoção do ruído de fundo e desconvolução preditiva. Esta última operação foi necessária devido à reverberação (múltiplos) que se originam durante a aquisição, o que vai comprometer a migração.

A etapa final consiste na migração dos dados tendo em conta o modelo lito-estratigráfico do local. Desta forma, consideraram-se as seguintes velocidades (Davis e Annan, 1989) e espessuras para as diferentes litologias identificadas no local, do topo para a base (Tabela 1):

Tabela 1 – Espessura das diferentes unidades litológicas do local de estudo e velocidades típicas dos materiais que as constituem (Thickness for different lithological units of the the study area and typical velocities of the materials that constitute them).

Litologia	Espessura (m)	Velocidade (m/ns)
Solo Argiloso	0,3	0,06
Calcário	0,5	0,12
Arenito	1,0	0,13

Estes dados de espessura e velocidade das várias litologias constituem o modelo de velocidades do local de estudo, sendo considerados em cada perfil individual para realizar a migração dos dados. A migração realizada foi segundo o algoritmo F-K, proposto por Stolt's (1978) para estruturas uniformes ou em camadas com velocidades distintas.

Após a migração, procedeu-se à interpolação entre perfis e construiu-se o modelo 3D que permite visualizações segundo cortes horizontais ou verticais. Com o programa RADAN os dados não foram migrados, tendo-se apenas procedido à correcção de posição, filtragem e desconvolução.

5. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados que se obtiveram com as duas abordagens são idênticos e ambos permitem inferir a possibilidade da existência de uma estrutura de forma circular, com cerca de 7 m de diâmetro que poderá corresponder a um monumento fúnebre como o que existe a poucos metros de distância.

A Figura 3 representa um corte horizontal do modelo tridimensional (*time slice*), com vista de topo, à profundidade temporal de 15 ns, gerada pelo programa RADAN.

A estrutura identificada no radargrama observa-se temporalmente entre os 13 e os 21 ns de profundidade, possuindo uma forma circular com um diâmetro de 7 m. Na parte setentrional da estrutura identificada notam-se duas saliências que poderão corresponder a uma entrada no edifício ou mesmo o resto de um túnel de entrada.

Na Figura 4 está representada uma das figuras anteriores georreferenciada de acordo com o levantamento topográfico que se realizou, sobreposta à fotografia aérea elaborada neste estudo. A entrada da alegada estrutura enterrada possui direcção NNE-SSW, compatível com a orientação do sepulcro de Huerta Montero e com a orientação da saída do sol da câmara durante o Solstício de Inverno.

Os resultados obtidos com o programa matGPR são similares aos do RADAN, no entanto, quanto à qualidade visual do resultado

final do radargrama tridimensional, esta é inferior (Figura 5). Todavia, é possível observar-se a mesma estrutura circular identificada nos radargramas resultantes do RADAN.



Figura 3 – Corte horizontal do radargrama tridimensional à profundidade temporal de 15 ns; está assinalada a estrutura circular que poderá corresponder a um monumento fúnebre (Horizontal cross section of three-dimensional radargram at temporal depth of 15 ns; it is marked the circular structure that may correspond to a funeral monument).

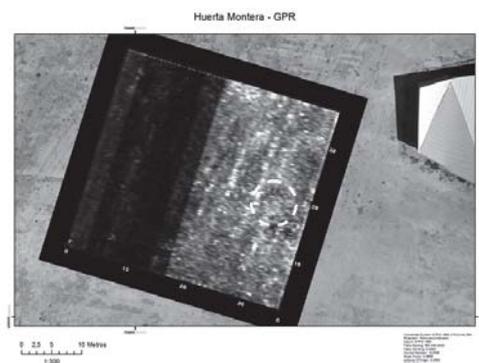


Figura 4 – Radargrama à profundidade temporal de 15 ns colocado e georreferenciado sobre a fotografia aérea do local de estudo (Radargram at temporal depth of 15 ns, placed and georeferenced over the aerial photograph of the study site).

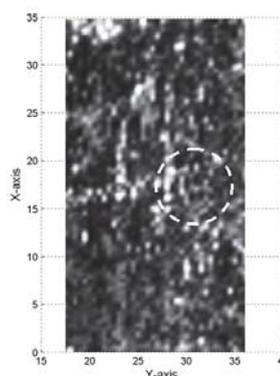


Figura 5 – Radargrama produzido pelo matGPR; a imagem é de qualidade pouco razoável devido à limitação do programa na representação tridimensional, no entanto observa-se a estrutura circular identificada (Radargram produced by matGPR; the image quality is unreasonable due to the limitation of the software in the three-dimensional slice representation, however it is possible to see the circular structure).

6. CONCLUSÃO

A prospecção georquológica com recurso a georadar é uma metodologia bastante eficiente na medida em que possibilita a detecção de objectos enterrados ou cavidades, evitando ter que se proceder a escavações prévias. Actualmente a utilização desta técnica em arqueologia é frequente e executada com êxito, mediante a utilização de software comercial para o processamento de dados, principalmente quando estão envolvidas estruturas bem contrastantes com o substrato e com uma distribuição espacial regular e bem definida, como é o caso de edificações da época romana.

Contudo, e apesar de ser uma técnica relativamente simples e rápida na sua execução, o processamento e tratamento dos dados é complexo quando o contraste nas interfaces das superfícies é subtil pois é necessário um grande exercício de processamento de sinal a partir dos dados brutos para se conseguir extrair informação onde o tratamento rotineiro não produz resultados.

Uma etapa igualmente importante é o processo de migração. A migração consiste em fazer colapsar as hipérbolas em pontos, de forma a converter a informação do radargrama numa linguagem de visualização próxima da que estamos habituados a entender. Para esse processo ser executado na perfeição seria necessário atribuir a cada ponto do modelo a velocidade de propagação das ondas electromagnéticas que não se conhece. Contudo, prova-se haver um bom nível de qualidade da imagem migrada se, no lugar do conhecimento preciso da velocidade em todos os pontos, conseguirmos um modelo de velocidades médio da estrutura. Esse modelo pode ser obtido a partir da análise das hipérbolas registadas em perfis de GPR efectuados sobre locais onde previamente foram enterrados artefactos conhecidos ou mediante o conhecimento das litologias presentes no local de estudo.

Com a execução deste estudo georquológico com recurso a georadar, após o tratamento cuidadoso dos radargramas individuais de forma a conceber um modelo tridimensional, foi possível estimar a presença de uma estrutura circular com um diâmetro de cerca de 7 m que poderá corresponder a um monumento funerário como o que foi encontrado a poucos metros de distância. Propõe-se comprovar esta hipótese, numa primeira fase, recorrendo a novos ensaios de georadar, todavia utilizando um espaçamento entre perfis individuais menor que o utilizado neste estudo, complementando com dados de resistividade eléctrica e prospecção magnética.

As ideias que se devem reter sobre a execução de um ensaio de georadar, seja aplicado a arqueologia ou a outra qualquer ciência, é que o rigor durante a etapa de aquisição é de extrema importância para que os resultados possuam qualidade e o tratamento do sinal deve ser efectuado com precaução de forma a eliminar com eficiência o ruído de fundo e reverberações que ocorram. O conhecimento geológico do local é importante para uma boa migração dos dados de forma a poder-se inferir conclusões espaciais do local estudado.

7. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado em Huerta Montero, Almendralejo, Espanha, na propriedade onde se encontra o Sepulcro de Huerta Montero. Um agradecimento a J. Pérez, F. Gómez, J. Figueria, C. Pro, da Universidade de Extremadura, Centro Universitário de Mérida e a F. Blasco, do Ajuntamento de Almendralejo.

8. REFERÊNCIAS

- Blasco Rodriguez, F. and Ortiz Aleson, M., 1991: "Trabajos arqueológicos en Huerta Montero. Almendralejo (Badajoz)". Extremadura arqueológica (I Jornadas de Prehistoria y Arqueología en Extremadura (1986-1990)), 2, 129-138.
- Davis, J. And Annan, A., 1989: "Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy". *Geophysical Prospecting*, 37, 531-551.
- Kearey, P., Brooks, M., Hill, I., 2002: "An Introduction to Geophysical Exploration". *Blackwell Science*.
- Stolt, R.H., 1978: "Migration by Fourier Transform". *Geophysics*, 43, 23-48.

Tzanis, A., 2013: "MatGPR (Release 3), Manual and Technical Reference". University of Athens, Department of Geophysics.