

**Universidade de Évora - Instituto de Investigação e Formação Avançada**

Programa de Doutoramento em Ciências da Terra e do Espaço

Área de especialização | Geofísica

Tese de Doutoramento

## **Prospecção geofísica aplicada à Arqueologia**

Rui Jorge Braga de Oliveira

Orientador(es) | Bento António Fialho Caeiro Caldeira  
Maria Teresa Teixidó Ullod

Évora 2020

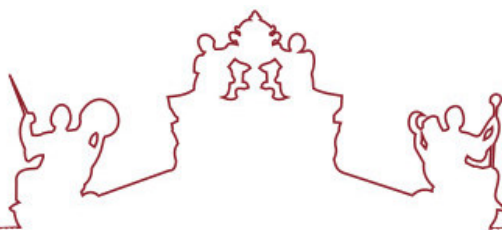
---

---

---

---





**Universidade de Évora - Instituto de Investigação e Formação Avançada**

Programa de Doutoramento em Ciências da Terra e do Espaço

Área de especialização | Geofísica

Tese de Doutoramento

## **Prospecção geofísica aplicada à Arqueologia**

Rui Jorge Braga de Oliveira

Orientador(es) | Bento António Fialho Caeiro Caldeira

Maria Teresa Teixidó Ullod

Évora 2020

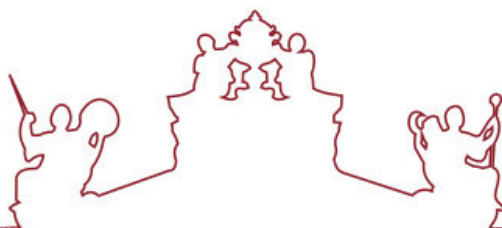
---

---

---

---





O tese de doutoramento foi objeto de apreciação e discussão pública pelo seguinte júri nomeado pelo Diretor do Instituto de Investigação e Formação Avançada:

Presidente | Mourad Bezzeghoud (Universidade de Évora)

Vogais | Bento António Fialho Caeiro Caldeira (Universidade de Évora) (Orientador)  
Fernando Pedro Ortega de Oliveira Figueiredo (Universidade de Coimbra)  
Francisco Carrión Méndez (Universidad de Granada)  
José Antonio Peña Ruano (Universidad de Granada)  
José Fernando Borges (Universidade de Évora)  
Maria Manuela de Sousa Mendes (Instituto Superior Técnico)



*“Cogito, ergo sum.”*

René Descartes





Aos meus pais e irmão.

Aos meus orientadores.



# ÍNDICE

Lista de figuras .....	vii
Lista de tabelas .....	xxi
Acrónimos .....	xxiii
Resumo .....	xxv
Abstract .....	xxvii
Agradecimentos .....	xxix

## Capítulo 1: Introdução e Enquadramento

1.1. Objetivos .....	3
1.2. Estrutura da dissertação .....	5
1.3. Enquadramento do estudo e publicações de resultados .....	6

## Capítulo 2: Enquadramento dos métodos geofísicos e geoespaciais

2.1. Método eletromagnético de georradar .....	8
2.1.1. Generalidades .....	8
Condição de baixas perdas .....	9
2.1.2. Natureza ondulatória dos campos eletromagnéticos .....	11
Parâmetros das OEM num meio .....	11
2.1.3. Resolução da prospeção GPR .....	14
Duração do pulso de GPR e frequência central emitida .....	14
Resolução GPR .....	15
2.1.4. Interações da energia do GPR numa interface .....	18
Reflexão e refração .....	18
2.1.5. Propriedades eletromagnéticas dos materiais no GPR .....	19

2.1.6. Características da aquisição de dados de GPR.....	21
Estabelecimento dos parâmetros para a aquisição de dados de GPR.....	22
2.1.7. Processamento básico de dados de GPR-2D e 3D .....	24
Edição de traços e implantação da geometria.....	26
Correção da posição zero e eliminação dos efeitos da onda acoplada .....	26
Migração e Desconvolução .....	27
Ajuste de ganho .....	28
Filtros temporais.....	28
Transformada de Hilbert.....	28
2.1.8. Visualização e interpretação.....	30
2.2. Método magnético.....	32
2.2.1. Conceitos básicos do formalismo do método magnético .....	32
2.2.2. Magnetismo no planeta Terra.....	34
Campo magnético terrestre interno .....	35
Campo magnético terrestre externo.....	35
Anomalias magnéticas provocadas por materiais contidos na subsuperfície.....	36
2.2.3. Tipos de magnetismo.....	37
Magnetismo remanescente .....	39
Magnetismo biológico .....	40
Tipos de anomalias presentes nos mapas magnéticos arqueológicos.....	41
2.2.4. Equipamentos de medição .....	43
Magnetómetro fluxgate .....	43
Magnetómetro de efeito overhauser .....	43
Magnetómetro de bombeamento ótico .....	45
2.2.5. Levantamento magnético terrestre em modo gradímetro .....	46
2.2.6. Processamento básico de dados de pseudo-gradiente vertical .....	48

Eliminação dos efeitos de paralaxe (destagger) .....	49
Eliminação do efeito de bandado (destripe) .....	49
Correção de valores anómalos e de anomalias de alto valor (despike e clipping) .....	50
Filtros espaciais e mapa resultante final .....	52
Mapas de contorno e redução ao polo .....	52
2.2.7. Interpretação .....	53
2.3. Métodos Geoespaciais .....	54
2.3.1. Fotogrametria com recurso a drone .....	54
2.3.2. Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS) .....	56
2.3.3. Sistemas de Informação Geográfica .....	58
2.3.4. Gestão da cartografia .....	60

### **Capítulo 3: Melhoria da imagem de GPR-3D através de Decomposição em Valores Singulares**

3.1. Teste laboratorial (ambiente controlado) .....	68
3.1.1. Modelo laboratorial .....	68
3.1.2. Modelo sintético .....	69
3.1.3. Comparação de radargramas .....	72
3.2. Determinação da forma de onda .....	75
Desconvolução iterativa .....	76
3.3. Estimativa e remoção do ruído de fundo no domínio espectral .....	79
3.3.2. Transformada discreta de <i>Fourier</i> 2D aplicada a imagens de GPR .....	80
3.3.2. Análise de um radargrama no domínio de Fourier .....	82
3.3.3. Extração de informação útil usando Decomposição em Valores Singulares .....	87
Análise de Componentes Principais .....	87
Decomposição em Valores Singulares .....	87
Aplicação de SVD a dados de GPR .....	88

3.4. Teste em dados de campo (ambiente não controlado).....	93
3.4.1. Modelo real.....	93
3.4.2. Modelo sintético .....	94
Cálculo do radargrama sintético .....	95
3.4.3. Comparação entre os dados sintéticos e observados .....	96
3.4.4. Estudo da forma de onda emitida pela antena de GPR .....	97
Desconvolução iterativa .....	98
3.4.5. Extração de informação útil usando SVD aplicada no domínio de <i>Fourier</i> .....	99
3.4.6. Aplicação da metodologia SVD à totalidade dos dados (GPR-3D).....	102
3.5. Discussão dos resultados .....	104
3.6. Considerações finais.....	105

#### **Capítulo 4: Melhoria da imagem de GPR-3D através de Interpolação de Fourier**

4.1. Aspectos sobre a geração de traços .....	110
4.1.1. Método escolhido para a geração de traços .....	112
4.2. Elaboração do programa de densificação de dados .....	112
4.2.1. Testes iniciais .....	112
4.2.2. Programa de densificação 3D .....	113
4.3. Resultados.....	116
4.3.1. Dados originais (d=0.250m) – conjunto de dados padrão – C0 .....	117
4.3.2. Dados interpolados (d=0.125m) – C1 .....	117
4.3.3. Dados decimados e interpolados (d=0.250m) – C2.....	118
4.3.4. Dados decimados (d=0.500m) – C3 .....	118
4.4. Discussão dos resultados .....	124
4.5. Considerações finais.....	125

## **Capítulo 5: Fusão de dados geofísicos de GPR e gradiente vertical magnético**

5.1. Baixa perçetibilidade em dados geofísicos .....	128
5.2. Primeira aproximação.....	128
5.3. Alguns conceitos sobre fusão de imagens.....	130
5.3.1. Transformada discreta de <i>Wavelet</i> .....	132
5.3.2. Decomposição em Valores Singulares Multi-resolução .....	133
5.3.3. Gradiente de uma imagem.....	134
5.3.4. Regras de fusão .....	135
5.4. Fusão de dados de GPR e de gradiente vertical magnético.....	135
5.4.1. Pré-processamento.....	136
5.4.2. Fusão de dados .....	136
5.5. Resultados .....	138
5.5.1. Dados de perçetibilidade elevada (DPE).....	138
5.5.2. Dados de perçetibilidade intermédia (DPI).....	142
5.5.3. Dados de perçetibilidade baixa (DPB).....	144
5.5.4. Parâmetros de nitidez e de qualidade dos resultados .....	147
5.6. Discussão dos resultados.....	150
5.7. Considerações finais.....	153

## **Capítulo 6: Estudo geofísico da Villa Romana de Pisões**

6.1. Contextualização da Villa Romana de Pisões .....	156
6.2. Prospeção geofísica da Villa Romana de Pisões .....	162
6.2.1. Prospeção magnética .....	163
Aquisição e análise dos dados magnéticos.....	163
Processamento do sinal magnético.....	165
6.2.2. Prospeção GPR.....	167

Aquisição e análise dos dados GPR .....	167
Processamento convencional.....	171
Tratamento específico 2D da superfície de cobertura .....	173
Processamento avançado .....	176
Comparação dos três conjuntos de dados.....	179
6.3. Fusão de dados geofísicos .....	180
6.4. Interpretação da prospeção geofísica.....	183
6.4.1. Interpretação do setor A1 .....	183
6.4.2. Interpretação de toda a prospeção .....	185
Interpretação .....	185
6.5. Considerações finais.....	189
 <b>Capítulo 7: Conclusões</b>	
7.1. Valorização dos algoritmos .....	193
7.2. Tratamento avançado de malhas de dados 2D .....	194
7.3. Síntese da exploração geofísica no sítio arqueológico da Villa Romana de Pisões.....	195
7.4. Linhas de investigação futuras .....	196
 Referências bibliográficas .....	 197
Anexo A1: Artigo científico publicado .....	209
Anexo A2: Algoritmos desenvolvidos .....	231



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1:** Representação esquemática da aquisição de dados de GPR e dos elementos de uma antena. (a) A parte transmissora (Tx) emite pulsos de OEM e a parte recetora (Rx) deteta, ao longo de um perfil, a energia dos pulsos emitidos que é refletida e difratada pelo solo. (b) Aquisição de dados e representação gráfica (radargrama). As OEM refletidas (traços) são representadas através de gradientes de cor; neste exemplo numa escala linear de tonalidade cinzenta. Um radargrama é uma imagem do perfil de GPR em que a escala horizontal é a distância (em m) e a escala vertical é o tempo duplo da reflexão (em ns). O traço representado à direita do radargrama corresponde à posição marcada por uma linha vermelha no radargrama, contém as variações de amplitude normalizadas. .8
- Figura 2.2:** (a) Relação entre a velocidade de propagação das OEM e das constantes dielétricas dos materiais terrestres. (b) Exemplos das diferenças temporais do sinal refletido ( $A$ ) quando passa por distintas combinações de materiais com constantes dielétricas diferentes.....12
- Figura 2.3:** Alguns dos fenómenos através dos quais a energia da OEM se dissipa. (a) Pela expansão da frente de onda, onde a densidade de energia decai com a distância de propagação. (b) Por difusão, quando a onda interfere com objetos que têm um tamanho semelhante ao seu comprimento de onda; em que depois há uma emissão de radiação em todas as direções. Este efeito também diminui a energia da onda. (c) Por difração, quando uma onda interage descontinuidades repentinas, como cantos, bordos ou cavidades. Todos esses efeitos contribuem para diminuição da energia e modificação da forma da OEM incidente.....12
- Figura 2.4:** (a) Dependência da atenuação com a distância de propagação da OEM.  $A_0$  é a amplitude inicial do sinal e  $A$  é a amplitude à distância  $Z$ . (b) A profundidade limite de investigação ( $\delta$ , *skin depth*) é estabelecida em função da atenuação das OEM ao penetrar num meio.....13
- Figura 2.5:** (a) Esquematização do padrão de radiação de uma antena de GPR e da sua pegada. (b) Representação da emissão de um pulso GPR (sinal emitido) e da receção das ondas refletidas entre pulsos emitidos (sinal recebido). .....14
- Figura 2.6:** (a) Esquema de duração de um pulso no domínio do tempo e da banda de frequências para duas antenas com frequência central de 100 MHz e 400 MHz. (b) Esquema das possíveis configurações para a chegada de dois pulsos à antena recetora: (1) pulsos claramente separados; (2) pulsos sobrepostos; (3) pulsos coincidentes.  $T$  é o período da OEM e  $W$  é a largura da onda a meia altura. Adaptado de Annan (2001). .....16
- Figura 2.7:** (a) Esquematização da pegada de uma antena de GPR, em que  $r$  representa o raio de *Fresnel*. (b) Conceito de resolução vertical,  $\Delta z$ , e (c) de resolução lateral,  $\Delta l$ . .....16
- Figura 2.8:** A resolução vertical depende da frequência do sinal emitido pelo GPR. Nos gráficos pode observar-se que a detetabilidade depende da espessura da camada ( $\Delta z$ ) e da frequência da antena

que se está a usar. Neste caso, consideraram-se antenas de frequência 200 MHz e 900 MHz. O eixo vertical corresponde ao tempo duplo de propagação, em ns. ....	17
<b>Figura 2.9:</b> (a) Esquema de dedução da Lei de <i>Snell</i> segundo a ótica paraxial. (b) Relação entre a energia transmitida e a energia refletida de acordo com o princípio de <i>Huygens</i> para uma frente de OEM. ....	18
<b>Figura 2.10:</b> Resumo das discontinuidades eletromagnéticas dos materiais. Estas podem estar relacionadas com modificações no tamanho, orientação e forma dos grãos e com modificações da composição do meio e o preenchimento dos poros (efeito da água e de sais dissolvidos). ....	21
<b>Figura 2.11:</b> Esquema de aquisição do GPR no modo de reflexão com deslocamento comum. A antena formada por um transmissor (E) e um recetor (R) desloca-se sobre o terreno efetuando disparos a distâncias predefinidas (imagem superior). Cada disparo gera um pulso OEM que se transmite para a subsuperfície. Ao encontrar corpos com propriedades EM distintas, estas ondas são refletidas, difratadas e/ou refratadas (imagem intermédia), cuja impressão no radargrama se designam por anomalias (imagem inferior). Neste exemplo, a reflexão linear mais superficial corresponde a uma primeira camada do terreno, enquanto que as reflexões em forma de hipérbole correspondem a cavidades de tamanhos distintos. ....	22
<b>Figura 2.12:</b> (a) Esquema de montagem dos perfis paralelos para construir o modelo de GPR-3D (b) que permite conhecer a morfologia das estruturas enterradas. ....	24
<b>Figura 2.13:</b> Principais etapas do processamento padrão de dados de GPR e da representação de resultados. ....	25
<b>Figura 2.14:</b> (a) Vista geral da zona de estudo (forma quadrada com 50 m de lado). (b) Esquema de aquisição dos dados (perfis paralelos em modo zig-zag). ....	25
<b>Figura 2.15:</b> Esquerda: Comparação entre um radargrama com ruído devido à onda acoplada e o mesmo depois de eliminado esse ruído de fundo. Direita: Comparação entre as respetivas imagens extraídas do modelo de GPR-3D, corte horizontal ( <i>depth slice</i> ) a $z=30\text{cm}$ . ....	26
<b>Figura 2.16:</b> Comparação com a figura anterior. Neste caso são comparados os dados antes e depois de aplicar a migração de <i>Kirchhoff</i> . Nos cortes horizontais pode observar-se uma diminuição do contraste e da nitidez. Apesar da aparente perda de informação, esta operação é muito útil quando é combinada com as operações subsequentes. ....	27
<b>Figura 2.17:</b> Comparação com a figura anterior. Neste caso é comparado o efeito da aplicação de uma desconvolução. É observado um novo aumento do contraste tanto no radargrama (faixa amarela) como no corte horizontal, permitindo que se detetem estruturas com maior nitidez. ....	28
<b>Figura 2.18:</b> Comparação com a figura anterior. Neste caso é comparado o efeito da aplicação do filtro temporal. É observada uma melhoria no corte horizontal (setor marcado a amarelo). ....	29
<b>Figura 2.19:</b> Comparação com a figura anterior. Neste caso, a aplicação da transformada de <i>Hilbert</i> produz uma melhoria nos resultados quando se observa o corte horizontal, em que as estruturas enterradas ficam com mais definição (setor marcado a amarelo). ....	29

<b>Figura 2.20:</b> Diversas possibilidades de representação dos resultados de GPR-3D. (a) Vista geral da cisterna e perfil individual adquirido sobre esta (a marca amarela sobre o corte horizontal a 45 cm de profundidade indica a localização do perfil no conjunto 3D). (b) Sucessão de cortes horizontais com espessura vertical de 22 cm. (c) Superfície de cobertura que compreende os materiais entre 18 e 80 cm de profundidade. (d) Representação 3D das reflexões mais importantes entre 0 e 1.6 m de profundidade.....	31
<b>Figura 2.21:</b> (a) Esquema de fluxo do campo magnético entre dois polos de uma barra magnética. (b) Esquema de um dipolo magnético.....	33
<b>Figura 2.22:</b> Componentes do campo magnético terrestre ( $H_T$ e $Z_T$ ) e parâmetros angulares que definem a sua direção e sentido ( $D_T$ e $I_T$ ). Adaptado de Kearey et al. (2002).....	36
<b>Figura 2.23:</b> 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 ambiental ( $F_{amb}$ ) e isolar a anomalia ( $F_{anom}$ ) para ser interpretada. Em Arqueologia, as anomalias geralmente são de valor muito baixo (entre os $\pm 20$ nT), pelo que os magnetómetros têm que ser muito sensíveis, já que devem discriminar $1 \text{ }^{\circ}/\text{000}$ .....	36
<b>Figura 2.24:</b> Mapa de anomalias magnéticas na zona da Necrópole do Sítio Romano de <i>El Guijo</i> (Córdoba, Espanha). Note-se que o alcance das anomalias está situado entre $\pm 12$ nT. A zona de <i>habitats</i> possui dados de GPR-3D que ajuda a interpretar os dados magnéticos. Adaptado de Teixidó et al. (2010).....	37
<b>Figura 2.25:</b> Tipos de magnetismo dos materiais e sua reação face a um campo magnético indutor $B_0$ . Adaptado de Teixidó et al. (2010). .....	38
<b>Figura 2.26:</b> Exemplo de magnetismo biológico. Mapa de anomalias magnéticas (produzido em 2010) de um local onde existiram estufas (em 2004). O quadrado verde indica a posição da antiga estufa. O mapa de anomalias magnéticas está representado em escala linear de cor cinza, com um intervalo de valores de $\pm 10$ nT/m. Zona de estudo: Vera, Almeria (Espanha). Adaptado de Teixidó & Peña (2010). .....	40
<b>Figura 2.27:</b> A análise de um mapa de anomalias magnéticas geralmente realiza-se mediante a classificação dos distintos tipos de anomalias. Sítio arqueológico Fenício de <i>Cerro del Villar</i> (Málaga, Espanha). Neste local está situada a desembocadura do rio Guadalhorce, que na época Fenícia (VII a.C.) era uma ilha dentro de um estuário (Aubert Semmler et al., 1999). Adaptado de Teixidó et al. (2010). .....	42
<b>Figura 2.28:</b> Esquema de funcionamento do magnetómetro <i>fluxgate</i> . (a) Circuito, campos magnéticos gerados e sinal registado. (b) Imagem do circuito interno e fotografias da aquisição de dados em modo <i>array</i> , com 4 sensores (2 sensores em cada barra vertical) e com 8 sensores. ....	44
<b>Figura 2.29:</b> Esquema de funcionamento do magnetómetro <i>overhauser</i> . (a-c) Os prótons de hidrogénio do líquido atuam como pequenos dipolos, que ficam paralelamente orientados com o	

campo magnético <i>BT</i> . A imagem inferior é de um equipamento de 4 sensores (círculos vermelhos). .....	44
<b>Figura 2.30:</b> As imagens mostram o esquema de funcionamento de um magnetómetro de bombeamento ótico (1-4). A imagem inferior mostra uma aquisição de dados com um equipamento de dois sensores (gradiómetro). .....	46
<b>Figura 2.31:</b> 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. ....	46
<b>Figura 2.32:</b> (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 $\pm 10$ nT/m. ....	47
<b>Figura 2.33:</b> Etapas do processamento de dados magnéticos para obtenção do mapa de anomalias magnéticas. ....	48
<b>Figura 2.34:</b> À esquerda: Mapa bidimensional de anomalias magnéticas (dados brutos) em escala linear de cinzas. Os valores correspondentes aos pontos localizados entre os perfis foram interpolados. Apenas se destaca uma anomalia forte cujos valores de intensidade definem o intervalo de valores ( $\pm 500$ nT/m). À direita: O mesmo mapa representado numa escala de cores modificada que permite observar as anomalias mais débeis. ....	49
<b>Figura 2.35:</b> A análise da paralaxe é realizada através da comparação dos perfis coincidentes adquiridos em sentido contrário (linha de controlo). Neste caso, o desfasamento é de 1 m, de forma que cada perfil deve ser deslocado $\pm 0.5$ m dependendo do sentido da aquisição. ....	50
<b>Figura 2.36:</b> Comparação do mapa de anomalias magnéticas antes (esquerda) e depois (direita) da correção dos sulcos. Observa-se que a correção dos dados não produziu perda de informação. ....	50
<b>Figura 2.37:</b> Superior esquerda: Mapa de anomalias fortes (ferromagnéticas). Superior direita: Mapa de anomalias intermédias. Inferior esquerda: Mapa de anomalias débeis. Inferior direita: Histograma de cada grupo de anomalias. As anomalias mais fortes correspondem ao grupo 1, as intermédias ao grupo 2 e as débeis ao grupo 3. Neste gráfico pode observar-se de forma quantitativa a predominância dos sinais mais débeis sobre os restantes. ....	51
<b>Figura 2.38:</b> (a) Mapa de anomalias magnéticas antes das correções dos valores anómalos e de anomalias de alto valor. (b) Mapa resultante de ambas as correções. (c) Mapa resultante da aplicação de filtros espaciais passa-banda. ....	52
<b>Figura 2.39:</b> Interpretação conjunta dos resultados de GPR-3D (a,c) e gradiente vertical magnético (b) cuja existência foi confirmada pela escavação arqueológica (d). ....	53

<b>Figura 2.40:</b> (a) Fragmento da ortofotografia do mosaico obtido a partir da Fotogrametria. (b) Fragmento do DSM da mesma área mostrada em (a). (c) Detalhe ampliado da área selecionada em (a). (d) Detalhe ampliado da área selecionada em (b). .....	56
<b>Figura 2.41:</b> (a) Levantamento de GPS diferencial (modo PPK) com antena base (no tripé) e antena móvel (no bastão). (b) Representação de alguns pontos de controlo em solo usados num levantamento de Fotogrametria.....	58
<b>Figura 2.42:</b> Villa Romana de Fuente Álamo, Puente Genil (Córdoba, Espanha). (a) Ortofotografia da zona de estudo (IGN, 2008). (b) Ortofotografia detalhada do retângulo vermelho depois da escavação (IGN, 2014). (c) Representação tridimensional do modelo de GPR-3D sobre a planimetria arqueológica (Teixidó & Peña, 2010a). Os dois conjuntos estão georreferenciados no mesmo SIG. ....	59
<b>Figura 2.43:</b> Reconstrução paleogeográfica da localização do sítio arqueológico de <i>Cerro del Villar</i> . Este aparece como uma barra fluvial no que seria um antigo estuário (marcado com ponto vermelho). ....	60
<b>Figura 2.44:</b> Modelo Digital de Terreno (MDT) permite a elaboração de um mapa de isolinhas. Neste caso foram produzidas curvas de nível a cada 0.1 m para enfatizar o relevo e assinalaram-se as linhas de altitude 3.5 m com cor azul e de 4.1 m com cor vermelha para realçar a semelhança morfológica com a reconstrução paleogeográfica.....	61
<b>Figura 2.45:</b> (a) Mapa elaborado com dados de LIDAR provenientes da primeira reflexão da onda, que se assemelha ao relevo da vegetação. (b) Mapa elaborado a partir das últimas reflexões da onda, que se assemelha ao relevo do solo. (c) Ortofotografia com representação das curvas de nível da altitude 3.5 m (azul) e 4.1 m (vermelho).....	62
<b>Figura 2.46:</b> Ortofotografia de infravermelho do local, onde se observam alguns alinhamentos correspondentes a uma antiga linha férrea, onde atualmente está localizada uma conduta metálica. Observam-se também alinhamentos que poderão corresponder a estruturas enterradas a uma maior profundidade.....	63
<b>Figura 2.47:</b> Porção da ortofotografia do voo americano de 1956-1957 correspondente ao sítio arqueológico. (a) Imagem original, em escala de cor cinza, onde foram assinaladas as localizações das estacas usadas na prospeção geofísica. (b) Resultados obtidos pelo processamento da imagem original para se obterem alinhamentos de interesse à exploração arqueológica. (c) Representação da imagem anterior incluindo o “relevo” associado à cor do pixel.....	64
<b>Figura 2.48:</b> (a) Porção da ortofotografia do voo americano de 1956-1957 correspondente ao sítio arqueológico, em que se sobrepuseram os cortes arqueológicos e as curvas de nível que definem a “ilha-barras”. (b) Mapa de anomalias magnéticas com outra escala gráfica de valores.....	65
<b>Figura 3.1:</b> (a) Modelo real criado em laboratório, onde foi adquirido um perfil 2D de GPR e determinados os valores dos parâmetros físicos necessários à criação do modelo sintético. (1) Taludes e base em argamassa de cimento. (2) Solo (camada 1). (3) Solo (camada 2). (4) Cilindro de plástico,	

oco. (5) Prisma de alumínio, maciço. (b) Radargrama adquirido com uma antena de 1.6 GHz, sobre o modelo laboratorial (dados brutos).....	69
<b>Figura 3.2:</b> Representação gráfica do modelo sintético criado a partir do modelo real criado em laboratório, obtido pelo programa MatGPR R2. (1) Taludes e base em argamassa de cimento. (2) Solo (camada 1). (3) Solo (camada 2). (4) Cilindro de plástico, oco. (5) Prisma de alumínio, maciço. ....	70
<b>Figura 3.3:</b> Radargrama sintético calculado com o programa MatGPR R2. (1) Taludes e base em argamassa de cimento. (2) Solo (camada 1). (3) Solo (camada 2). (4) Cilindro de plástico, oco. (5) Prisma de alumínio, maciço. ....	72
<b>Figura 3.4:</b> (a) Perfil de GPR adquirido no modelo laboratorial, com uma antena de 1.6 GHz. (b) Radargrama sintético calculado por diferenças finitas no domínio do tempo. (c) Quadrado da diferença entre os dois conjuntos de dados (observado e sintético), que realça as diferenças. (d) Representação gráfica do Índice de Similitude Estrutural que realça as semelhanças.....	73
<b>Figura 3.5:</b> Esquema de montagem usado para determinar a forma de onda emitida pelas antenas de GPR. ....	75
<b>Figura 3.6:</b> (a) Do topo para a base: traço médio sem a placa de cobre; traço médio com a placa de cobre; diferença entre os dois traços; traço resultante (simétrico da diferença entre os traços). (b) Forma de onda emitida pela antena de GPR de frequência 1.6 GHz depois de ajustar o traço resultante à origem. ....	76
<b>Figura 3.7:</b> Resultado do teste ao algoritmo de Ligorria e Ammon (1999), mostrando o traço original e o traço desconvolvido, muito semelhante ao original. ....	77
<b>Figura 3.8:</b> (a) Radargrama antes da desconvolução. (b) Radargrama depois da desconvolução. .	78
<b>Figura 3.9:</b> (a) Radargrama observado desconvolvido. (b) Radargrama sintético. (c) Diferença ao quadrado entre (a) e (b), depois de alinhados. (d) Índice de Similitude Estrutural.....	78
<b>Figura 3.10:</b> (a) Esquema da representação do espectro de amplitudes de Fourier, mostrando a distribuição dos dados transformados em frequências, ficando as de valor alto localizadas no centro do espectro e as baixas na periferia e divididas em quadrantes. (b) Espectro depois de se trocar a posição dos quadrantes, de modo a que as baixas frequências passem a estar localizadas no centro do espectro e as altas na periferia, facilitando a definição da matriz do filtro. Adaptado de Brown et al. (2001). ....	81
<b>Figura 3.11:</b> Esquema da aplicação do filtro no domínio da frequência. Adaptado de Shaikh et al. (2016). ....	82
<b>Figura 3.12:</b> (a) Dados de entrada: radargrama desconvolvido. (b) Dados de saída: radargrama depois de aplicar a transformada discreta de <i>Fourier</i> seguida da operação inversa aos dados de entrada (a), sem aplicação de qualquer operação de filtragem, para verificar que o uso da transformada de <i>Fourier</i> não introduz qualquer deformação aos dados de entrada.....	83

<b>Figura 3.13:</b> Espectro de amplitudes dos dados de entrada. (a) Antes da aplicação do <i>shift</i> . (b) Depois da aplicação do <i>shift</i> (dados ficam centrados e com simetria). .....	83
<b>Figura 3.14:</b> Espectro de fases dos dados de entrada. (a) Antes da aplicação do <i>shift</i> . (b) Depois da aplicação do <i>shift</i> (dados ficam centrados e com simetria). .....	83
<b>Figura 3.15:</b> Vista 3D do espectro de amplitudes dos dados de entrada. ....	84
<b>Figura 3.16:</b> Localização dos dados no espectro de amplitudes (a) e no espectro de fases (b).....	85
<b>Figura 3.17:</b> Espectro de amplitudes do filtro parametrizado por tentativa e erro a partir da análise direta do espectro de amplitudes dos dados de entrada. A linha vermelha esquematiza o desenho do filtro. ....	85
<b>Figura 3.18:</b> Resultados da aplicação do filtro no domínio espectral. (a) Dados de entrada no domínio do espaço – tempo. (b) Espectro de amplitude dos dados filtrados. (c) Espectro de fases dos dados filtrados. (d) Dados filtrados no domínio do espaço – tempo. ....	86
<b>Figura 3.19:</b> Componentes principais de um radargrama, obtidas por SVD dos dados transformados. ....	89
<b>Figura 3.20:</b> Resultado dos testes para verificação do efeito do restauro dos dados iniciais considerando apenas algumas componentes principais e respectivos espectros de amplitudes. (a) Dados filtrados mantendo apenas a primeira componente principal. (b) Dados filtrados mantendo as duas primeiras componentes principais. (c) Dados filtrados mantendo as três primeiras componentes principais. ....	91
<b>Figura 3.21:</b> Resultado do teste para verificação do efeito do restauro dos dados iniciais considerando todas as componentes principais exceto a primeira. (a) Dados filtrados. (b) Espectro de amplitudes dos dados filtrados (3D). Eliminando a primeira componente principal, correspondente ao ruído de fundo, o sinal restaurado corresponde à informação útil contida no radargrama.....	92
<b>Figura 3.22:</b> Resultados da aplicação do filtro no domínio espectral, usando SVD. (a) Dados de entrada no domínio do espaço – tempo. (b) Espectro de amplitude dos dados filtrados. (c) Espectro de fases dos dados filtrados. (d) Dados filtrados no domínio do espaço – tempo. A eliminação do sinal em torno de $k=0$ elimina o bandado horizontal dos dados que se encontrava a camuflar o sinal útil do conjunto de dados. ....	92
<b>Figura 3.23:</b> (a) Modelo GPR-3D. (b) Imagem da escavação no local onde os refletores evidenciam a presença de um muro robusto, assinalado a tracejado em (a). Principais estruturas observadas: 1 – solo; 2 – muro; 3 – pavimento. (c) Perfil de GPR adquirido no local assinalado pela linha em (b), onde é possível localizar as reflexões correspondentes ao muro e ao pavimento. ....	93
<b>Figura 3.24:</b> Modelo sintético criado a partir do modelo real da Villa Romana de Horta da Torre (escala vertical exagerada). Legenda: (1) solo; (2) muro; (3) pavimento. ....	94
<b>Figura 3.25:</b> Radargrama sintético obtido do modelo sintético. Legenda: 1 – solo; 2 – muro; 3 – pavimento. ....	95

<b>Figura 3.26:</b> Comparação visual entre o radargrama observado (a) e o radargrama sintético (b). Adaptado de Oliveira et al. (2016b). .....	96
<b>Figura 3.27:</b> (a) Radargrama observado. (b) Radargrama sintético. (c) Diferença ao quadrado entre (a) e (b), depois de alinhados. (d) Índice de Similitude Estrutural. ....	97
<b>Figura 3.28:</b> Forma de onda emitida para a antena de 400 MHz determinada experimentalmente.	97
<b>Figura 3.29:</b> (a) Radargrama antes da desconvolução. (b) Radargrama depois da desconvolução.	98
<b>Figura 3.30:</b> (a) Radargrama observado desconvoluído. (b) Radargrama sintético. (c) Diferença ao quadrado entre (a) e (b), depois de alinhados. (d) Índice de Similitude Estrutural. ....	98
<b>Figura 3.31:</b> (a) Dados de entrada – perfil de GPR observado, desconvoluído o pulso de onda. (b) Espectro de amplitudes. (c) Espectro de fases. (d) Vista 3D do espectro de amplitudes. ....	99
<b>Figura 3.32:</b> Componentes principais do radargrama obtido em campo, obtidas por SVD dos dados transformados. ....	100
<b>Figura 3.33:</b> Resultado do teste efetuado para verificar o efeito do restauro dos dados iniciais considerando apenas a primeira componente principal. (a) Dados filtrados após aplicar a transformada inversa de <i>Fourier</i> . (b) Espectro de amplitudes da matriz obtida (vista 3D). ....	100
<b>Figura 3.34:</b> Resultado da aplicação do filtro no domínio espectral, usando SVD. (a) Dados de entrada no domínio do espaço – tempo. (b) Espectro de amplitudes dos dados filtrados. (c) Espectro de fases dos dados filtrados. (d) Dados filtrados no domínio do espaço – tempo. ....	101
<b>Figura 3.35:</b> Comparação entre os resultados do processamento dos dados de GPR-3D de Horta da Torre usando o programa comercial (RADAN) e usando a abordagem com uso de SVD aplicada no domínio espectral (FFT2+SVD). Cortes horizontais, a diversas profundidades, extraídos do modelo 3D. ....	103
<b>Figura 3.36:</b> Sobreposição de um corte horizontal do modelo 3D de cada conjunto de dados, da mesma profundidade ( $z=0,38m$ ) a uma imagem aérea do local (cedida pela empresa Geodrone). (a) Corte horizontal proveniente dos resultados do processamento de dados usando exclusivamente programa comercial. (b) Corte horizontal proveniente dos resultados da abordagem que usa SVD aplicada no domínio da frequência – número de onda. As linhas vermelhas assinalam as estruturas atualmente escavadas. ....	104
<b>Figura 4.1:</b> a) Radargrama original. b) Radargrama interpolado através do algoritmo <i>Suinterp</i> .	113
<b>Figura 4.2:</b> (a) Inspeção do traço interpolado: (T1) traço original 1; (I) traço interpolado a partir de T1 e T2; e (T2) traço original 2. (b) Subtração entre pares de traços para observar a diferença entre os conjuntos de dados: (T1-T2) diferença entre traços originais; e (T1-I) e (I-T2) diferença entre cada um dos traços originais com o traço interpolado. ....	113
<b>Figura 4.3:</b> Esquema de organização da matriz de dados GPR 3D: (a) orientação paralela dos perfis originais, inseridos na matriz de dados 3D; (b) orientação perpendicular dos perfis, após rotação de $90^\circ$ , estando os dados prontos a serem interpolados; e (c) orientação paralela dos perfis, após interpolação e após nova rotação de $90^\circ$ para repor o referencial original. ....	114



<b>Figura 4.4:</b> Fluxograma da abordagem para realizar interpolação de Fourier a dados de GPR 3D, usando o algoritmo <i>Suinterp</i> .....	115
<b>Figura 4.5:</b> Comparação entre os dados originais (C0 – d=0.250m) e os dados densificados através da interpolação de <i>Fourier</i> (C1 – d=0.125m).....	120
<b>Figura 4.6:</b> Comparação entre os dados originais (C0 – d=0.250m) e os dados decimados e interpolados (C2 – d=0.250m). ....	121
<b>Figura 4.7:</b> Comparação entre os dados originais (C0 – d=0.250m) e os dados decimados (C3 – d=0.500m). ....	122
<b>Figura 4.8:</b> Comparação entre os dados decimados (C3 – d=0.500m) e os dados decimados e interpolados (C2 – d=0.250m). ....	123
<b>Figura 5.1:</b> Esquema representativo da aplicação da transformada de <i>Wavelet</i> a uma imagem (Gautam and Kumar, 2015), em que são exibidos: (a) Um nível de decomposição; (b) Dois níveis de decomposição. ....	133
<b>Figura 5.2:</b> Estrutura da decomposição MSVD de uma imagem, em que são exibidos três níveis de decomposição (Naidu, 2011).....	134
<b>Figura 5.3:</b> Esquema de implementação da fusão dos dados geofísicos de GPR e gradiente vertical do campo magnético. Adaptado de Gautam and Kumar (2015) para esta fusão. ....	137
<b>Figura 5.4:</b> Dados de entrada de GPR (a) e gradiente vertical magnético (b). (c-d) Efeito do filtro mediano a cada conjunto. ....	139
<b>Figura 5.5:</b> Efeito da aplicação do algoritmo para remoção do ruído de fundo (FFT2+SVD) aos dados de GPR (a) e de gradiente vertical magnético (b).....	139
<b>Figura 5.6:</b> Entropia local dos dados de GPR (a) e de gradiente vertical magnético (b).....	140
<b>Figura 5.7:</b> (a) Resultado final do processamento de fusão de dados geofísicos usando dados de perceptibilidade elevada. (b) Imagem da escavação arqueológica efetuada no local, assinalada com linha tracejada em (a). ....	141
<b>Figura 5.8:</b> Dados de entrada de GPR (a) e gradiente vertical magnético (b). (c-d) Efeito do filtro mediano a cada conjunto. ....	142
<b>Figura 5.9:</b> Efeito da aplicação do algoritmo para remoção do ruído de fundo (FFT2+SVD) aos dados de GPR (a) e de gradiente vertical magnético (b) e respetiva entropia local (c-d). ....	143
<b>Figura 5.10:</b> Resultado final do processamento de fusão de dados geofísicos usando dados de perceptibilidade intermédia. ....	144
<b>Figura 5.11:</b> Dados de entrada de GPR (a) e gradiente vertical magnético (b). (c-d) Efeito do filtro mediano a cada conjunto. ....	145
<b>Figura 5.12:</b> Efeito da aplicação do algoritmo para remoção do ruído de fundo (FFT2+SVD) aos dados de GPR (a) e de gradiente vertical magnético (b) e respetiva entropia local (c-d). ....	146
<b>Figura 5.13:</b> Resultado final do processamento de fusão de dados geofísicos usando dados de perceptibilidade baixa.....	147

<b>Figura 5.14:</b> Representação gráfica da evolução dos parâmetros Índice de Nitidez e Índice de Qualidade (BRISQUE) dos três conjuntos de dados considerados. (a-b) Dados de perceptibilidade elevada. (c-d) Dados de perceptibilidade intermédia. (e-f) Dados de perceptibilidade baixa.....	149
<b>Figura 5.15:</b> Vista geral da totalidade da área de prospeção magnética. Estão assinaladas as áreas correspondentes aos dados de perceptibilidade elevada (a), perceptibilidade intermédia (b) e perceptibilidade baixa (c). .....	152
<b>Figura 6.1:</b> Localização geográfica e vista geral da Villa Romana de Pisões (imagem obtida por drone). As estruturas visíveis na imagem correspondem aos vestígios <i>pars urbana</i> da villa (parte central), à zona envolvente (área prospectada) e os vestígios da barragem Romana (parte superior, lado direito). .....	156
<b>Figura 6.2:</b> Diversos elementos constituintes da <i>pars urbana</i> da Villa Romana de Pisões. (a) Piscina de grandes dimensões ( <i>natatio</i> ). (b) Compartimentos e piscina de pequenas dimensões. (c) Hipocausto das termas. (d) Compartimentos, corredor colunado, escadas em mármore e pavimento de mosaicos. (e) Pavimento de mosaicos mostrando grande detalhe no seu design e nas suas cores. (f) Escadas em mármore e peristilo colunado. ....	157
<b>Figura 6.3:</b> Escavação de vestígios de uma conduta abobadada subterrânea, um aqueduto para transporte de água para o interior da Villa de Pisões. A estrutura localiza-se junto de uma linha de água a poucos metros do recinto protegido da villa. (a) Início da escavação, numa linha de água. (b) Aqueduto depois de escavado, exibindo grandes dimensões. (c) Obras de proteção da estrutura escavada; observa-se grande quantidade de água junto da escavação. Retirado de Serra (2007)..	158
<b>Figura 6.4:</b> Modelo digital de elevação (MDE) de Pisões obtido por Fotogrametria com recurso a drone. ....	159
<b>Figura 6.5:</b> Localização de algumas estruturas na área de estudo: vestígios arqueológicos (vermelho), edifícios atuais (amarelo), estradas (preto) e linhas de água (azul). Está assinalada a localização de uma sondagem onde foi descoberto o aqueduto subterrâneo. ....	160
<b>Figura 6.6:</b> Representação dos três conjuntos de orientações preferenciais das estruturas visíveis em Pisões. A rotação de direções poderá permitir a classificação em diferentes tipologias de edifícios que compõem uma villa Romana. ....	161
<b>Figura 6.7:</b> 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.	162
<b>Figura 6.8:</b> (a) A aquisição de dados magnéticos foi realizada com um <i>array</i> de 4 magnetómetros <i>overhouser</i> 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 <i>array</i> . ....	163

**Figura 6.9:** Mapa de anomalias do gradiente vertical 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. ....164

**Figura 6.10:** 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  $\pm 5$  ciclos/m. (c) Distribuição espacial de amplitudes estendida  $\pm 10$  m de cada ponto da malha. ....164

**Figura 6.11:** 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  $\pm 20$  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. ....165

**Figura 6.12:** Resultados dos levantamentos magnéticos de gradiente vertical realizados nas 7 áreas de estudo prospectadas. Todos os conjuntos de dados foram filtrados com as mesmas seqüências de operações, adaptadas a cada conjunto de dados, com aplicação adicional da redução ao polo magnético. ....166

**Figura 6.13:** (a) Vista detalhada do setor A1 explorado com prospeção 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. ....167

**Figura 6.14:** Porções de radargramas de campo homólogos, pertencentes aos dois conjuntos de dados de GPR (200 MHz e 400MHz). ....168

**Figura 6.15:** Espectros de frequências das duas porções dos radargramas considerados na Figura 6.14, 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 harmônicos do *background*. ....169

**Figura 6.16:** Radargrama obtido com a antena de 200 MHz. Determinação de alguns valores de velocidade de materiais a partir do colapso das hipérboles de difração. ....170

**Figura 6.17:** Efeito da correção da paralaxe, antes (a) e depois (b). ....171

**Figura 6.18:** (a-b) Porções de radargramas, os mesmos exibidos na Figura 6.14, 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. ....	172
<b>Figura 6.19:</b> (a) Superfície de cobertura do conjunto GPR1 obtida por interpolação linear com o método de <i>kriging</i> 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. ....	173
<b>Figura 6.20:</b> 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. ....	174
<b>Figura 6.21:</b> Processo de eliminação do bandado. (a) Superfície de cobertura normalizada resultante da diferença entre a superfície da Figura 6.19b e o ruído de fundo da Figura 6.19c. (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. ....	175
<b>Figura 6.22:</b> (a) Superfície de cobertura do conjunto 3D-GPR2, interpolado com o método de <i>kriging</i> linear. (b) Os mesmos dados depois de serem interpolados com recurso ao semivariograma analítico. (c) Slice à profundidade 3.65 m, com espessura 0.25 m, interpolado com o mesmo semivariograma. Este slice corresponde ao ruído de fundo e serve para eliminar o bandado N-S. (d) Semivariograma experimental e ajuste teórico. (e) Superfície de cobertura normalizada resultante da diferença (ponderada) entre a superfície (b) e o ruído de fundo (c). (f) Gradiente horizontal do conjunto anterior. (g) Mesmo conjunto do gradiente horizontal com representação espacial e outra escala de cores. Todas as malhas possuem valores de amplitude normalizados. ....	177
<b>Figura 6.23:</b> (a) Superfície de cobertura do conjunto 3D-GPR3 interpolado pelo método de <i>kriging</i> linear. (b) Os mesmos dados depois de efetuar a interpolação a partir do semivariograma analítico. (c) Slice à profundidade 3.65 m, com espessura de 0.25 m, correspondente ao ruído de fundo. (d) Semivariograma experimental e ajuste teórico. (e) Superfície de cobertura normalizada resultante da diferença (ponderada) entre a superfície anterior (b) e o ruído de fundo (c). (f) Gradiente horizontal do conjunto resultante. (g) Gradiente horizontal com representação espacial e outra escala de cores. Todas as malhas possuem valores de amplitude normalizados. ....	178
<b>Figura 6.24:</b> 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 <i>kriging</i> com semi-variograma. (c) 3D-GPR2, resultante da densificação de dados. (d) 3D-GPR3, resultante da remoção do ruído no domínio espectral. Sobre as três superfícies foram traçadas algumas linhas para facilitar a observação dos alinhamentos mais significativos. ....	179

<b>Figura 6.25:</b> Dados de entrada do algoritmo de fusão de dados geofísicos: (a) 3D-GPR3 – Superfície de cobertura dos dados densificados, processados e filtrados do ruído de fundo; (b) MAG gradiente vertical filtrado e com aplicação de RTP. ....	180
<b>Figura 6.26:</b> (a) Resultado da fusão de dados. (b) Histograma da frequência absoluta dos intervalos de amplitude dos resultados. (c) Ajuste da gama de cores do resultado da fusão de dados – representação de 95% dos valores de amplitude. (d) Histograma da frequência absoluta dos intervalos de amplitude de 95% dos valores considerados em (a). ....	181
<b>Figura 6.27:</b> Representação gráfica da evolução do Índice de Nitidez (a) e Índice de Qualidade – BRISQUE (b) dos dados considerados em várias etapas da fusão de dados. ....	182
<b>Figura 6.28:</b> Visualização dos modelos obtidos no setor A1. (a) Mapa de anomalias magnéticas. (b) Modelo 3D-GPR. (c) Resultado da fusão de dados de ambos. Sobre os três modelos foram traçadas as linhas interpretativas mais significativas. ....	183
<b>Figura 6.29:</b> Interpretação das anomalias geofísicas sobre o modelo da fusão. Os valores mais próximos da unidade (a vermelho) estão associados a locais em que há coincidência com os valores altos de anomalias magnéticas e o intervalo de valores médios (a castanho) a amplitudes GPR. ...	184
<b>Figura 6.30:</b> Interpretação geral da prospeção geofísica sobre a ortofotografia da Villa de Pisões. ....	187
<b>Figura 6.31:</b> Vista geral da exploração geofísica sobre o MDE da Villa de Pisões. Em todos os setores há sobreposição do levantamento magnético, exceto no setor A1, em que está representado o modelo de fusão. Foi marcada com cor azul a curva de nível da altitude 185 m para evidenciar o início da canalização detetada. ....	188



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1:</b> Duração do pulso emitido pelas diferentes antenas de GPR e dos respectivos comprimentos de onda para cada valor de frequência central.....	15
<b>Tabela 2.2:</b> Valores típicos para tempo duplo por metro por litologia e respectiva constante dielétrica relativa e condutividade elétrica.....	20
<b>Tabela 2.3:</b> Limites de subamostragem de $\Delta t$ e $\Delta x$ em função de valores de frequência central das antenas mais comuns, considerando a velocidade de propagação da OEM no ar ( $v = 0.3$ m/ns). ....	23
<b>Tabela 2.4:</b> Valores dos filtros passa-banda para as antenas de GPR mais comuns.....	24
<b>Tabela 2.5:</b> Valores de suscetibilidade magnética para alguns materiais.....	39
<b>Tabela 3.1:</b> Parâmetros físicos dos materiais que constituem o modelo laboratorial, para serem considerados no modelo sintético. Nos materiais assinalados com (*) foram usados valores compatíveis com o algoritmo.....	70
<b>Tabela 3.2:</b> Parametrização experimental usada para o cálculo do radargrama sintético, para o caso laboratorial e valores máximos admissíveis pelo algoritmo.....	71
<b>Tabela 3.3:</b> Parametrização usada para o cálculo do radargrama sintético, para o caso laboratorial.....	77
<b>Tabela 3.4:</b> Parâmetros físicos dos materiais que constituem o modelo real, em contexto de campo, para serem considerados no modelo sintético.....	95
<b>Tabela 3.5:</b> Parametrização usada para o cálculo do radargrama sintético, para o caso laboratorial.....	95
<b>Tabela 4.1:</b> Índice de Similitude Estrutural entre os diversos conjuntos de dados considerados a diferentes profundidades.....	119
<b>Tabela 4.2:</b> Índice de Nitidez dos conjuntos de dados considerados a diferentes profundidades.....	119
<b>Tabela 5.1:</b> Valores do Índice de Nitidez para os três conjuntos de dados considerados.....	148
<b>Tabela 5.2:</b> Valores do Índice de Qualidade (BRISQUE) para os três conjuntos de dados considerados.....	148
<b>Tabela 6.1:</b> Fluxo de processamento para dos mapas de anomalias magnéticas.....	165
<b>Tabela 6.2:</b> Parâmetros de aquisição do conjunto de dados de GPR-3D obtidos com as duas antenas de GPR.....	168
<b>Tabela 6.3:</b> Fluxo de processamento convencional aplicado aos dados de GPR (antena de 200 MHz).....	171
<b>Tabela 6.4:</b> Evolução do Índice de Nitidez e do Índice de Qualidade (BRISQUE) dos dados do setor A1.....	182





## ACRÓNIMOS

AMT – Audio Magnetotellurics  
BRISQUE - Blind/Referenceless Image Spatial Quality Evaluator  
CT – Computed Tomography  
DPB – Dados de Percetibilidade Baixa  
DPE – Dados de Percetibilidade elevada  
DPI – Dados de Percetibilidade intermédia  
DSM – Digital Surface Model  
DWT – Discrete Wavelet Transform  
EM – Eletromagnética  
FDEM - Frequency Domain Electro Magnetic  
FFT – Fast Fourier Transform  
GNSS - Global Navigation Satellite System  
GPR – Ground Penetrating Radar  
GPS – Global Positioning System  
LIDAR - Light Detection And Ranging  
MDE – Modelo Digital de Elevação  
MDT – Modelo Digital de Terreno  
MRI – Magnetic Resonance Imaging  
MSVD – Multi-resolution Single Value Decomposition  
MT - Magnetotellurics  
NRMSD – Normalized Root Mean Square Deviation  
OEM – Onda Eletromagnética  
PCA – Principal Component Analysis  
PPK – Post Processed Kinematic  
RMS – Root Mean Square Deviation  
RTK - Real Time Kinematic  
RTP – Reduction to the Magnetic Pole  
SAR – Synthetic Aperture Radar  
SIG – Sistemas de Informação Geográfica  
SSI - Structural Similarity Index  
SVD – Single Value Decomposition  
TDEM – Time Domain Electro Magnetic  
VLF – Very Low Frequency



# PROSPEÇÃO GEOFÍSICA APLICADA À ARQUEOLOGIA

## RESUMO

O estudo de metodologias eficazes de prospeção geofísica em ambiente arqueológico é uma proposta para resolver problemas que se colocam quando a Geofísica tenta conceber modelos que satisfaçam os requisitos arqueológicos. A exploração geofísica é uma das ferramentas que a Arqueologia moderna incorpora para obter informação sobre o subsolo através da sua exploração indireta.

A presente tese de doutoramento está enquadrada neste domínio e o seu objetivo consistiu no aperfeiçoamento dos modelos de georradar (GPR) e dos mapas de anomalias magnéticas obtidos em condições de baixa detetabilidade. A investigação consistiu no estudo e conceção de novas metodologias focadas no aumento da relação sinal-ruído dos dados e sua aplicação a casos reais para obter modelos mais esclarecedores. Nomeadamente através de:

- 1) Remoção do ruído de fundo dos dados de GPR utilizando filtros espectrais, com seleção da informação útil utilizando técnicas de fatorização de dados que permitem o aumento da nitidez dos modelos originais (Algoritmo SVD).
- 2) Aumento da resolução dos modelos de GPR-3D com recurso à interpolação de Fourier de modo a obter-se perfis de GPR entre cada dois perfis existentes (Algoritmo INT-FFT).
- 3) Aumento da informação geofísica combinando superfícies GPR-2D e mapas de anomalias magnéticas, aplicando técnicas de fusão usadas em Imagiologia Médica para deteção de tumores (Algoritmo FUSÃO-GPR-MAG).
- 4) Uso de Estatística Geoespacial para otimização da interpolação de malhas de dados associadas a análise espectral e filtragem para avaliar as tendências espaciais dos dados.

As metodologias desenvolvidas foram aplicadas ao estudo geofísico da Villa de Pisões (Beja), cujos dados possuem muito baixa percetibilidade. O uso sequencial das metodologias concebidas permitiu passar de um cenário de aparente falta de informação útil e incapaz de produzir modelos aceitáveis, para um em que se tornou possível identificar com clareza as anomalias geofísicas e consequentemente produzir um modelo interpretativo global da área não escavada do perímetro de Pisões.

**Palavras-chave:** Processamento de sinal digital no domínio espectral; Remoção de ruído de GPR; Densificação de dados de GPR; Fusão de dados de GPR e MAG; Produção de modelos geofísicos com dados de baixa percetibilidade.



# GEOPHYSICAL PROSPECTION APPLIED TO ARCHAEOLOGY

## ABSTRACT

The study of effective methodologies for geophysical prospection in an archaeological environment is a proposal to solve problems that arise when Geophysics tries to design models that satisfy the archaeological requirements. Geophysical exploration is one of the tools that modern Archaeology incorporates to obtain information about the subsoil through its indirect exploration.

This doctoral thesis fits in this domain and its objective was to improve the georadar models (GPR) and the magnetic anomalies maps obtained in conditions of low detectability. The research comprised the study and design of new methodologies focused on increasing the signal-to-noise ratio of the data and its application to real cases to obtain more clarifying models. Namely through:

- 1) Removal of background noise from GPR data using spectral filters, with selection of useful information using data factoring techniques that allow the increasing of the sharpness of the original models (SVD Algorithm).
- 2) Increase of the resolution of GPR-3D models using Fourier interpolation in order to obtain GPR profiles between each two existing profiles (INT-FFT Algorithm).
- 3) Increase of geophysical information combining GPR-2D surfaces and magnetic anomalies maps, applying fusion techniques used in Medical Imaging for tumour detection (FUSÃO-GPR-MAG Algorithm).
- 4) Use of Geospatial Statistics to optimize the grid data interpolation combined with spectral analysis and filtering to assess spatial trends in the data.

The developed methodologies were applied to the geophysical study of Villa Romana de Pisões (Beja), whose data have very low perceptibility. The sequential use of the methodologies conceived allowed to move from a scenario of apparent lack of useful information to one in which it became possible to identify geophysical anomalies. This allowed the production of a global interpretative model of the unexcavated area of the Villa de Pisões.

**Keywords:** Digital signal processing in spectral domain; GPR noise removal; Densification of GPR data; GPR and MAG data fusion; Production of geophysical models with low perceptibility data.



## AGRADECIMENTOS

A realização de todo o trabalho apresentado não teria sido possível sem a preciosa ajuda das diversas pessoas e instituições a quem endereço o meu profundo agradecimento.

Aos meus orientadores e mentores de todo o trabalho de doutoramento, Professor Bento Caldeira (DFIS/UÉ) e Doutora Teresa Teixidó (IAG/UGR), agradeço toda a permanente disponibilidade, apoio, confiança e simpatia. As ótimas condições de trabalho permitiram que concretizasse todas as ideias que surgiram durante a execução do plano de trabalhos e que culminaram na sua conclusão.

Dirijo um agradecimento ao Professor José Fernando Borges (DFIS/UÉ), que enquanto membro da equipa de trabalho constitui também um dos mentores deste trabalho. Todo o acompanhamento, disponibilidade e apoio foram também fundamentais para a concretização deste trabalho.

Ao Professor Mourad Bezzeghoud (DFIS/UÉ), também membro da equipa de trabalho, agradeço toda a disponibilidade, confiança e apoio demonstrados durante a minha permanência no ciclo de estudos e no desenvolvimento da investigação.

Ao Instituto de Ciências da Terra e Centro de Geofísica de Évora, endereço um agradecimento pela disponibilidade enquanto instituição de acolhimento e pelo apoio nas diversas deslocações a eventos de divulgação científica.

Ao Departamento de Física da UÉ agradeço a disponibilidade das instalações, estendendo-se o agradecimento a todos os funcionários que apoiam o trabalho dos investigadores.

Um agradecimento aos projetos de investigação que estiveram envolvidos neste estudo enquanto fui bolseiro de investigação nos projetos ATESTA, APOLLO-IMAGOS e INNOACE.

Ao Instituto Andaluz de Geofísica da Universidad de Granada, endereço o meu agradecimento pela disponibilidade para me receber nas instalações do IAG para desenvolvimento do trabalho de doutoramento com a orientadora Doutora Teresa Teixidó, juntamente com a sua equipa de trabalho liderada pelo Professor José Peña Ruano, ao qual endereço o meu agradecimento.

Endereço um agradecimento especial à Professora Florinda Mendes da Costa (DFIS/UA), que sempre acompanhou e apoiou todo o meu desenvolvimento enquanto investigador.

Uma palavra muito especial aos meus amigos pela vossa proximidade, amizade, apoio e confiança.

Por último um grande agradecimento aos meus pais e irmão, por todo o apoio e acompanhamento, pela força e por acreditarem em mim.

A todos um grande bem-haja!





# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO E ENQUADRAMENTO

A Geofísica Aplicada é uma ciência que utiliza um conjunto de técnicas não invasivas e não destrutivas para investigação do subsolo. A sua aplicação como etapa prévia às escavações ou sondagens arqueológicas pode desempenhar um papel fundamental na delimitação do local, tornando mais eficazes as ações de proteção do Património.

Uma exploração arqueológica é um processo naturalmente prolongado no tempo, quase sempre com interrupções, períodos de abandono e sem quaisquer meios de proteção. É um cenário que possivelmente poderá dever-se à falta de conhecimento sobre a real dimensão e valor do local arqueológico, da sua distribuição no espaço e do seu estado de conservação.

A estimativa da localização e distribuição espacial das estruturas enterradas, resultante da aplicação de métodos geofísicos pode reduzir significativamente o tempo e custos operacionais da escavação, orientando o Arqueólogo para os locais a escavar e sobre o que procurar. Todavia, poucos Arqueólogos beneficiam da aplicação de técnicas geofísicas em circunstâncias tecnicamente adequadas. São frequentes situações em que os dados são obtidos em regime intensivo utilizando tecnologia altamente sofisticada, no entanto, o processamento é realizado por rotinas completamente automáticas que produzem resultados aceitáveis quando as condições físicas do terreno são boas, mas que fracassam em maus terrenos e quando há um relevo irregular, provocando uma descrença sobre a validade das técnicas geofísicas utilizadas em prospeção arqueológica.

A aplicação de métodos geofísicos para mapeamento de vestígios culturais surgiu nos Estados Unidos e Reino Unido entre 1920 e 1930, com o uso de métodos elétricos e magnéticos (Conyers & Goodman, 1997). Os primeiros trabalhos consistiram em medições de resistência elétrica na subsuperfície (Linford, 2006). Após um período experimental a técnica teve uma adesão drástica. Entre 1960 e 1970, foi desenvolvida instrumentação especializada para uso em campo, sensível a sinais de baixa amplitude e baixo comprimento de onda e foram introduzidos novos algoritmos dedicados ao

tratamento destes dados e processamento de imagem (Scollar et al., 1986). A década de 1970 foi um período de inatividade, contudo, na década seguinte foi retomado o progresso das prospeções arqueológicas, com o desenvolvimento de instrumentos mais eficientes e de menor custo e da capacidade de cálculo, o que permitiu a implementação de algoritmos mais robustos usados no tratamento e interpretação de dados (Gaffney & Gater, 2006).

A magnetometria é a técnica geofísica mais usada para fins arqueológicos; os magnetómetros de fluxo (Allred, 1964), de precessão protónica e de bombeamento ótico (Ralph, 1964) são os mais utilizados atualmente. A preferência pela magnetometria deve-se à rapidez na recolha de dados, o que permite explorar grandes áreas em tempo razoável e na possibilidade de aplicação na maioria dos terrenos, exceto naqueles em que há elevada contaminação por ferro. A evolução para sistemas multisensor e com possibilidade de serem montados sobre veículos construídos em material não magnético (Becker, 2015) permitiu a utilização de sensores como, por exemplo, o magnetómetro de vapor de césio, cujos resultados originaram publicações de destaque na ciência, incluindo aplicadas à Arqueologia (Neubauer, 2001).

Os métodos elétricos, dos quais se destacam as sondagens elétricas verticais e a tomografia de resistividade elétrica, usados para produzir mapas ou perfis verticais, são métodos muito utilizados para fins arqueológicos, produzindo-se modelos de resistividades que possibilitam a estimativa da localização das estruturas enterradas e fazer avaliações geológicas dos materiais presentes no sítio (Aspinall & Gaffney, 2001). Atualmente existem instrumentos que permitem automatizar a aquisição de medidas de resistividade, que permitem a obtenção de dados em maior quantidade e velocidade, permitindo inclusive uma análise tridimensional.

O georradar é o método eletromagnético mais recente com uso na Arqueologia. Popularizou-se a partir de 1970 (Vickers & Dolphin, 1975) devido à sua rápida aquisição de dados e ao seu poder de resolução. O alcance e resolução são função da frequência das antenas utilizadas, que variam tipicamente entre 100 MHz e 1,6 GHz (Conyers & Goodman, 1997). Com elas é possível detetar estruturas entre 5 cm e 70 m de profundidade. Os equipamentos de aquisição mais recentes possuem sistemas de transporte e múltiplos sensores com GPS integrados, o que permite fazer levantamentos de grande densidade em pouco tempo. O processamento de dados de perfis individuais poderá ser útil para a elaboração de cortes geológicos.

Os métodos de indução eletromagnética, baseados no domínio da frequência, permitem a medição da condutividade elétrica e da suscetibilidade magnética do terreno, normalmente a duas profundidades e com duas orientações de polarização, originando mapas das variações destes parâmetros (Gaffney, 2008).

Os métodos sísmicos são úteis na deteção de cavidades (Metwaly et al., 2005), de paleocanais (Hildebrand et al., 2007) e na determinação da espessura de sedimentos em cavernas pré-históricas

(Teixidó & Peña, 2009), no entanto são menos usados devido à complexidade instrumental, tempo de aplicação e sobretudo ao maior nível de processamento dos dados exigido.

## 1.1. OBJETIVOS

Apesar da grande diversidade de métodos que existem, da sofisticação tecnológica e mesmo da automatização de algumas técnicas de processamento dos dados, ocorrem frequentemente situações em que os resultados produzidos não permitem avaliar o conteúdo que possa existir na subsuperfície. Essas situações podem ser potenciadas por diversas razões, destacando-se o excesso de ruído presente nos dados adquiridos e a ausência de sinal em determinadas condições do meio.

O excesso de ruído presente no sinal, em detrimento do sinal útil, é observado quando não é possível distinguir as duas componentes do sinal, podendo ter origem, por exemplo, na poluição ambiental (eletrónica, chuva, vento) ou na presença de heterogeneidades no subsolo (derrubes, cantos) que produzem tantas reflexões quantas as que são originadas pelas estruturas que possam existir, impedindo a boa avaliação do conteúdo da subsuperfície.

As condições de baixa percetibilidade acontecem quando não é possível obter contraste entre as estruturas enterradas e o meio envolvente, podendo dever-se à presença de materiais que contaminam o método (metais e cerâmicas nos métodos magnéticos; argila e água nos métodos eletromagnéticos, por exemplo) ou quando os objetos enterrados são constituídos pelo mesmo material do meio envolvente.

A problemática em torno da identificação e seleção do sinal útil em dados geofísicos constitui um dos alvos de investigação de metodologias eficazes de prospeção geofísica em ambiente arqueológico, porque o principal objetivo é a produção de modelos ótimos que satisfaçam os requisitos arqueológicos.

É neste contexto que se enquadra a presente Tese de Doutoramento que visa apresentar uma série de algoritmos para melhorar a relação sinal/ruído dos dados de georradar e magnéticos em condições de baixa percetibilidade. A concretização deste objetivo implicou o planeamento de uma série de etapas que por si mesmas podem ser consideradas como objetivos secundários.

Na primeira etapa, foi efetuada uma análise do ruído de fundo contido nos dados de georradar. Para esse efeito, foi concebido um programa experimental que consistiu em produzir um modelo de subsolo controlado em laboratório, realizar registos sobre esse modelo e utilizar os dados adquiridos, para comparar com os dados sintéticos calculados numericamente a partir de um modelo matemático que reproduz o modelo real. O estabelecimento de comparações entre os dois conjuntos permitiu identificar e remover o ruído dos dados reais. Para testar a metodologia concebida, esta foi aplicada

aos dados de georradar do sítio arqueológico de Horta da Torre (Fronteira, Portugal), obtendo uma melhoria do resultado.

Em geral, a aquisição georradar é obtida através do varrimento da área de estudo em perfis paralelos, em modo zig-zag, em que o eixo horizontal é a distância percorrida ( $X$ , m) e o eixo vertical é o tempo de ida e volta ( $Z$ , ns) do sinal emitido e refletido. O gráfico de cada perfil é designado de radargrama e para as antenas mais comuns usadas em Arqueologia, a distância entre perfis é de 0.5 m e a distância entre traços adjacentes registados no mesmo perfil é de 2, 5 ou 10 cm. Isto implica uma sobreposição na direção do perfil, em comparação com o espaçamento entre traços adjacentes de perfis paralelos. Esta geometria também afeta a qualidade do modelo final porque as estruturas tendem a estender-se na direção dos perfis e alguns atributos são lateralmente fracos.

Na segunda etapa, foi abordada a necessidade de aumentar a resolução horizontal ( $Y$ , m) através da densificação do número de perfis, fazendo uso de técnicas de interpolação espectral. O algoritmo construído também foi aplicado aos mesmos dados de georradar de Horta da Torre, produzindo uma maior nitidez da planimetria das estruturas enterradas.

Outro fator mencionado como responsável pela fraca resposta dos métodos geofísicos em determinadas situações é quando há um baixo contraste entre o corpo enterrado e o meio envolvente. Isto acontece quando dois materiais têm valores semelhantes do parâmetro físico detetável durante a exploração (susceptibilidade magnética, constante dielétrica e resistividade elétrica). Quando se consideram os parâmetros físicos medidos pelos diferentes métodos geofísicos e o seu grau de aplicação na Arqueologia, a prospeção magnética e o georradar são os métodos habitualmente mais utilizados. Esta circunstância foi utilizada para propor a terceira etapa da investigação, que consistiu no desenvolvimento de uma técnica que “unifique” os modelos finais de cada método para que, em condições de baixa perceptibilidade, se complementem e reforcem mutuamente.

O trabalho com os dois métodos é “geometricamente” viável porque ambos geram modelos em forma de malhas bidimensionais. No mapa de anomalias magnéticas, as dimensões são a superfície do solo ( $X$ ,  $Y$ ) e a distribuição do campo magnético de superfície anómala ( $Z$ ); enquanto que no georradar são as dimensões dos cortes horizontais (*depth-time slices* ou *cover surfaces*) e a amplitude das ondas eletromagnéticas refletidas ( $Z$ ). Além disso, a susceptibilidade magnética e a constante dielétrica são dois parâmetros que aparecem nas equações constitutivas de Maxwell e que estão estreitamente relacionados. Os modelos obtidos nos ensaios realizados mostram a eficácia desta técnica, que gera um modelo compatível com os dois tipos de respostas físicas, mais resolúveis e que contêm mais informação.

Finalmente, esta tese conclui com a aplicação das metodologias estabelecidas nas fases anteriores à prospeção geofísica da Villa Romana de Pisões (Beja, Portugal), um local em que os dados de georradar têm muito pouco sinal útil, o que provoca nos dados uma grande falta de perceptibilidade. Além

disso, a prospeção magnética apresenta anomalias elevadas que “ofuscam” as mais fracas que correspondem, por exemplo, a estruturas do tipo muro. Nestas condições adversas, ficou demonstrado que, quando se efetuam análises e tratamentos avançados dos sinais geofísicos, os modelos obtidos melhoram notavelmente.

## 1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Seguindo a descrição na secção anterior, a presente Tese de Doutoramento foi estruturada nos seguintes capítulos:

- O Capítulo 2, intitulado “Enquadramento dos métodos geofísicos e geoespaciais” é uma compilação do estado da arte dos métodos de georradar e do levantamento magnético, tal como se aplicam à Arqueologia. Os princípios físicos que os regem e as suas características metodológicas são apresentados, tanto a nível teórico como para os dispositivos experimentais e de processamento convencional de dados. A secção final apresenta ainda, de forma breve, outras técnicas geoespaciais como a Fotogrametria e a cartografia digital, que são amplamente utilizadas como material de apoio aos modelos geofísicos.
- O Capítulo 3, “Melhoria da imagem GPR-3D através de Decomposição em Valores Singulares”, inicia a parte mais inovadora da tese, no que diz respeito à investigação. É dedicado ao estudo da problemática do ruído de fundo presente em radargramas.
- No Capítulo 4, “Melhoria da imagem de GPR-3D através da Interpolação de *Fourier*”, é proposto o aumento da resolução horizontal de um modelo de georradar 3D usando rotinas de interpolação entre traços no domínio de *Fourier*. É demonstrado o aumento da definição gráfica. Este método tem demonstrado reconstruir informação ausente.
- O Capítulo 5, “Fusão de dados geofísicos de GPR-2D e de mapas de anomalias magnéticas”, mostra a aplicação de técnicas de fusão de dados a partir da combinação de um modelo magnético e de um modelo de georradar da mesma área de estudo e em condições de baixa perceptibilidade. Esta nova metodologia foi baseada na Imagiologia Médica para deteção de tumores.
- O Capítulo 6, “Estudo geofísico da Villa Romana de Pisões”, é onde são utilizados os algoritmos apresentados na parte da investigação metodológica (Capítulos 3, 4 e 5) para avaliar a sua eficácia. Isto foi realizado utilizando dados da exploração geofísica realizada na Villa Romana de Pisões, um local com muito baixa perceptibilidade e em que os modelos processados com as abordagens convencionais não permitem que se possa inferir a existência de estruturas enterradas.

- Por último, no Capítulo 7, “Conclusões”, são coligidas todas as conclusões e considerações observadas ao longo deste trabalho de investigação.
- Além disso, inclui-se uma secção com as referências bibliográficas e dois anexos: Anexo 1, que contém um artigo que mostra a capacidade do GPR para estudar em pormenor o interior de uma estrutura arqueológica; e Anexo 2, que contém uma lista dos algoritmos concebidos nesta tese (SDV, INT-FFT e FUSÃO-GPR-MAG).

### 1.3. ENQUADRAMENTO DO ESTUDO E PUBLICAÇÕES DE RESULTADOS

A investigação de metodologias eficazes de prospeção geofísica em ambiente arqueológico tem vindo a ser desenvolvida desde 2013, inserida na equipa de trabalho em Geofísica Aplicada a Arqueologia do Instituto de Ciências da Terra – Universidade de Évora e associada a trabalhos desenvolvidos no âmbito dos Projetos de Investigação ATESTA (PTDC/CTE-GIX/099540/2008), APOLLO-IMAGOS (ALENT-07-0224-FEDER-001760) e INNOACE (0049\_INNOACE\_4\_E), financiados por fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito dos Projetos UIDB/04683/2020 e SFRH/BSAB/143063/2018, e inserida no Plano de Ação da Villa Romana de Pisões.



Parte deste trabalho foi possível graças à colaboração do Instituto Universitario de Investigación Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos da Universidad de Granada (Espanha) que facilitou instrumentação e rotinas de processamento de dados. Este material foi financiado através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER 2010-2011 e 2015-2016).



Os resultados obtidos nesta dissertação têm vindo a ser apresentados publicamente em eventos de divulgação científica, destacando-se os seguintes eventos: Assembleia Geral da União Europeia de Geociências (2017, 2018, 2019 e 2020), Assembleia Luso-Espanhola de Geodesia e Geofísica (2014 e 2016), Simpósio da Associação Portuguesa de Meteorologia e Geofísica (2015, 2017 e 2019), Workshop de Ciências da Terra e do Espaço (2013 a 2018), Congresso de Jovens Investigadores em Geociências (2013 a 2018) e Assembleia Geral da IUGG (2019). Alguns resultados foram também publicados em revistas científicas, nomeadamente, Caldeira et al. (2019), Carvalho et al. (2018) e Oliveira et al. (2014, 2016b).

## **CAPÍTULO 2**

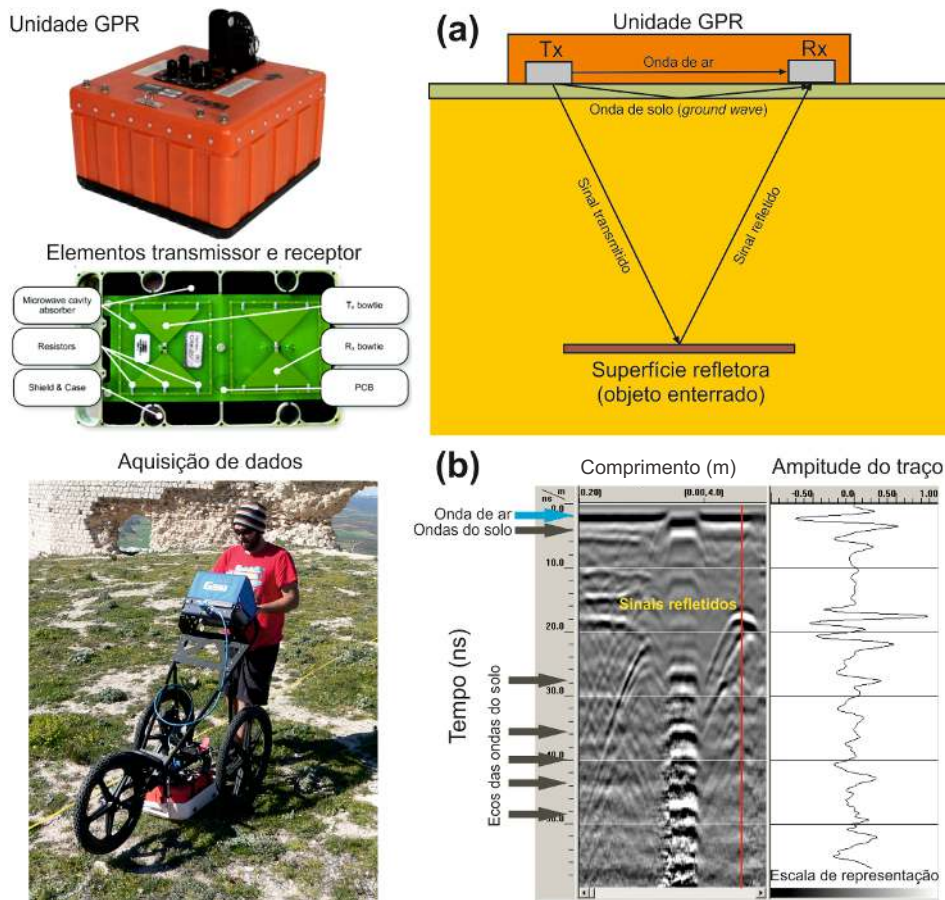
### **ENQUADRAMENTO DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS E GEOESPACIAIS**

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos em torno dos métodos geofísicos e geoespaciais que são usados nesta tese. Em primeiro lugar, é efetuada uma ampla revisão da prospeção de Georadar, que é o principal método de pesquisa desta tese. Também é realizado o enquadramento do método de prospeção magnética em modo pseudo-gradiente vertical que foi usado para elaborar os mapas de anomalias magnéticas. Finalmente é feita uma breve menção aos métodos geoespaciais de Fotogrametria, GPS diferencial, Sistemas de Informação Geográfica e gestão de cartografia.

## 2.1. MÉTODO ELETROMAGNÉTICO DE GEORRADAR

### 2.1.1. Generalidades

O Radar de Penetração no Solo (Figura 2.1), também designado por georradar ou GPR (*Ground Penetrating Radar*), é uma técnica geofísica que utiliza a propagação de ondas eletromagnéticas (OEM) através do solo, para delas extrair informação que permite a identificação de estruturas e/ou descontinuidades no seu interior (Annan, 2001). As descontinuidades que afetam a propagação das OEM são variações dos parâmetros eletromagnéticos dos materiais: permissividade dielétrica relativa, condutividade elétrica e permeabilidade magnética.



**Figura 2.1:** Representação esquemática da aquisição de dados de GPR e dos elementos de uma antena. (a) A parte transmissora (Tx) emite pulsos de OEM e a parte recetora (Rx) deteta, ao longo de um perfil, a energia dos pulsos emitidos que é refletida e difratada pelo solo. (b) Aquisição de dados e representação gráfica (radargrama). As OEM refletidas (traços) são representadas através de gradientes de cor; neste exemplo numa escala linear de tonalidade cinzenta. Um radargrama é uma imagem do perfil de GPR em que a escala horizontal é a distância (em m) e a escala vertical é o tempo duplo da reflexão (em ns). O traço representado à direita do radargrama corresponde à posição marcada por uma linha vermelha no radargrama, contém as variações de amplitude normalizadas.

O funcionamento de um equipamento de GPR consiste na emissão sequencial de pulsos eletromagnéticos gerados pela antena transmissora (Tx, Figura 2.1a) que são dirigidos ao interior do solo em



intervalos de frequência entre 60 e 100 Hz. A antena recetora (Rx, Figura 2.1a) regista os valores de amplitude da energia do pulso depois de refletido e modificado pelas estruturas que compõem a subsuperfície. A representação do registo de cada um desses conjuntos de amplitudes que chegam à antena durante um determinado intervalo de tempo constitui um traço. A organização sequencial dos traços produzidos ao longo de um perfil pode ser representada graficamente através de um diagrama denominado de radargrama. Os radargramas podem ser visualizados sob a forma de traços dispostos lado a lado, mas mais modernamente a sua representação consiste num mapa de gradiente de cor em que é representada a amplitude da OEM recebida em Rx, em função da localização do traço e do respetivo tempo (Figura 2.1b).

Os fundamentos teóricos dos métodos geofísicos denominados eletromagnéticos, são explicados matematicamente através da teoria eletromagnética que descreve a física dos campos eletromagnéticos envolvidos através das equações de Maxwell. A aplicação das equações de Maxwell a um meio físico, por exemplo o solo, com as características determinadas pelos parâmetros eletromagnéticos permitividade dielétrica ( $\epsilon$ ), condutividade elétrica ( $\sigma$ ) e permeabilidade magnética ( $\mu$ ), permite obter as equações constitutivas, que descrevem como se relacionam três grandezas físicas características em determinado meio face a um campo EM (Equações 2.1 a 2.3).

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1} \quad 2.1$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \sigma_0 = 0 \text{ Sm}^{-1} \quad 2.2$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1} \quad 2.3$$

Em que  $\vec{E}$  é o campo elétrico,  $\vec{H}$  o campo magnético,  $\vec{D}$  o deslocamento elétrico,  $\vec{J}$  a densidade de corrente e  $\vec{B}$  a indução magnética.  $\epsilon_0$ ,  $\sigma_0$  e  $\mu_0$  são os valores dos parâmetros no vazio.

Qualquer corpo material é caracterizado pelos seus parâmetros eletromagnéticos: permitividade dielétrica, a razão entre o campo elétrico externo e o deslocamento elétrico no meio (F/m); condutividade elétrica, a razão entre o campo elétrico e a densidade de corrente que se produz no meio (S/m); e permeabilidade magnética, a razão entre o campo magnético externo e a intensidade magnética do meio (H/m). Estas propriedades são as que operam na prospeção de GPR (Annan, 2001).

#### *Condição de baixas perdas*

A partir das equações de Maxwell pode ser deduzida a equação que relaciona a variação espacial do campo eletromagnético (Laplaciano) como uma combinação linear das derivadas temporais de primeira e segunda ordem,

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad 2.4$$

O primeiro termo da soma corresponde à equação de difusão e o segundo à equação de onda. Se a derivada temporal domina o segundo termo, a equação fica reduzida ao fenómeno de difusão; se pelo contrário o termo dominante for a segunda derivada temporal, então a equação de onda corresponde à variação do campo na forma ondulatória.

A importância relativa de cada termo da equação é determinada através da comparação entre a condutividade elétrica e a permitividade dielétrica:

- Quando  $\sigma \gg \omega\varepsilon$ , então  $\nabla^2 \vec{B} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ . O campo propaga-se por difusão e a condutividade é o parâmetro que determina a característica difusiva.
- Quando  $\sigma \ll \omega\varepsilon$ , então  $\nabla^2 \vec{B} = \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$ . O campo propaga-se em forma de onda eletromagnética e tornam-se válidos conceitos como a teoria *ray tracing*. A constante dielétrica é o parâmetro básico da propagação ondulatória.

Se se definir o fator de perda,  $P$ , por  $P = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$ , então:

- $P \gg 1 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}}$
- $P \ll 1 \Rightarrow v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}}$

Quando  $P$  possui valor elevado, a velocidade depende da raiz quadrada da frequência, e quando  $P$  possui valor baixo, a velocidade não depende da frequência. O ponto  $P \sim 1$  corresponde à transição e indica em que frequências predomina um fator ou outro:

$$P = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \approx 1 \Rightarrow f_{transição} = \frac{\sigma}{2\pi\varepsilon} \quad 2.5$$

Geralmente, as baixas frequências operam em regime difusivo, enquanto que as altas frequências em regime ondulatório. No entanto, a frequência de transição depende da relação entre a condutividade e a constante dielétrica, de forma que para meios resistivos esta frequência irá ser de baixo valor e daí a aproximação de altas frequências dar melhores resultados. Pelo contrário, em meios condutores, a frequência de transição será alta e quase sempre a situação de aproximação de baixas frequências é preferível.

Quando a frequência é suficientemente baixa (inferior a 10 kHz), a condutividade é muito maior que o produto da frequência angular pela constante dielétrica. Os materiais são considerados bons condutores, por isso o regime é indutivo e considera-se a equação de difusão. Na realidade, isto pode acontecer para valores altos de condutividade como para valores muito baixos de frequência. Os

métodos que trabalham com esta aproximação são conhecidos simplesmente por métodos eletromagnéticos. Destacam-se o método eletromagnético no domínio do tempo (TDEM) e no domínio da frequência (FDEM), o método de muito baixa frequência (VLF) e os métodos magnetotélúricos (MT, AMT).

No outro extremo, quando a frequência é suficientemente alta (superior a 10 MHz), a condutividade é muito pequena comparada com o produto da frequência angular e da constante dielétrica. Os materiais são considerados maus condutores e por isso o regime é ondulatório e considera-se a equação de onda. Os campos eletromagnéticos propagam-se como ondas e sofrem os mesmos processos como a reflexão e refração nas ondas sísmicas ou a luz em ótica. O principal método geofísico que opera nesse regime é o GPR (Annan, 2001).

### 2.1.2. Natureza ondulatória dos campos eletromagnéticos

A partir das equações de Maxwell e das equações constitutivas, obtém-se equação de onda escrita em função do campo elétrico  $\vec{E}$  (Equação 2.6), que tem como soluções ondas planas.

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad 2.6$$

Em condições de baixa perda, a solução da equação de onda 2.6 dada por,

$$\vec{E} = f(\beta \pm vt)e^{\mp\alpha\beta} \quad 2.7$$

Em que  $\beta$  representa a distância na direção de propagação,  $v$  a velocidade de propagação e  $\alpha$  a atenuação. Para os materiais de baixa perda e diamagnéticos, os parâmetros anteriores são dados pelas Equações 2.8, 2.9 e 2.10.

$$\beta = \vec{r} \cdot \hat{k} \quad 2.8$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad 2.9$$

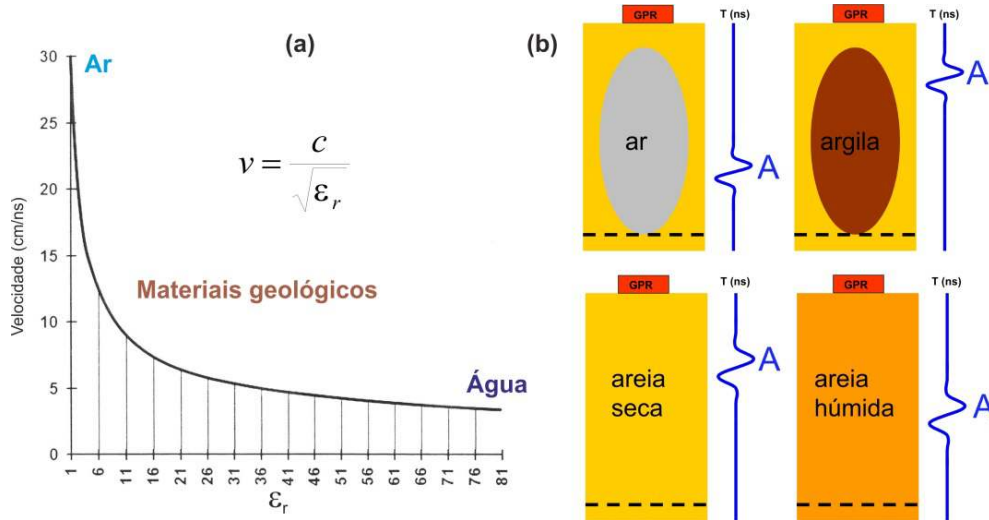
$$\alpha = \frac{1}{2} \sigma \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad 2.10$$

Em que  $\vec{r}$  é o vetor posição,  $\hat{k}$  é o versor na direção e sentido de propagação da OEM e  $c$  é a velocidade da luz no vácuo.

#### *Parâmetros das OEM num meio*

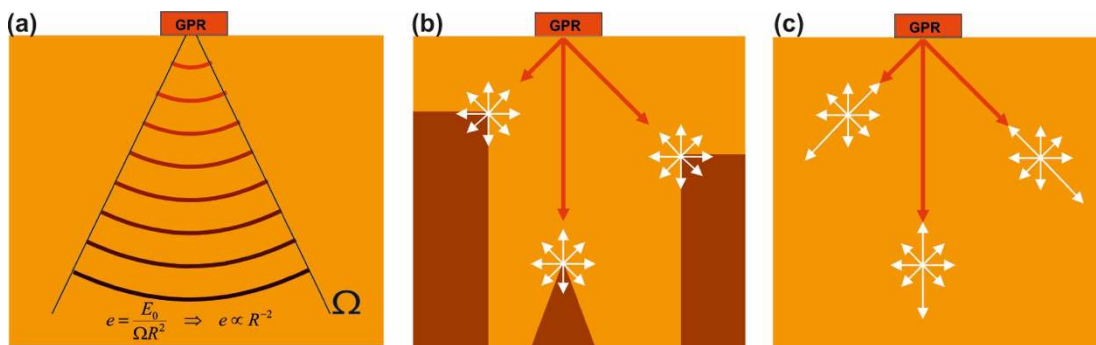
Velocidade: A Equação 2.9 descreve a dependência da velocidade de propagação da OEM com as constantes dielétricas dos materiais em relação inversa (Figura 2.2a). Isso implica variações até uma

ordem de magnitude, em que os valores extremos estão situados entre o ar e a água, o que significa que a representação gráfica da deteção de corpos (sinal A na Figura 2.2b) é distorcida pelas diferenças de tempo de viagem das OEM. Quando se propagam por meios com diferentes constantes dielétricas produzem traços diferentes.



**Figura 2.2:** (a) Relação entre a velocidade de propagação das OEM e das constantes dielétricas dos materiais terrestres. (b) Exemplos das diferenças temporais do sinal refletido (A) quando passa por distintas combinações de materiais com constantes dielétricas diferentes.

Atenuação: Por seu lado, a Equação 2.10 descreve a atenuação como o decaimento da energia das OEM em função dos parâmetros constitutivos. No entanto, há que incorporar outros tipos de atenuação da energia produzidos durante a propagação das ondas (Figura 2.3).

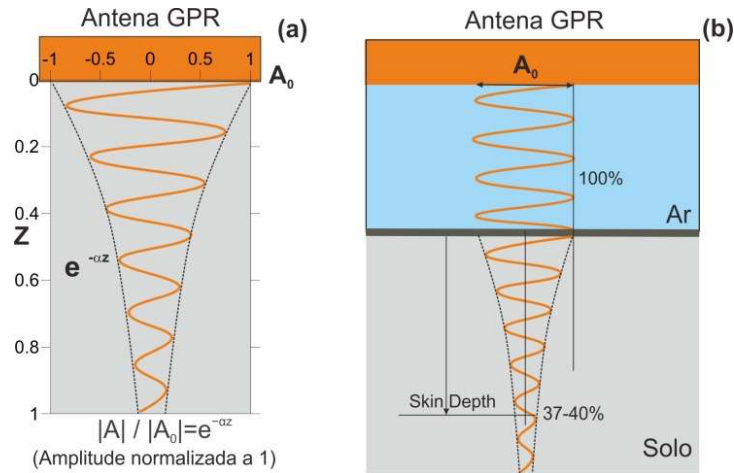


**Figura 2.3:** Alguns dos fenómenos através dos quais a energia da OEM se dissipa. (a) Pela expansão da frente de onda, onde a densidade de energia decai com a distância de propagação. (b) Por difusão, quando a onda interfere com objetos que têm um tamanho semelhante ao seu comprimento de onda; em que depois há uma emissão de radiação em todas as direções. Este efeito também diminui a energia da onda. (c) Por difração, quando uma onda interage descontinuidades repentinas, como cantos, bordos ou cavidades. Todos esses efeitos contribuem para diminuição da energia e modificação da forma da OEM incidente.

Atenuação por propagação da frente de onda: Uma primeira fonte de atenuação de uma OEM é a relação entre a diminuição da sua amplitude com a distância ( $z$ ) devido a causas geométricas da

expansão da frente de onda ao propagar-se (Figura 2.3a). Esta relação é quantificada por uma diminuição exponencial indicado pela expressão da Figura 2.4a. Se também for incorporada a contribuição devida aos parâmetros constitutivos do meio, é obtido outro fator de atenuação. Ambas as contribuições definem a profundidade limite de investigação ( $\delta$ , *skin depth*) da prospeção de GPR. Este parâmetro (profundidade limite) define-se formalmente como a distância à qual a amplitude da OEM fica reduzida a um fator de  $1/e$ , isto é, 37 % da original, o que significa uma redução de 100 vezes. Por definição, a profundidade limite  $\delta = \frac{1}{\alpha}$  resulta da Equação 2.11.

$$\delta = \begin{cases} 503 \sqrt{\frac{1}{\sigma f}} \text{ para } \sigma \gg \omega \epsilon \\ 0.0053 \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{\sigma} \text{ para } \sigma \ll \omega \epsilon \end{cases} \quad 2.11$$



**Figura 2.4:** (a) Dependência da atenuação com a distância de propagação da OEM.  $A_0$  é a amplitude inicial do sinal e  $A$  é a amplitude à distância  $Z$ . (b) A profundidade limite de investigação ( $\delta$ , *skin depth*) é estabelecida em função da atenuação das OEM ao penetrar num meio.

Difração: Quando uma OEM incide sobre descontinuidades bruscas, como esquinas e bordos, a energia é reemitida em todas as direções (Figura 2.3b). O tratamento matemático da difração (Trorey, 1977) é complexo e a sua formulação conclui que tanto as reflexões como as difrações são pacotes resultantes da energia que regressa de todas as partes de uma interface, respondendo a uma mesma equação. Deste ponto de vista, uma reflexão representa somente um tipo especial de difração (resultado prático que se utiliza no tratamento da migração, por exemplo).

Dispersão: A OEM transmitida através dos meios que compõem a subsuperfície pode encontrar heterogeneidades nas propriedades elétricas e magnéticas a várias escalas que também fazem diminuir a amplitude (Figura 2.3c). Quando estas heterogeneidades são de pequena escala ( $< \lambda/4$ ; critério de *Huygens*) são geradas respostas fracas, por vezes não detetáveis, mas que poderão gerar impacto na

propagação da OEM, uma vez que desviam pequenas partes da energia noutra direção, e à medida que a onda se propaga nestas condições, vai dispersando em todas as direções (Figura 2.3c). Este fenómeno de dispersão (*scattering*) é especialmente intenso na parte mais superficial do meio e é uma das principais fontes de ruído.

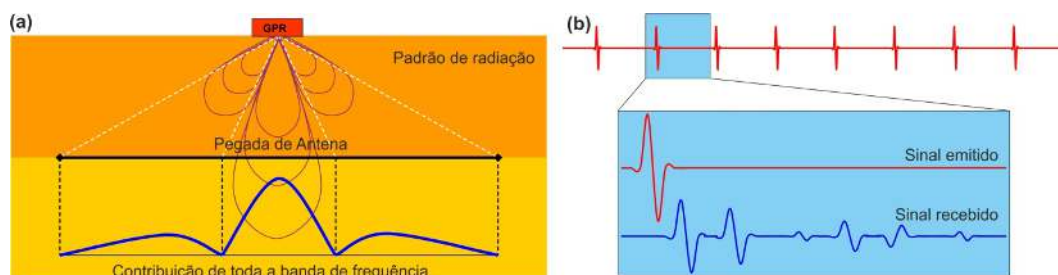
As considerações anteriores permitem concluir o seguinte:

- A profundidade limite de investigação é menor se a frequência das OEM é alta.
- A profundidade limite de investigação é maior em materiais resistivos e com permitividades dielétricas elevadas.
- Ao atingir-se o nível freático, a água começa a absorver energia, fenómeno que aumenta drasticamente com o aumento da frequência até se atingir a frequência de relaxação da água (10-20 GHz). Em materiais de baixa perda dielétrica o fenómeno começa a ser observado a partir dos 500 MHz.
- As perdas por dispersão são extremamente dependentes da frequência e tornam-se importantes nas altas frequências.
- Outro fator que afeta a amplitude do sinal é o mau acoplamento da antena com o solo.

### 2.1.3. Resolução da prospeção GPR

#### *Duração do pulso de GPR e frequência central emitida*

A energia transmitida por uma antena de GPR segue um padrão de radiação (Figura 2.5a) caracterizado por um lóbulo central que irradia na frequência de construção da antena e lóbulos laterais secundários, que contribuem para a largura de banda total das frequências emitidas ( $B$ ), e pela duração do sinal emitido, o pulso (Figura 2.5b).



**Figura 2.5:** (a) Esquematização do padrão de radiação de uma antena de GPR e da sua pegada. (b) Representação da emissão de um pulso GPR (sinal emitido) e da receção das ondas refletidas entre pulsos emitidos (sinal recebido).

Por construção instrumental, a largura de banda é inversamente proporcional à duração do pulso ( $d_p$ ) e varia com a velocidade de propagação e o inverso da resolução radial (Equação 2.12).

$$B = \frac{1}{d_p} \geq \frac{v}{4\Delta r} \quad 2.12$$

Outro fator a ter em conta é a qualidade do sinal emitido pela antena de GPR ( $R$ ) que se define como a razão entre a largura de banda e a frequência central da antena (Equação 2.13), de forma que os valores ótimos de  $R$  sejam obtidos quando se dispõe de um valor elevado de largura de banda  $B$  e baixo de frequência central  $f_c$ .

$$R = \frac{B}{f_c} \quad 2.13$$

A maioria dos equipamentos de GPR emite sinais na forma de pulsos do tipo *wavelet*,  $w$  (Daniels, 2004), em que  $R$  possui valor unitário e por isso são caracterizados, de uma forma geral, pela sua frequência central (Tabela 2.1). Por exemplo, como  $R=1$ , uma antena de 100 MHz de frequência central possui uma largura de banda de 100 MHz e os pulsos emitidos possuem duração de 10 ns o que representa um comprimento de onda de 3 m (velocidade do ar de aproximadamente 0.3 m/ns). Daqui se deduz que quanto menor for a frequência, maior será a capacidade de penetração da OEM no meio.

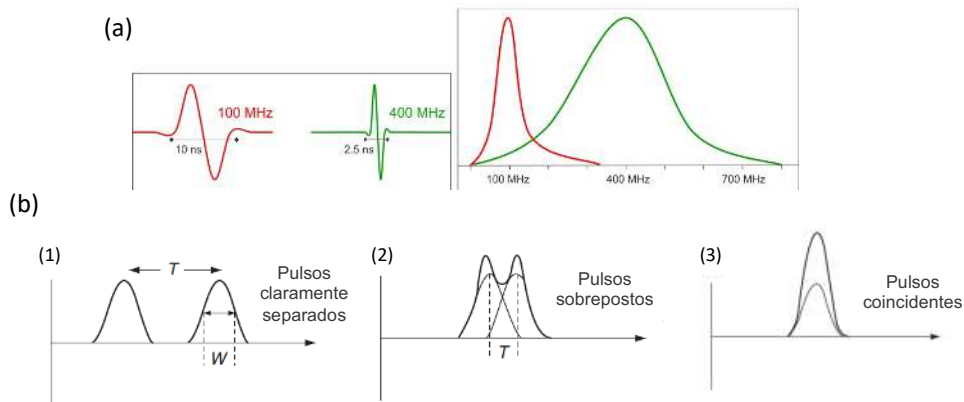
**Tabela 2.1:** Duração do pulso emitido pelas diferentes antenas de GPR e dos respectivos comprimentos de onda para cada valor de frequência central.

Frequência central da antena de GPR (MHz)	Duração do pulso (ns)	Comprimento de onda (m)
1600	0.6	0.19
900	1.1	0.33
400	2.5	0.75
200	5.0	1.50
100	10.0	3.00
80	12.0	3.75
40	25.0	7.50
20	50.0	15.00
15	60.0	20.00

### Resolução GPR

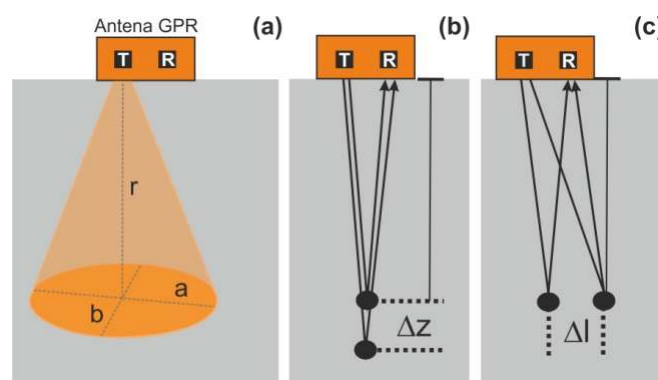
O método de GPR, como qualquer outro método de medição, está limitado na detecção de corpos e camadas geológicas. O conceito de resolução indica a distância mínima entre os refletores ou o tamanho mínimo de um corpo que pode ser distinguido a partir da interpretação de pulsos  $\mathcal{W}$  indepen-

dentos (Figura 2.6). Considerando a separação entre respostas provenientes de objetos muito próximos, a separação no tempo é proporcional à diferença das distâncias aos objetos dividida pela velocidade de propagação do meio.



**Figura 2.6:** (a) Esquema de duração de um pulso no domínio do tempo e da banda de frequências para duas antenas com frequência central de 100 MHz e 400 MHz. (b) Esquema das possíveis configurações para a chegada de dois pulsos à antena recetora: (1) pulsos claramente separados; (2) pulsos sobrepostos; (3) pulsos coincidentes.  $T$  é o período da OEM e  $W$  é a largura da onda a meia altura. Adaptado de Annan (2001).

Ao considerar o padrão de radiação de um determinado pulso, pode estabelecer-se uma estimativa da zona iluminada pela antena, que coincide com o raio da primeira zona de *Fresnel*. Numa primeira aproximação, esta possui forma elíptica (Figura 2.7a) e é designada por pegada da antena (*footprint*), cujo eixo maior possui a direção do movimento da antena e a sua dimensão é dada pelas expressões da Equação 2.14 (Conyers & Goodman, 1997). Ambas as relações colocam em evidência a dependência do seu tamanho com a frequência do sinal emitido ( $f = 1/\lambda$ ), a profundidade do refletor ( $z$ ) e as propriedades do meio ( $\epsilon$ ).



**Figura 2.7:** (a) Esquematisação da pegada de uma antena de GPR, em que  $r$  representa o raio de *Fresnel*. (b) Conceito de resolução vertical,  $\Delta z$ , e (c) de resolução lateral,  $\Delta l$ .

$$a = \frac{\lambda}{4} + \frac{z}{\sqrt{\epsilon - 1}} \quad b = \frac{a}{2} \quad r \approx \sqrt{\frac{\lambda^2}{16} + \frac{\lambda z}{2}} \quad 2.14$$



A partir da noção de pulso e de pegada GPR, surge o conceito de resolução vertical,  $\Delta z$ , e de resolução lateral,  $\Delta l$  (Figura 2.7b,c). Se se considerar um pulso pela sua largura a meia altura,  $W$ , é aceite que se distinga a chegada de dois pulsos se estes estiverem separados de pelo menos um quarto da largura a meia altura, caso contrário, deve ser considerado apenas um evento. Assim, a resolução radial,  $\Delta z$ , é dada pela Equação 2.15.

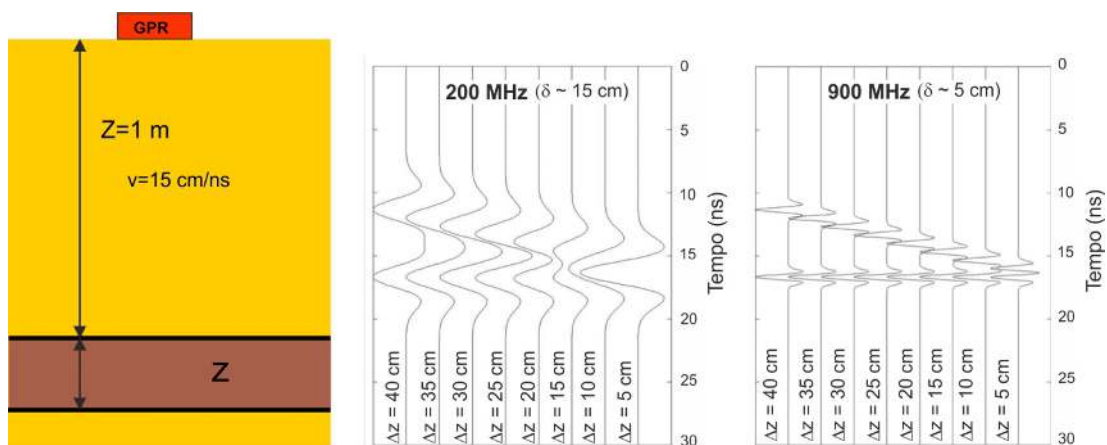
$$\Delta z = \frac{Wv}{4} \tag{2.15}$$

A largura do pulso e a velocidade no meio influenciarão o valor da resolução radial, e esta é independente da distância à fonte da OEM (caso ideal), no entanto, na prática, para distâncias grandes, verifica-se a ocorrência de dispersão e atenuação, que afetará o valor de  $\Delta r$ .

A resolução lateral,  $\Delta l$  (Equação 2.16), depende da velocidade, da largura do pulso a meia altura e da distância à fonte da OEM. Quanto maior for a distância à fonte, maior será o valor da resolução lateral.

$$\Delta l = \sqrt{\frac{vrW}{2}} \tag{2.16}$$

Os valores da Tabela 2.1, em analogia com as expressões anteriores mostram a dependência da resolução vertical com frequência do sinal emitido pelo GPR e a resolução vertical, para a mesma situação geológica. Por exemplo, se for considerada uma camada de espessura ( $\Delta z$ ) localizada a 1 m de profundidade (Figura 2.8), esta será detetável se forem vistas as duas reflexões (marcadas com setas) correspondentes ao teto e à parede da camada. Os gráficos mostram que essa detetabilidade depende da espessura ( $z$ ) e da frequência da antena usada (200 e 900 MHz).



**Figura 2.8:** A resolução vertical depende da frequência do sinal emitido pelo GPR. Nos gráficos pode observar-se que a detetabilidade depende da espessura da camada ( $\Delta z$ ) e da frequência da antena que se está a usar. Neste caso, consideraram-se antenas de frequência 200 MHz e 900 MHz. O eixo vertical corresponde ao tempo duplo de propagação, em ns.

### 2.1.4. Interações da energia do GPR numa interface

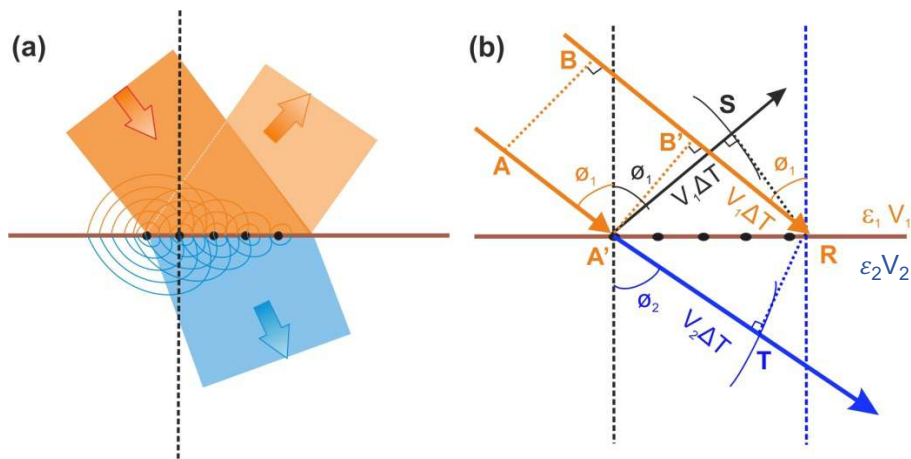
Quando um pulso GPR se propaga através de um meio heterogéneo é produzida uma série de fenómenos devido à interação da energia com a estrutura interna dos materiais. Todos estes fenómenos contribuem para a variação de energia nas superfícies de descontinuidade que originam modificações da trajetória, da frequência e da amplitude da OEM incidente, sendo produzida uma dissipação final da energia no interior da subsuperfície.

#### Reflexão e refração

Se se considerar que o pulso de GPR emitido se propaga como uma onda plana, ao incidir sobre uma superfície de descontinuidade dielétrica, de acordo com o princípio de *Huygens* (Figura 2.9), são produzidas conversões de energia que podem ser descritas pela Lei de *Snell* que estabelece as relações entre ondas incidentes e as ondas refletidas e refratadas (Equação 2.17).

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2} \quad \sqrt{\epsilon_1} \sin \theta_1 = \sqrt{\epsilon_2} \sin \theta_2 \quad 2.17$$

Se  $v_2 < v_1$ , então o ângulo de refração ( $\theta_2$ ) é menor que o ângulo de incidência ( $\theta_1$ ) e aproxima-se da normal. O valor de  $\theta_2$  a partir do qual  $\theta_1$  é igual a  $\frac{\pi}{2}$  é o ângulo crítico, o qual representa o ângulo máximo a que as ondas provenientes do meio 1 podem penetrar no meio 2.



**Figura 2.9:** (a) Esquema de dedução da Lei de *Snell* segundo a ótica paraxial. (b) Relação entre a energia transmitida e a energia refletida de acordo com o princípio de *Huygens* para uma frente de OEM.

Os coeficientes de reflexão e de transmissão de *Fresnel* (Born & Wolf, 1980; Jackson, 1962) quantificam a variação da amplitude da OEM ao longo de uma interface entre dois materiais. A relação entre a amplitude (energia) da onda incidente e da onda refletida é dada pelo coeficiente de reflexão ( $R$ ), enquanto que a fração de energia transmitida é dada pelo coeficiente de transmissão ( $T$ ), ambos dependentes da constante dielétrica relativa dos meios 1 e 2 (Equações 2.18 a 2.20).

$$R = \frac{\text{Amplitude refletida}}{\text{amplitude incidente}} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad 2.18$$

$$T = \frac{\text{Amplitude refratada}}{\text{amplitude incidente}} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad 2.19$$

$$R + T = 1 \quad 2.20$$

Em prospeção GPR aplicada à Arqueologia, já foi referido que a aquisição de dados é realizada com incidência normal, de modo que à antena recetora apenas chegam reflexões provenientes da energia que incide em ângulos inferiores ao ângulo de refração crítico e das difrações.

As considerações anteriores mostram uma série de indicações úteis para o planeamento experimental da aquisição de dados de GPR:

- Se  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$  possuem valores semelhantes, a maior parte da energia incidente é transmitida para o segundo meio e são produzidas poucas reflexões.
- Por outro lado, se uma das constantes dielétricas dos dois meios foi muito menor que a outra, a maior parte da energia incidente é refletida. Isto pode causar problemas caso se trate de uma camada superficial, em que as estruturas se encontrem por baixo dela.
- O sinal do coeficiente de reflexão determina a polaridade das ondas convertidas, de forma que uma análise da polaridade pode determinar se  $\varepsilon_1$  é maior que  $\varepsilon_2$ :
  - Se a onda refletida possui polaridade inversa, então  $R \ll 0$  e  $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ .
  - Se a onda refletida não mostra mudanças de polaridade, então  $R \gg 0$  e  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ .

### 2.1.5. Propriedades eletromagnéticas dos materiais no GPR

No caso de materiais altamente resistivos, o método é capaz de atingir profundidades de investigação maiores (Annan, 2001). Na prática, as condições de baixa perda dielétrica não são frequentes pois predominam os ambientes condutores ricos em argila ou de alta salinidade da água presente no nível freático. Nestas condições o método é muito limitado na sua penetração. Geralmente, a maioria das substâncias do planeta são compostas por vários materiais, com distintos graus de humidade e iões dissolvidos na água. Entender as propriedades físicas de cada mistura é a chave para a melhor interpretação da resposta do GPR.

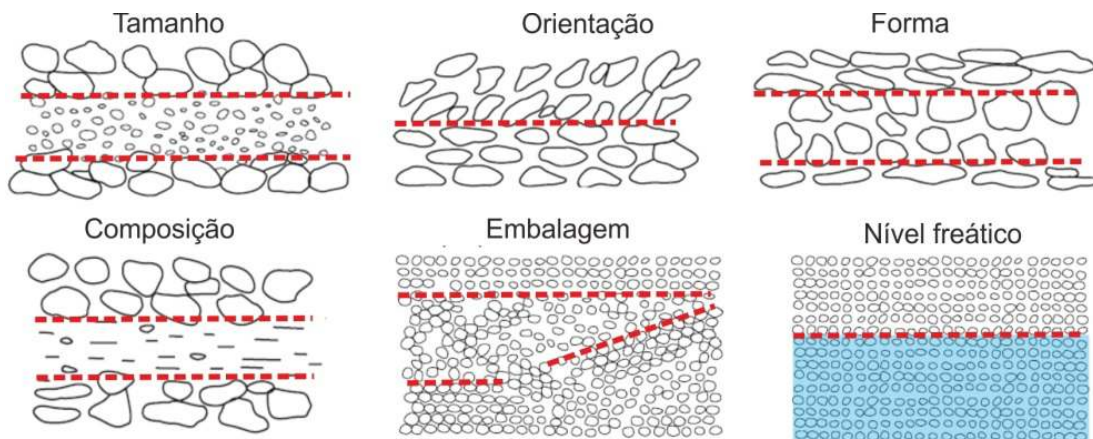
Na Tabela 2.2 são apresentados os valores dos parâmetros mais comuns em GPR, para um conjunto de materiais, muito úteis para efetuar alguns cálculos preliminares durante o planeamento da aquisição de dados.

**Tabela 2.2:** Valores típicos para tempo duplo por metro por litologia e respetiva constante dielétrica relativa e condutividade elétrica.

Material	Tempo duplo por metro para a litologia (ns/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (mS/m)
Ar	6.5	1.0	0.0
Gelo	13.0	4.0	0.01
Neve	8.0	1.5	0.01
Água	59.0	81.0	0.5
Asfalto	14.0	5.0	0.7
Cimento seco	-	15.0	5.5
Cimento húmido	23.0	12.5	2.0
Areia seca	13.0	4.0	0.01
Areia húmida	25.5	15.0	0.5
Areia saturada	33.0	25.0	1.0
Areias e gravilhas secas	15.5	5.5	1.0
Areias e gravilhas geladas	14.5	5.0	1.0
Solo limo-argila	10.5	2.5	10.0
Solo arenoso	16.0	6.0	0.14
Solo orgânico	52.5	6.4	10
Solos arenosos húmidos	32.0	23.5	6.9
<i>Permafrost</i>	16.0	6.0	1
Sedimento glacial	22.0	11.0	1.0
Turfa	51.5	61.5	10.0
Argila húmida	34.0	27.0	50.0
Argila seca	13.0	4.0	2.0
Granito seco	14.5	5.0	0.01
Granito húmido	16.5	6.5	1.0
Basalto húmido	-	19.0	8.5
Cinzas vulcânicas	23.5	13.0	1.0
Sais de potássio	15.0	5.5	0.1
Bauxite seca	33.0	25.0	2.0
Pórfiro sienítico	16.0	6.0	0.02
Travertino	18.5	8.0	0.5
Carvão	14.0	4.5	10.0
Calcário seco	15.5	5.5	0.5
Calcário húmido	18.5	8.0	2.0
Arenito molhado	16.0	6.0	25.0
Sal	16.0	6.0	0.1

Apesar da complexidade subjacente às misturas nos solos, de um modo geral, o método de GPR simplifica-se bastante em função da presença/ausência de água no meio (Figura 2.10). Para o intervalo de frequências 10-1000 MHz, a presença de água domina o comportamento da seguinte forma:

- Os materiais do tipo argamassa, compostos por misturas de agregados, são geralmente bons dielétricos, possuindo valores típicos de constante dielétrica entre 3 e 8, que variam com a mineralogia e o grau de compactação.
- Os solos, rochas e materiais de construção possuem espaços vazios entre os grãos que os constituem (poros), que podem ser preenchidos por ar, água ou outros materiais.
- A água é o material mais polarizável, possuindo valores de constante dielétrica de aproximadamente 81.
- Quando presente em poros de materiais do tipo argamassa, a água geralmente contém iões que aumentam drasticamente a condutividade elétrica dos solos e rochas para valores entre 1 e 1000 mS/m, assumindo o fator dominante nesses materiais.
- Estando presente nos poros da maioria dos materiais geológicos, a água provoca um efeito dominante nas suas propriedades elétricas.

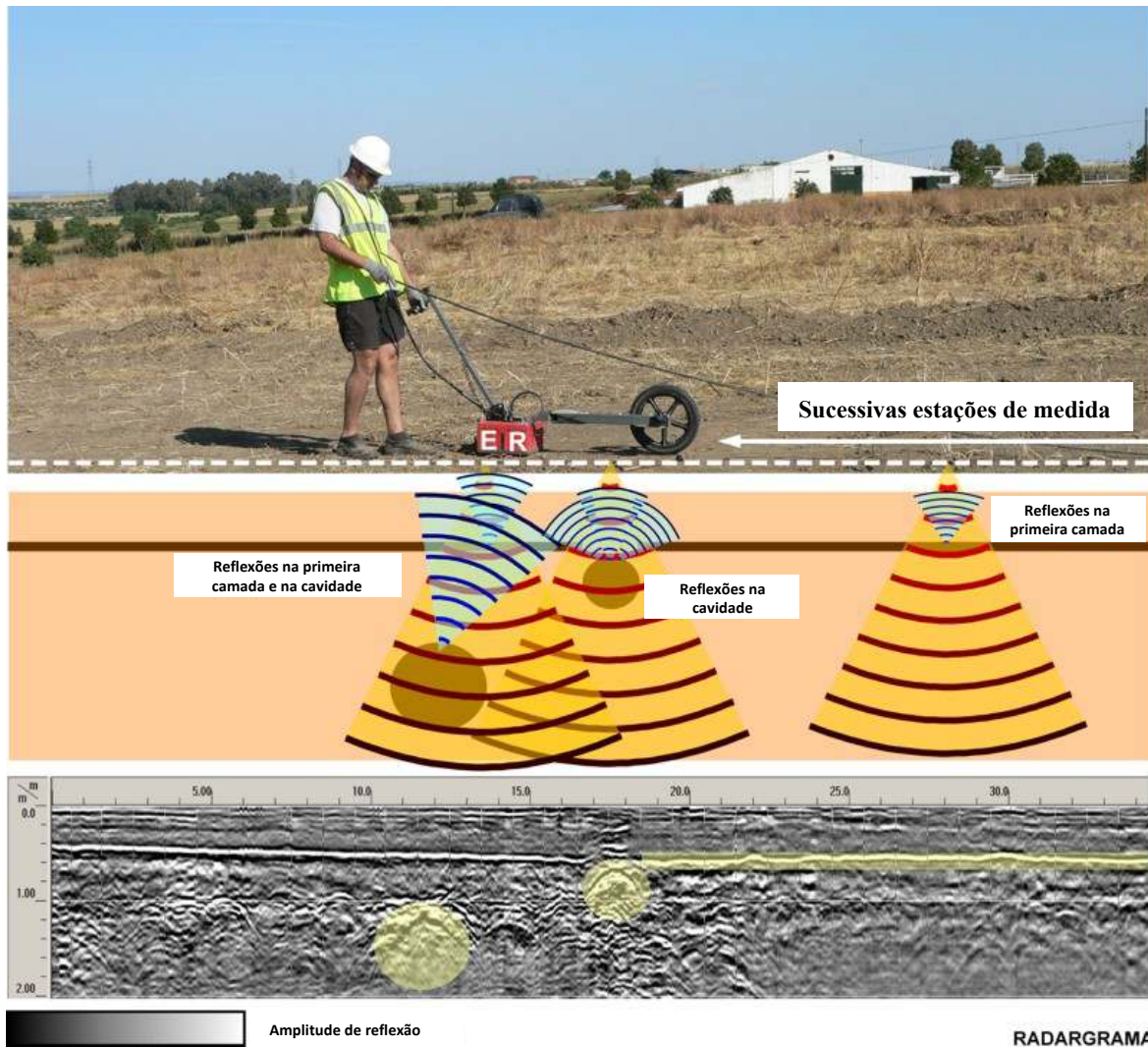


**Figura 2.10:** Resumo das descontinuidades eletromagnéticas dos materiais. Estas podem estar relacionadas com modificações no tamanho, orientação e forma dos grãos e com modificações da composição do meio e o preenchimento dos poros (efeito da água e de sais dissolvidos).

### 2.1.6. Características da aquisição de dados de GPR

A aquisição de dados GPR em Arqueologia é realizada com o dispositivo experimental de reflexão com deslocamento comum (*Common-offset reflection*) que usa um transmissor e recetor separados por uma distância fixa. Consiste basicamente numa antena emissora (E, Figura 2.11) que emite uma onda eletromagnética em direção à subsuperfície e numa antena recetora (R) que regista a onda que regressa à superfície e os respetivos tempos de chegada.

Atualmente já são usados conjuntos de antenas (*arrays*) que permitem a aquisição de dados usando várias antenas ao mesmo tempo, da mesma frequência, aumentando a rapidez na aquisição de dados, ou de frequência diferente, de modo a conseguir dados com diferentes profundidades de investigação.



**Figura 2.11:** Esquema de aquisição do GPR no modo de reflexão com deslocamento comum. A antena formada por um transmissor (E) e um recetor (R) desloca-se sobre o terreno efetuando disparos a distâncias predefinidas (imagem superior). Cada disparo gera um pulso OEM que se transmite para a subsuperfície. Ao encontrar corpos com propriedades EM distintas, estas ondas são refletidas, difratadas e/ou refratadas (imagem intermédia), cuja impressão no radargrama se designam por anomalias (imagem inferior). Neste exemplo, a reflexão linear mais superficial corresponde a uma primeira camada do terreno, enquanto que as reflexões em forma de hipérbole correspondem a cavidades de tamanhos distintos.

### *Estabelecimento dos parâmetros para a aquisição de dados de GPR*

**Amostragem:** Considerando um ponto no espaço onde são recebidos os pulsos refletidos, as amplitudes detetadas pela antena recetora são registadas em função do tempo, formando um traço que se encontra amostrado com um intervalo de tempo constante ( $\Delta t$ ). Da mesma forma, a sucessão de pontos no espaço, ao longo de um perfil, também possui separação constante ( $\Delta x$ ). Estas duas variáveis representam o intervalo de tempo mínimo para o tempo (intervalo vertical,  $\Delta t$ ) e para o espaço (intervalo horizontal,  $\Delta x$ ) e são regulados pelo Teorema de Amostragem de *Nyquist* (Equação 2.21).

$$\begin{cases} \Delta t \leq \frac{1}{2f_c} \\ \Delta x \leq \frac{v}{2f_c} \end{cases} \quad 2.21$$

No caso do GPR (sinais transientes com frequências limitadas por um intervalo em torno de um valor central), as taxas de amostragem mais adequadas para o tempo e espaço são menores (Equação 2.22).

$$\begin{cases} \Delta t \leq \frac{1}{6f_c} \\ \Delta x \leq \frac{v}{6f_c} \end{cases} \quad 2.22$$

As expressões anteriores estabelecem os limites superiores a que se deve amostrar os traços de GPR para que não se produza subamostragem. Na Tabela 2.3 estão apresentados os limites de subamostragem  $\Delta t$  e  $\Delta x$  em função dos valores de frequência central das antenas mais comuns, considerando a velocidade de propagação da OEM no ar ( $v = 0.3$  m/ns).

**Tabela 2.3:** Limites de subamostragem de  $\Delta t$  e  $\Delta x$  em função de valores de frequência central das antenas mais comuns, considerando a velocidade de propagação da OEM no ar ( $v = 0.3$  m/ns).

Frequência central da antena de GPR (MHz)	Limite de $\Delta t$ (ns)	Limite de $\Delta x$ (m)
1600	0.10	0.03
900	0.19	0.06
400	0.42	0.13
200	0.83	0.25
100	1.67	0.50
80	2.08	0.63
40	4.17	1.25
20	8.33	2.50
15	11.11	3.33

Filtro passa-banda: Os filtros passa-baixo e passa-alto que se aplicam durante a aquisição também dependem da frequência central da antena e são determinados pelas Equações 2.23 e 2.24 (GSSI, Inc).

$$\text{Filtro passa-baixo} = \frac{\text{Frequência central}}{2} \quad 2.23$$

$$\text{Filtro passa-alto} = \frac{\text{Frequência central}}{6} \quad 2.24$$

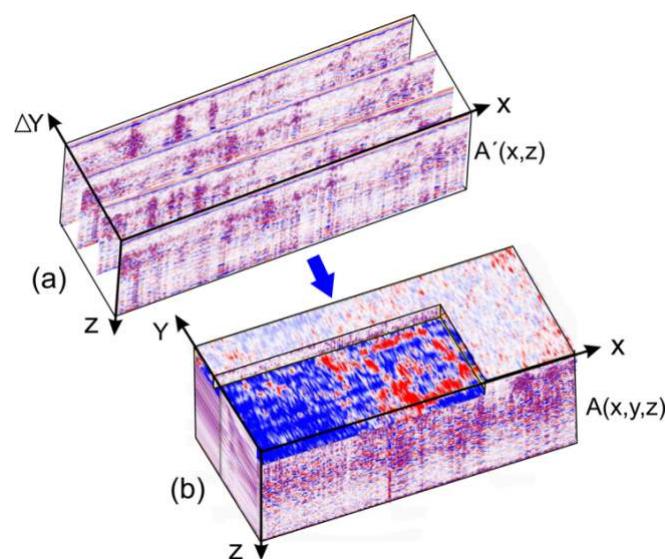
Na Tabela 2.4 estão apresentados os valores aconselháveis para os filtros passa-banda em função do valor de frequência central das antenas mais usadas.

**Tabela 2.4:** Valores dos filtros passa-banda para as antenas de GPR mais comuns.

Frequência central da antena de GPR (MHz)	Filtro passa-alto (MHz)	Filtro passa-baixo (MHz)
1600	267	3200
900	150	1800
400	67	800
200	33	400
100	17	200
80	13	160
40	7	80
20	3	40
15	3	30

### 2.1.7. Processamento básico de dados de GPR-2D e 3D

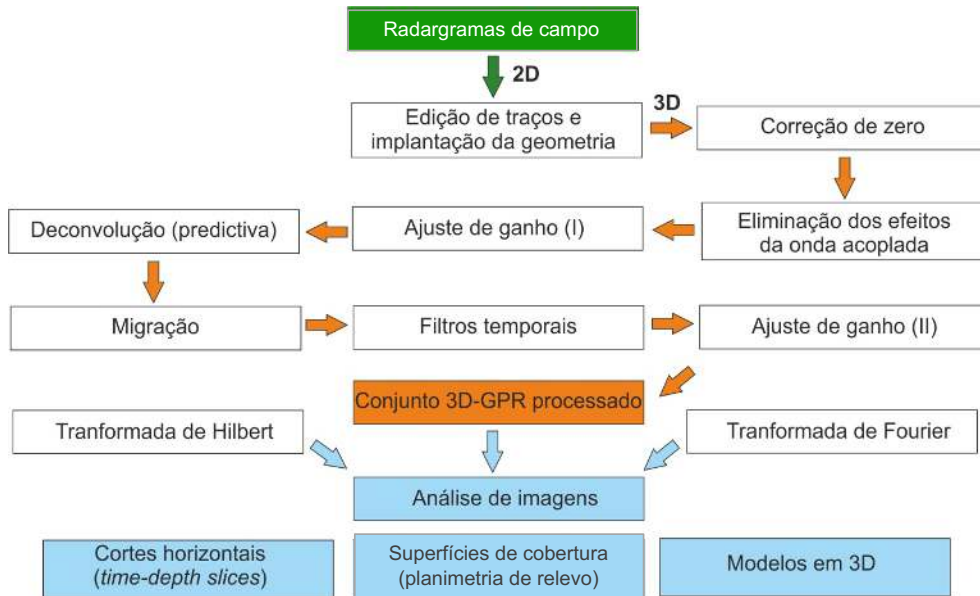
A configuração mais usual em Arqueologia, para adquirir dados de GPR, é o varrimento da zona de estudo através de perfis paralelos equidistanciados. Em termos práticos, cada um destes perfis é representado por um radargrama (Figura 2.12), que representa uma secção 2D do subsolo com as reflexões da OEM. A união de todos os radargramas obtidos permite construir um volume de dados (GPR-3D), que, convenientemente processado, permite a análise da continuidade das estruturas enterradas na zona de estudo. À parte do objetivo de detetar a presença de estruturas, os dados também contêm informação sobre algumas propriedades físicas conexas aos materiais que compõem a sub-superfície, como a velocidade, atenuação, impedância e humidade.



**Figura 2.12:** (a) Esquema de montagem dos perfis paralelos para construir o modelo de GPR-3D (b) que permite conhecer a morfologia das estruturas enterradas.

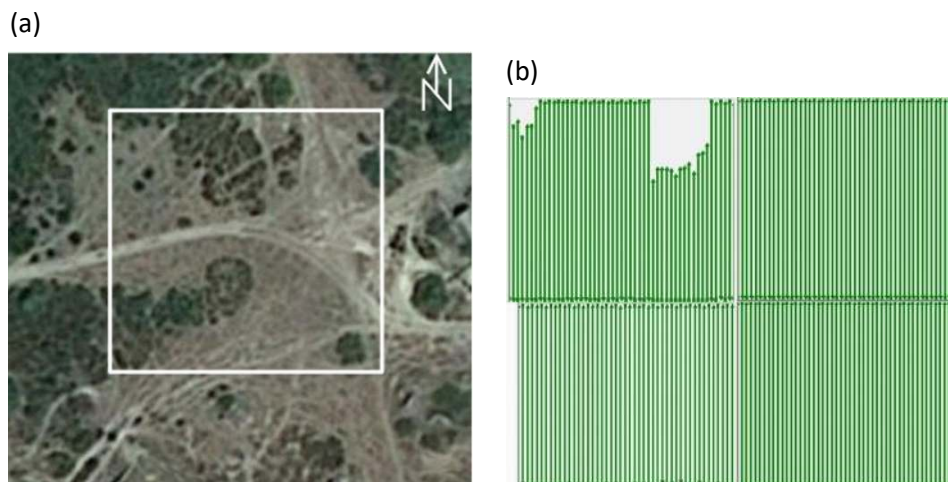


A escolha adequada dos algoritmos necessários para evidenciar o sinal refletido e eliminar o ruído adicional dos radargramas ou para aumentar o fluxo de dados do processo, é um assunto crucial para se obter modelos de GPR-3D de qualidade. A Figura 2.13 mostra a sequência de etapas que geralmente são seguidas durante o processamento padrão de dados de GPR.



**Figura 2.13:** Principais etapas do processamento padrão de dados de GPR e da representação de resultados.

De seguida é apresentado um exemplo de processamento padrão de dados de GPR realizado com o programa comercial RADAN 7 (GSSI, Inc.). A zona de estudo possui forma quadrada com 50 m de lado (Figura 2.14a) localizada num setor do Sítio Arqueológico de Útica (Tunes, Tunísia) que aloja vestígios Fenícios-Púnicos e Romanos (Peña & Teixidó, 2011; López-Castro et al., 2015). Os dados de GPR foram adquiridos com uma antena de 400 MHz, na forma de perfis paralelos separados de 0.5 m (Figura 2.14b).



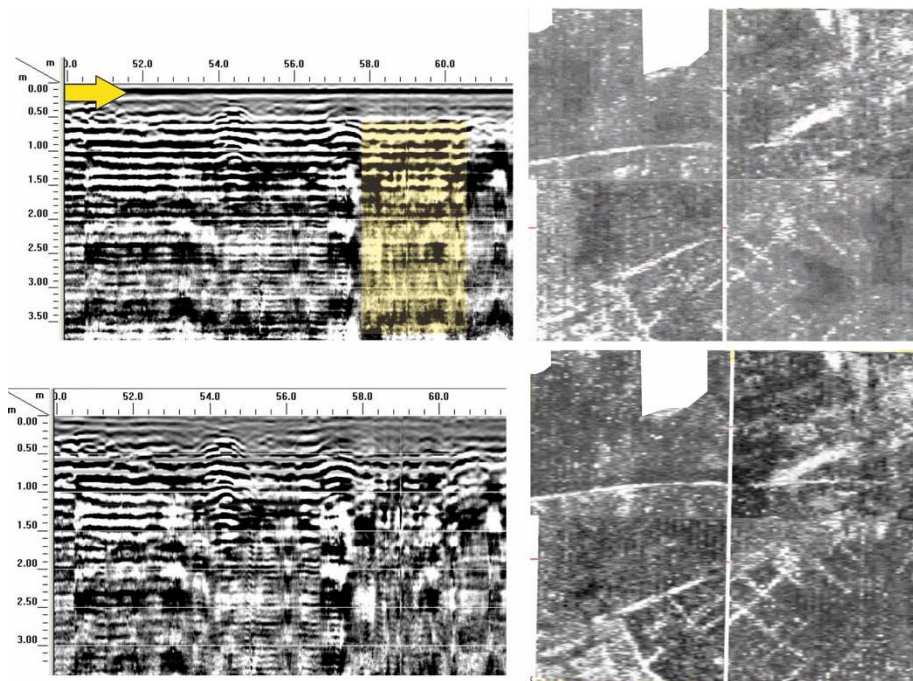
**Figura 2.14:** (a) Vista geral da zona de estudo (forma quadrada com 50 m de lado). (b) Esquema de aquisição dos dados (perfis paralelos em modo zig-zag).

### Edição de traços e implantação da geometria

Este passo é considerado uma etapa de pré-processamento e consiste na arrumação dos dados brutos sobre uma grelha, tendo em conta as informações registadas durante a etapa de aquisição. As correções aplicadas geralmente consistem no alinhamento dos perfis, uma vez que quando estes são adquiridos, em linhas paralelas, por vezes não começam e acabam nos locais previstos devido, por exemplo, à existência de obstáculos como rochas, covas ou muros. O modelo de GPR-3D é criado através da combinação de vários perfis paralelos (Figura 2.12).

### Correção da posição zero e eliminação dos efeitos da onda acoplada

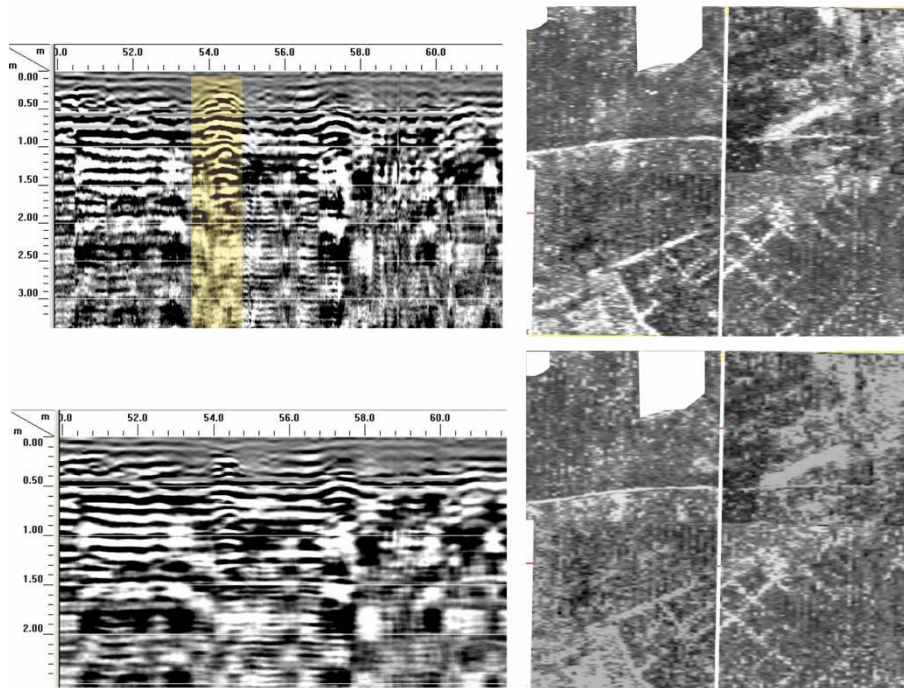
A primeira reflexão de um traço é caracterizada por uma grande amplitude (marcada com uma seta na Figura 2.15) que corresponde a um grande contraste dielétrico produzido no contacto ar-superfície do solo. A correção de tempo zero consiste em eliminar esta amplitude e deslocar temporalmente todo o radargrama, de modo a que o instante zero corresponda ao nível do solo. Esta primeira onda refletida é designada por onda acoplada e devido à forte impedância entre os dois meios, é frequente a produção de reflexões múltiplas (ecos) que se sobrepõem ao sinal de interesse, conferindo ao radargrama um aspeto bandado. Este efeitos de bandado podem ser reduzidos através da aplicação de um filtro passa-alto horizontal ao longo do perfil (Nobes, 1999). Na Figura 2.15 (retângulo amarelo) está exemplificado o efeito da sua aplicação, tanto no radargrama como no corte horizontal extraído do modelo 3D.



**Figura 2.15:** Esquerda: Comparação entre um radargrama com ruído devido à onda acoplada e o mesmo depois de eliminado esse ruído de fundo. Direita: Comparação entre as respetivas imagens extraídas do modelo de GPR-3D, corte horizontal (*depth slice*) a  $z=30\text{cm}$ .

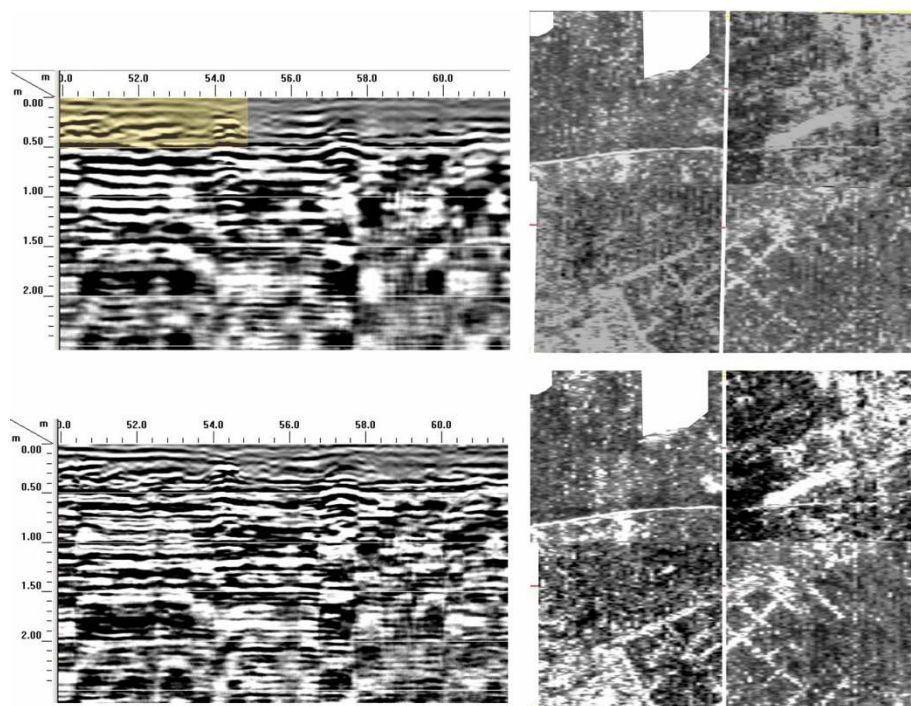
### Migração e Desconvolução

A migração (Figura 2.16) é uma operação espacial para remover o efeito de direcionalidade da fonte e do recetor da reflexão (Fisher et al., 1992). O objetivo é a correção da geometria dos refletores provocados pelo facto da pegada de iluminação da antena de GPR, que ao incidir sobre corpos com morfologias curvas (como tubos e cavidades) produzem refletores hiperbólicos. A migração permite colapsar essas hipérbolas e colocar a forma do corpo na sua posição original (Jol, 2009).



**Figura 2.16:** Comparação com a figura anterior. Neste caso são comparados os dados antes e depois de aplicar a migração de *Kirchhoff*. Nos cortes horizontais pode observar-se uma diminuição do contraste e da nitidez. Apesar da aparente perda de informação, esta operação é muito útil quando é combinada com as operações subsequentes.

Outra operação que se aplica nesta etapa do processamento é a desconvolução preditiva que atenua as bandas sub-horizontais múltiplas que ocorrem devido à presença de reflexões múltiplas num perfil, melhorando a identificação de eventos e a sua resolução (Figura 2.17). Também é aplicada para maximizar a largura de banda e reduzir a dispersão do pulso, e assim maximizar a resolução (Jol, 2009). A sua aplicação consiste numa operação de filtro temporal inverso, que melhora a resolução dos dados através da compressão da onda emitida pelo GPR (*wavelet*) numa forma distinta e limitada (Yilmaz, 2001), ou seja, a operação remove o efeito da fonte de emissão dos pulsos dos dados adquiridos, permanecendo apenas a resposta da subsuperfície (Neves et al., 1996). Neste trabalho foi estudada e proposta uma forma personalizada de aplicar a operação de desconvolução aos dados de GPR, usando algoritmos para obtenção de funções recetoras em Sismologia (abordagem explicada no Capítulo 3).



**Figura 2.17:** Comparação com a figura anterior. Neste caso é comparado o efeito da aplicação de uma desconvolução. É observado um novo aumento do contraste tanto no radargrama (faixa amarela) como no corte horizontal, permitindo que se detetem estruturas com maior nitidez.

### *Ajuste de ganho*

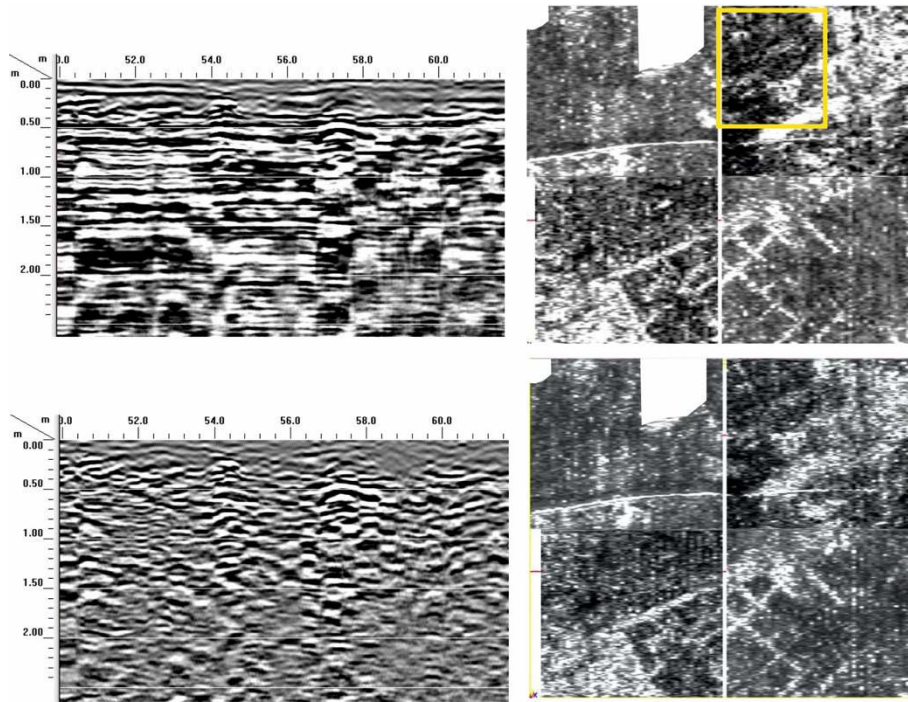
A operação de ajuste de ganho é necessária sempre que o sinal fique com os seus valores de amplitude muito baixos. A operação consiste na amplificação das amplitudes do perfil, podendo ser aplicado um ganho automático, exponencial ou linear.

### *Filtros temporais*

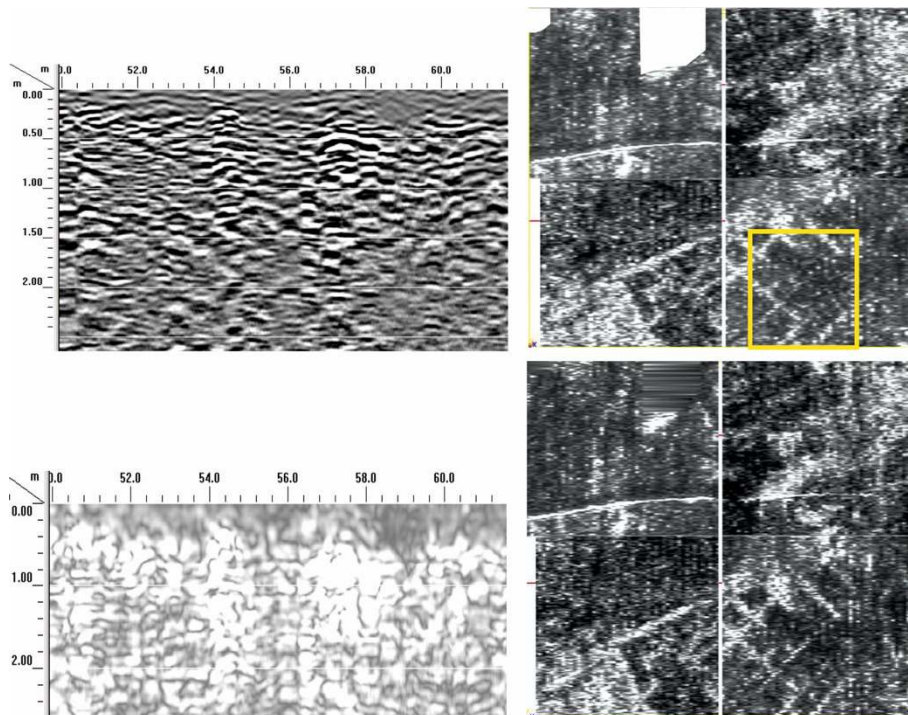
Os filtros temporais, passa-alto, passa-baixo, passa-banda, ou de corte (Jol, 2009) são aplicados individualmente a cada traço para eliminar as frequências que se sobrepõem ao sinal refletido de interesse. Na Figura 2.18, o radargrama inferior mostra o efeito da aplicação de um filtro passa-banda entre 250 e 550 MHz, cujo efeito no conjunto de dados 3D pode ser observado no corte horizontal.

### *Transformada de Hilbert*

A transformada de *Hilbert* (Figura 2.19) é uma ferramenta que atua sobre o sinal calculando a envolvente do mesmo (Berkhout, 2008; Daniels, 2004), de modo a que o radargrama adquira um aspeto mais compactado, o que melhora a perçetibilidade sobre as estruturas quando é integrada no volume de dados.



**Figura 2.18:** Comparação com a figura anterior. Neste caso é comparado o efeito da aplicação do filtro temporal. É observada uma melhoria no corte horizontal (setor marcado a amarelo).



**Figura 2.19:** Comparação com a figura anterior. Neste caso, a aplicação da transformada de *Hilbert* produz uma melhoria nos resultados quando se observa o corte horizontal, em que as estruturas enterradas ficam com mais definição (setor marcado a amarelo).

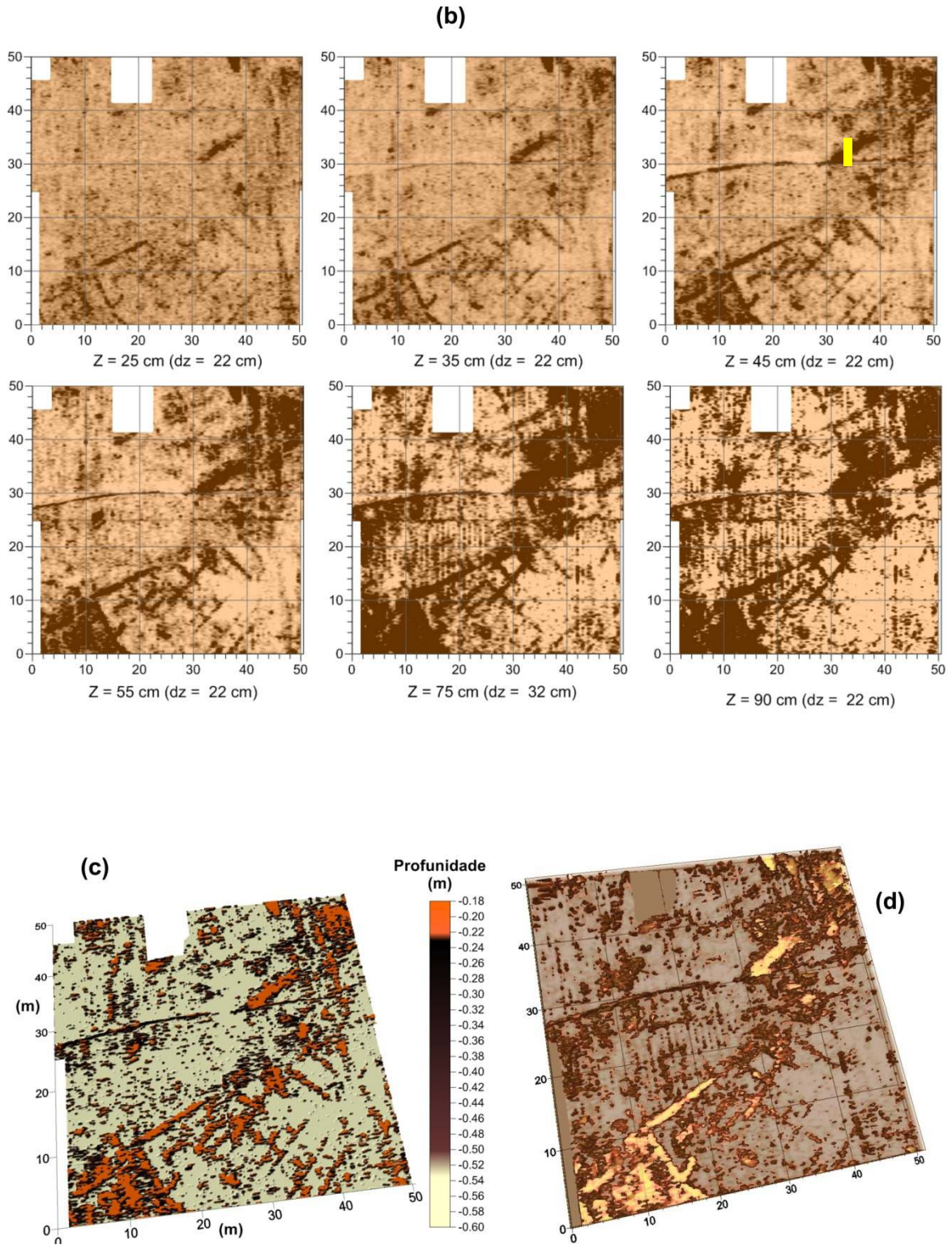
### 2.1.8. Visualização e interpretação

Uma vez obtido o conjunto de dados de GPR-3D processado devem ser analisadas as saídas gráficas que permitem a interpretação das estruturas. Também é necessário integrar os resultados em ambiente SIG, para cruzamento com outros tipos de informação geoarqueológica. Na Figura 2.20 foram incorporadas as formas mais habituais de representação dos modelos de GPR-3D:

- Perfis isolados (Figura 2.20a) que facilitam a interpretação das estruturas.
- Cortes horizontais (Figura 2.20b) a distintas profundidades ou tempos (*depth-slices* ou *time-slices*).
- Superfícies de cobertura (*cover surface*, Peña & Teixidó, 2013), em que se representam as anomalias mais próximas da superfície. Trata-se de uma representação similar à que se obteria caso se realizasse uma escavação em níveis naturais (Figura 2.20c).
- Visualização a três dimensões (Figura 2.20d), sendo por isso necessário exportar o conjunto de dados para programas de visualização 3D.

(a) Cisterna perto da zona de estudo





**Figura 2.20:** Diversas possibilidades de representação dos resultados de GPR-3D. (a) Vista geral da cisterna e perfil individual adquirido sobre esta (a marca amarela sobre o corte horizontal a 45 cm de profundidade indica a localização do perfil no conjunto 3D). (b) Sucessão de cortes horizontais com espessura vertical de 22 cm. (c) Superfície de cobertura que compreende os materiais entre 18 e 80 cm de profundidade. (d) Representação 3D das reflexões mais importantes entre 0 e 1.6 m de profundidade.

## 2.2. MÉTODO MAGNÉTICO

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 e estruturas que tenham sofrido aquecimento.

Deste modo, o método magnético possui um vasto campo de aplicação, desde uma escala pequena, como em Arqueologia e Engenharia, para a deteção de estruturas enterradas, por exemplo, vestígios de muros em ambiente Romano, a uma escala maior, como em Geologia, para investigar estruturas geológicas de carácter 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.

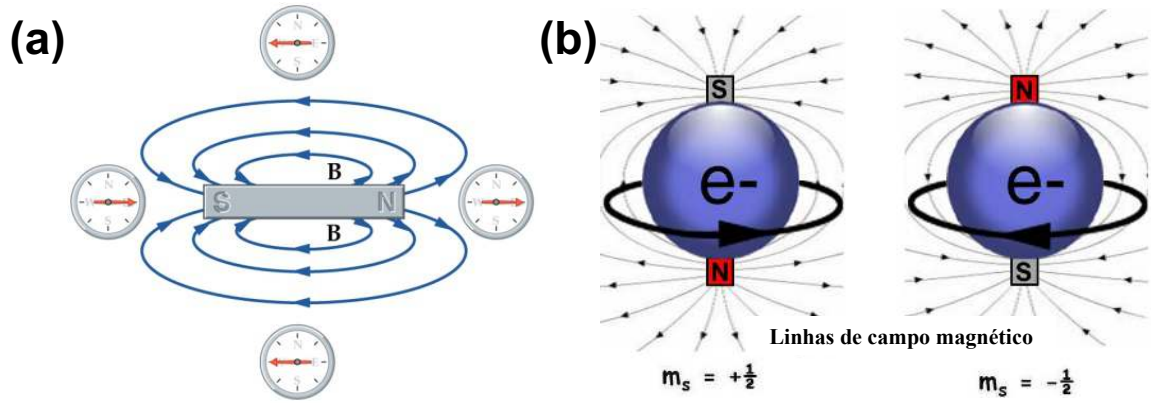
Toda a temática em torno da magnetometria será de seguida descrita de forma resumida e focada na prospeção magnética aplicada à Arqueologia.

### 2.2.1. Conceitos básicos do formalismo do método magnético

Os conceitos em torno da temática do magnetismo (Kearey et al., 2002) podem ser explicados considerando o seguinte raciocínio: nas proximidades de uma barra magnética é desenvolvido um fluxo magnético que flui de uma extremidade da barra para a outra (Figura 2.21a). Este fluxo pode ser mapeado a partir de medições da direção da agulha de uma bússola colocada nas proximidades da barra. Os pontos das suas extremidades, onde as linhas de fluxo convergem, designam-se por polos magnéticos. Se a barra magnética for suspensa de modo que o seu movimento em torno do ponto de apoio seja livre, esta mudará a sua orientação de modo a ficar alinhada com o campo magnético terrestre. O polo da barra que tende a apontar na direção do polo norte da Terra é designado por polo positivo (sul da barra), e este é balanceado por um polo negativo (norte da barra) de intensidade idêntica, na extremidade oposta da barra, a apontar para o polo sul do planeta.

Uma teoria magnética mais rigorosa baseia-se no facto de o campo magnético possuir origem elétrica, em que a conceito básico é o dipolo, que é criado por uma corrente elétrica circular (Figura 2.21b).





**Figura 2.21:** (a) Esquema de fluxo do campo magnético entre dois polos de uma barra magnética. (b) Esquema de um dipolo magnético.

Na teoria clássica, o conceito de força magnética  $\vec{F}$  é dado pela Lei de Coulomb (Equação 2.25).

$$\vec{F} = \frac{p_1 p_2}{\mu r^2} \hat{r}_1 \quad 2.25$$

Em que  $\vec{F}$  é a força exercida em  $p_2$ , os polos de intensidade  $p_1$  e  $p_2$  distanciados de uma distância  $r$ ,  $\mu$  é a permeabilidade magnética (propriedade do meio) e  $\hat{r}_1$  é o versor direcionado de  $p_1$  para  $p_2$ .

Em semelhança com o caso elétrico, a força magnetostática é atrativa para polos de sinal oposto e repulsiva para polos de sinal igual. Por convenção, o sinal de um polo positivo é atrativo na direção do polo norte magnético do planeta.

O campo magnético  $\vec{H}$  é definido pela força magnética por polo unitário (Equação 2.26).

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{p_2} = \frac{p_1}{\mu r^2} \hat{r}_1 \quad 2.26$$

Um dipolo magnético é definido por dois polos de intensidades  $+p$  e  $-p$ , separados de uma distância  $2l$ . Assim, o momento do dipolo magnético,  $\vec{m}$  é definido pela Equação 2.27.

$$\vec{m} = 2lp \hat{r}_1 \quad 2.27$$

Numa formulação mais rigorosa, o campo magnético  $\vec{H}$  resulta de um fluxo de corrente elétrica e pode ser expresso através da Lei de Ampère como o campo de forças magnéticas, criado por uma corrente elétrica  $I$  que circula num condutor de comprimento  $\Delta l$ , num ponto  $P$  à distância  $r$  do condutor (Equação 2.28).

$$\vec{H} = \frac{\vec{I} \Delta l}{4\pi r^2} \times \hat{r}_1 \quad 2.28$$

A corrente que flui numa espira circular atua como um dipolo magnético localizado no centro da espira, orientado na direção e sentido dados pela Regra de *Fleming* (vulgarmente referida como regra da mão direita).

Um corpo magnetizável colocado sob a influência de um campo magnético externo torna-se magnetizado por indução. A magnetização é devida à reorientação dos *spins* dos elétrons livres dos elementos que compõem esse corpo, que por possuírem movimentos orbitais em torno dos núcleos, constituem correntes circulares, provocando momento magnético (Figura 2.21b).

A magnetização é medida pelo parâmetro polarização magnética  $\vec{M}$  (designado também por intensidade da magnetização ou momento do dipolo por unidade de volume). O alinhamento dos dipolos internos produz um campo  $\vec{M}$ , que no interior do corpo é adicionado ao campo magnético  $\vec{H}$ .

Para campos magnéticos de baixa intensidade,  $\vec{M}$  é proporcional a  $\vec{H}$ , com a mesma direção deste, e  $k$ , a suscetibilidade magnética, parâmetro adimensional que constitui a constante de proporcionalidade (Equação 2.29).

$$\vec{M} = k\vec{H} \quad 2.29$$

A suscetibilidade magnética é o parâmetro que se pretende caracterizar em prospeção magnética. A resposta magnética das rochas e minerais, medida pelos sensores, é determinada pelo valor deste parâmetro.

A indução magnética  $\vec{B}$  é o campo magnético total, incluindo o efeito da magnetização (Equação 2.30).

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(1 + k)\vec{H} = \mu_r\mu_0\vec{H} \quad 2.30$$

Em que  $\mu_0$  e  $\mu_r$  são constantes, que correspondem respetivamente à permeabilidade magnética no vácuo e permeabilidade magnética relativa do meio.

### 2.2.2. Magnetismo no planeta Terra

O campo magnético da Terra, medido à sua superfície, é resultante da soma vetorial de três campos magnéticos (Telford et al., 1990):

- Campo magnético terrestre interno, o dominante, que varia lentamente e tem origem em fenómenos no interior do planeta.
- Campo magnético externo, de menor amplitude comparado com o campo magnético interno, que varia rapidamente e é originado por fenómenos que ocorrem acima da superfície do planeta.

- Anomalias magnéticas locais produzidas por propriedades dos materiais contidos na subsuperfície, de amplitude baixa por comparação com o campo interno, relativamente constante no tempo e no espaço e que constitui o alvo da prospeção magnética.

### *Campo magnético terrestre interno*

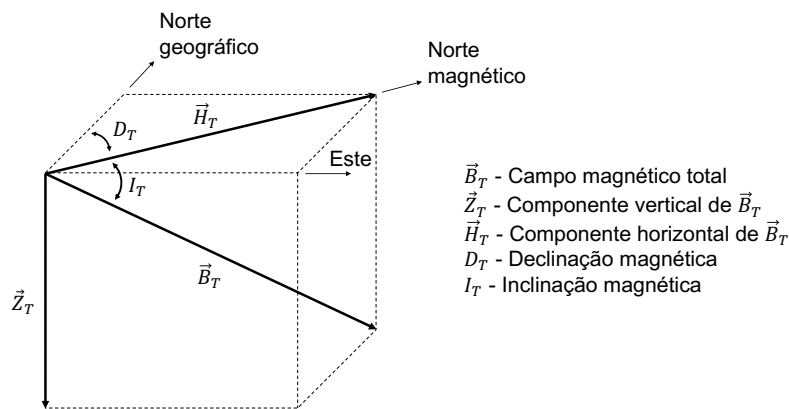
O campo magnético terrestre interno,  $\vec{B}_T$ , é gerado no interior do planeta devido a correntes de convecção do material condutor no núcleo externo que se encontra no estado líquido. Este encontra-se em movimento em torno do núcleo interno, composto por ferro e níquel, e que funciona como um dínamo auto-excitante.

Em termos de intensidade, varia entre os 60000 nT no polo norte e 70000 nT no polo sul, podendo mesmo atingir valores mínimos de cerca de 25000 nT a sul do Brasil, e valores máximos na ordem dos 300000 nT em, sítios com maior magnetismo conferido por materiais presentes junto da superfície. Existe um equador magnético, de valor nulo, a cerca de 15° do equador do planeta. O valor do campo magnético terrestre é variável, com uma periodicidade da ordem de grandeza secular. Esta variação é devida a modificações nas correntes de convecção do núcleo, podendo até sofrer inversão da sua polarização (facto que se encontra registado em formações rochosas, revelado por estudos de paleomagnetismo). O IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) tem estabelecido um modelo do campo magnético interno que proporciona um valor de  $\vec{B}_T$  para qualquer ponto do planeta.

O campo magnético terrestre é uma grandeza vetorial, de amplitude  $|\vec{B}_T|$ , que costuma ser caracterizada através de duas componentes vetoriais e dois parâmetros angulares. As componentes vetoriais (Figura 2.22) são a componente vertical do campo magnético  $\vec{Z}_T$  (cujo sentido positivo está convencionalizado ser para baixo no eixo vertical) e a componente horizontal do campo magnético  $\vec{H}_T$  (cujo sentido positivo está convencionalizado para norte e este); os parâmetros angulares são a inclinação magnética  $I_T$ , que define o ângulo vertical de  $\vec{B}_T$  a partir da direção horizontal, e a declinação magnética  $D_T$ , que define o ângulo entre  $\vec{H}_T$  e a direção do polo norte geográfico.

### *Campo magnético terrestre externo*

O campo magnético terrestre externo possui menor amplitude que o campo magnético interno, sendo associado a correntes elétricas dos níveis ionizados da alta atmosfera. Os valores de amplitude desta componente do campo magnético variam muito rapidamente devido a variações solares diurnas. Estas variações de amplitude, até cerca de  $\pm 30$  nT, são influenciadas pela latitude e a época do ano. Existem também variações lunares, com amplitudes até cerca de  $\pm 2$  nT, influenciadas pelas fases da lua. Por fim existem as variações provocadas por tempestades magnéticas, com amplitudes que podem atingir  $\pm 1000$  nT, relacionadas com a atividade solar.

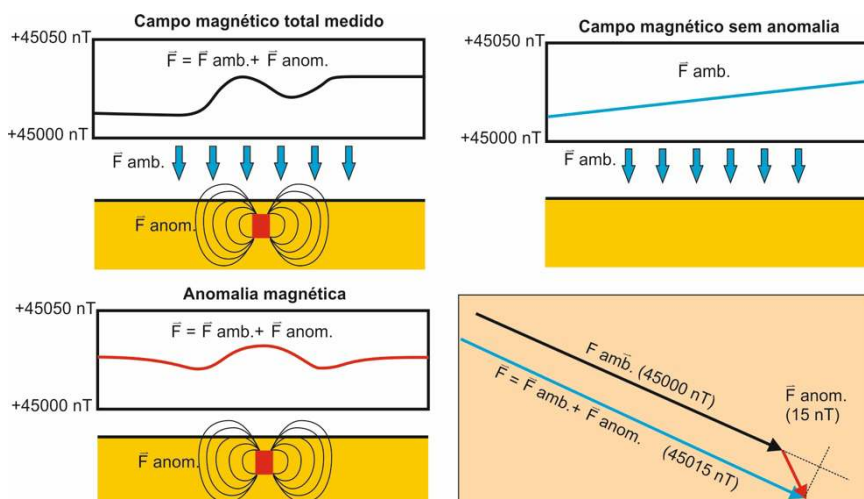


**Figura 2.22:** Componentes do campo magnético terrestre ( $H_T$  e  $Z_T$ ) e parâmetros angulares que definem a sua direção e sentido ( $D_T$  e  $I_T$ ). Adaptado de Kearey et al. (2002).

*Anomalias magnéticas provocadas por materiais contidos na subsuperfície*

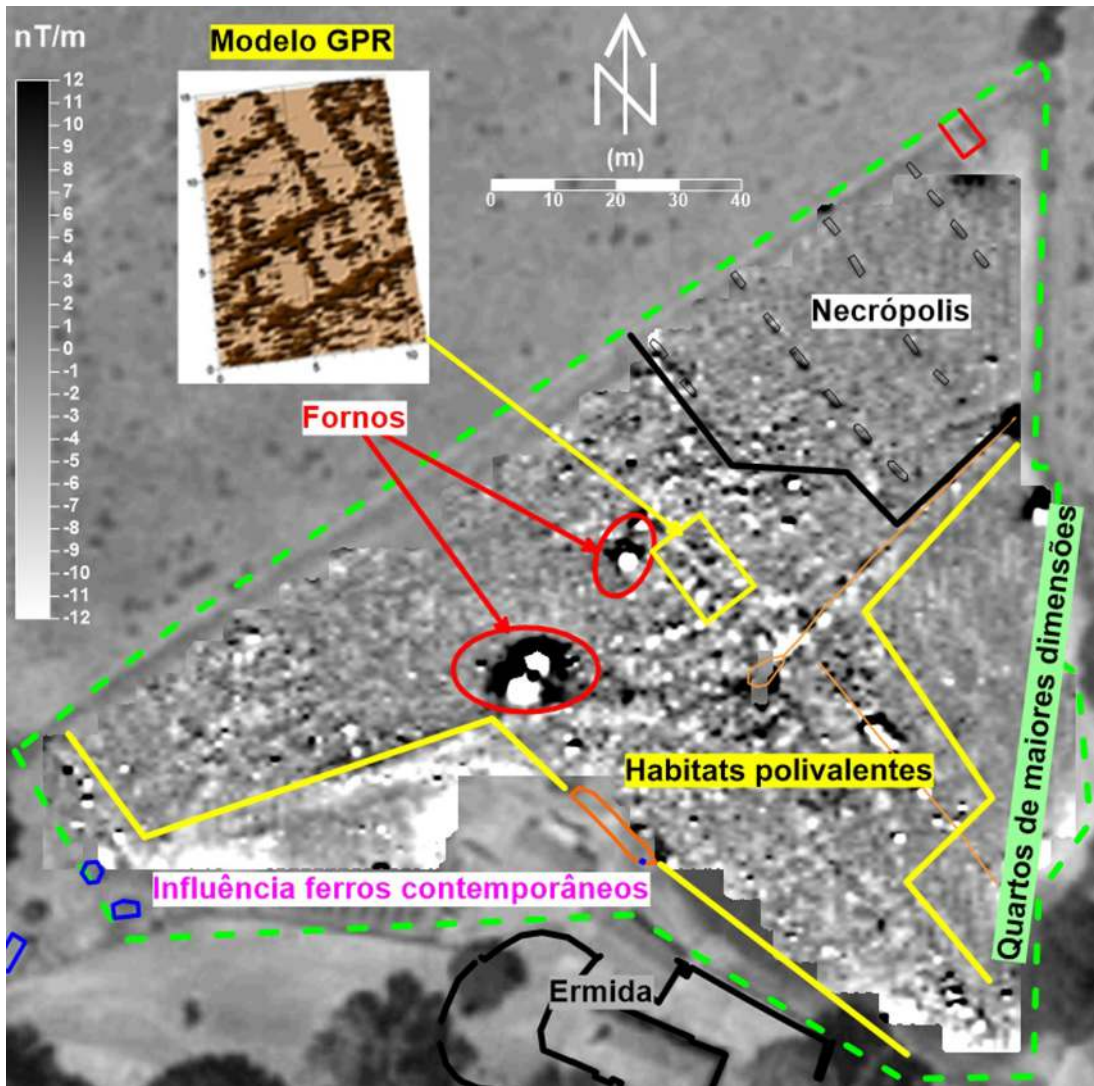
A variação do conteúdo mineral com comportamento magnético das rochas próximas da superfície provoca modificações locais no campo magnético medido à superfície. As fontes de anomalias magnéticas locais não podem estar localizadas a grandes profundidades uma vez que ultrapassada a temperatura de Curie 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 2.23).



**Figura 2.23:** 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 ambiental ( $F_{amb}$ ) e isolar a anomalia ( $F_{anom}$ ) para ser interpretada. Em Arqueologia, as anomalias geralmente são de valor muito baixo (entre os  $\pm 20$  nT), pelo que os magnetómetros têm que ser muito sensíveis, já que devem discriminar  $1 \text{ } ^\circ/\text{000}$ .

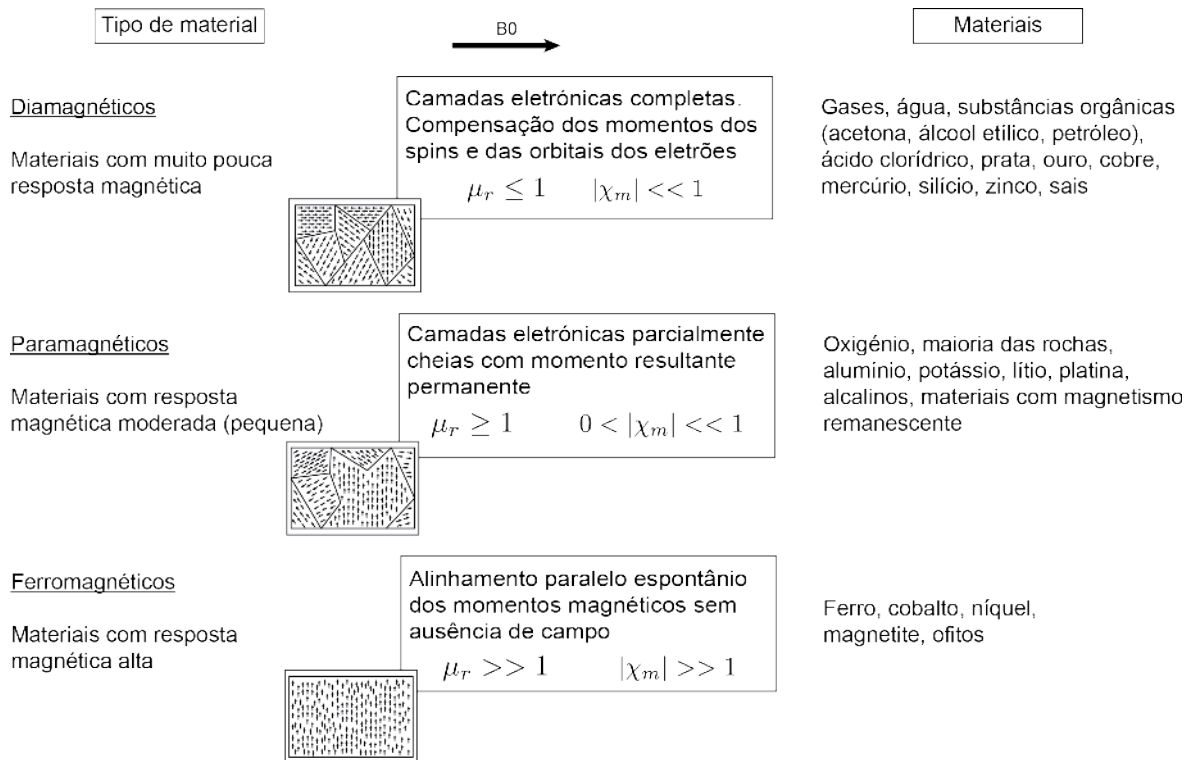
Com estas anomalias mais superficiais isoladas é elaborado o mapa magnético da zona prospectada, obtendo-se uma planimetria magnética que pode ser interpretada (Figura 2.24). Normalmente, devido ao design do dispositivo experimental, as anomalias magnéticas são produzidas por corpos enterrados situados até profundidades de aproximadamente 2 m, e que no contexto de um sítio arqueológico é atribuída origem antropogénica (por exemplo, depósitos cerâmicos, fornos ou muros).



**Figura 2.24:** 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  $\pm 12$  nT. A zona de *habitats* possui dados de GPR-3D que ajuda a interpretar os dados magnéticos. Adaptado de Teixidó et al. (2010).

### 2.2.3. Tipos de magnetismo

O comportamento de qualquer substância é estabelecido quando é colocada sob a influência de um campo magnético externo. Dependendo do tipo de reação face ao campo indutor (Telford et al., 1990), os materiais podem ser classificados de diamagnéticos, paramagnéticos ou ferromagnéticos (Figura 2.25).



**Figura 2.25:** Tipos de magnetismo dos materiais e sua reação face a um campo magnético indutor  $B_0$ . Adaptado de Teixidó et al. (2010).

Uma substância é diamagnética se o seu campo é dominado por átomos com as orbitais eletrônicas orientadas de modo a oporem-se a um campo externo, exibindo valores de suscetibilidade magnética negativos. Em materiais diamagnéticos, como água, substâncias orgânicas, silício e sais, o diamagnetismo prevalece apenas se o momento magnético de todos os átomos for nulo quando o campo magnético externo  $\vec{H}$  for nulo, situação característica de átomos cujos níveis eletrônicos se encontram totalmente preenchidos, não existindo eletrões livres.

Uma substância é paramagnética se o momento magnético é diferente de zero quando  $\vec{H}$  for nulo, exibindo valores positivos de suscetibilidade magnética. Em materiais paramagnéticos, como a maioria das rochas, alumínio, lítio e materiais com magnetismo remanescente, existem eletrões livres e o seu movimento é responsável pela formação de campo magnético.

Os elementos ferromagnéticos, como o ferro, cobalto e níquel, possuem uma interação magnética de tal modo forte que os momentos magnéticos ficam alinhados (designados por domínios). A magnetização espontânea que existe mesmo sem influência de um campo magnético externo aumenta drasticamente, possuindo valores de suscetibilidade magnética muito altos (cerca de  $10^6$  vezes superior aos valores típicos para os materiais diamagnéticos e paramagnéticos). Este efeito diminui com o aumento da temperatura, desaparecendo quando é ultrapassada a temperatura de Curie do material. Na Tabela 2.5 estão indicados alguns valores de suscetibilidade magnética de alguns materiais.

**Tabela 2.5:** Valores de suscetibilidade magnética para alguns materiais.

Tipo de material	Material	$\chi_m$
Diamagnéticos	Bismuto	$-16.6 \times 10^{-5}$
	Ouro	$-3.6 \times 10^{-5}$
	Mercúrio	$-2.9 \times 10^{-5}$
	Grafite	$-1.6 \times 10^{-5}$
	Água	$-1.2 \times 10^{-5}$
	Cobre	$-1.0 \times 10^{-5}$
Paramagnéticos	Oxigénio	$0.2 \times 10^{-5}$
	Magnésio	$1.2 \times 10^{-5}$
	Alumínio	$2.2 \times 10^{-5}$
	Titânio	$7.1 \times 10^{-5}$
	Óxido de ferro	$7.2 \times 10^{-3}$
Ferromagnéticos	Cobalto	250
	Níquel	100 – 600
	Ferro	200 – 10000
	Superliga metálica	$10^5 - 10^6$

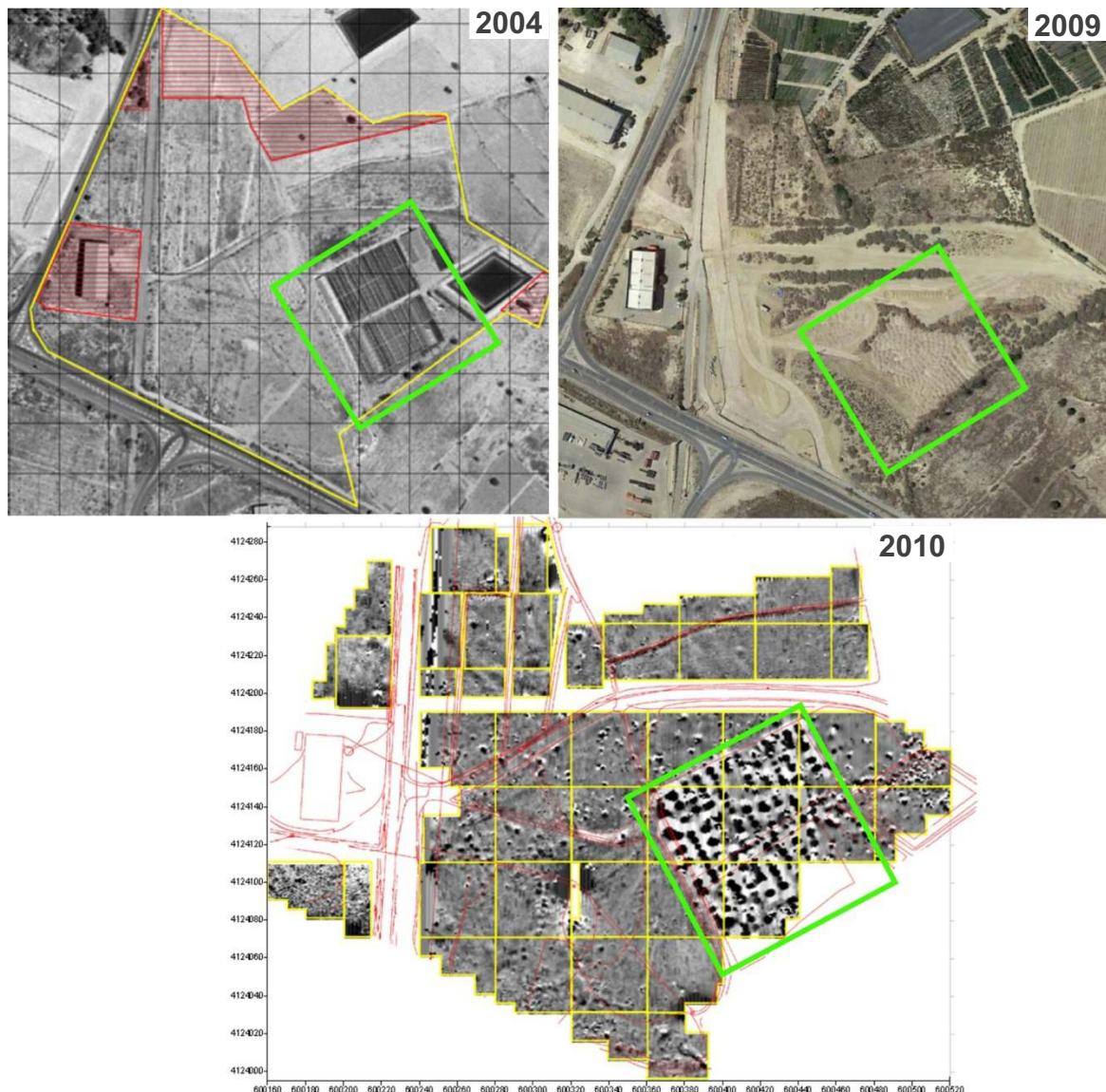
### *Magnetismo remanescente*

Existe outro tipo de magnetismo, designado por magnetização remanescente, que depende da história magnética do material (Telford et al., 1990). As causas para este tipo de magnetismo são as seguintes:

- Magnetização termorremanescente: resulta do material magnético rico em óxidos de ferro que é aquecido acima da temperatura de Curie e que durante o arrefecimento, na presença do campo magnético terrestre, fica com as características deste. Este tipo de magnetização remanescente encontra-se presente na maioria das rochas ígneas. Outro exemplo de grande importância são os vestígios arqueológicos, como é o caso dos locais onde existiram fornos, fornalhas e lareiras, e em materiais cerâmicos cozidos (como vasilhas ou tijolos), geralmente construídos com materiais argilosos ricos em óxidos de ferro, que com o seu aquecimento excedem a temperatura de Curie, tornando-os materiais paramagnéticos.
- Magnetização remanescente detrítica: ocorre durante a deposição de sedimentos e na presença de um campo externo. Diversas argilas apresentam este tipo de magnetização remanescente.
- Magnetização remanescente química: ocorre quando existe aumento da dimensão dos grãos ou na sua mudança de forma, resultado de alterações químicas provocadas por aumento da temperatura (abaixo da temperatura de Curie), frequentemente verificado em rochas sedimentares e metamórficas.

### Magnetismo biológico

O magnetismo biológico (Gubbins & Herrero-Berver, 2008) consiste na modificação das características magnéticas de um material desencadeadas por matéria orgânica, pela combustão do oxigénio nela presente, por ação de fogueiras ou desencadeado pela sua fermentação (Figura 2.26). Em condições redutoras, a hematite presente no solo é convertida em magnetite, o que provoca um aumento drástico do valor de suscetibilidade magnética. Este processo pode ser também desencadeado por bactérias anaeróbicas durante o processo de decomposição de matéria orgânica de origem antropogénica, ou por bactérias do tipo magnetotáticas, que possuem magnetite incorporada nos seus corpos.



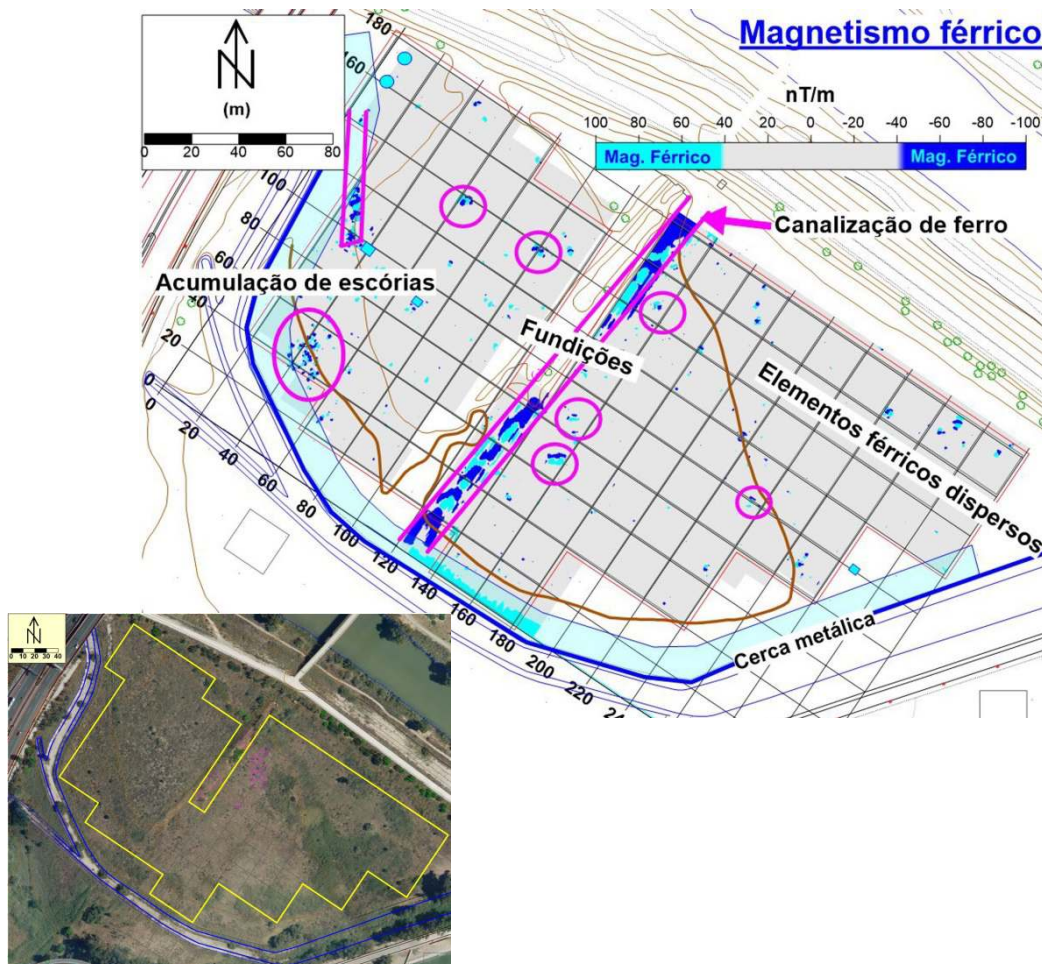
**Figura 2.26:** Exemplo de magnetismo biológico. Mapa de anomalias magnéticas (produzido em 2010) de um local onde existiram estufas (em 2004). O quadrado verde indica a posição da antiga estufa. O mapa de anomalias magnéticas está representado em escala linear de cor cinza, com um intervalo de valores de  $\pm 10$  nT/m. Zona de estudo: Vera, Almeria (Espanha). Adaptado de Teixidó & Peña (2010).

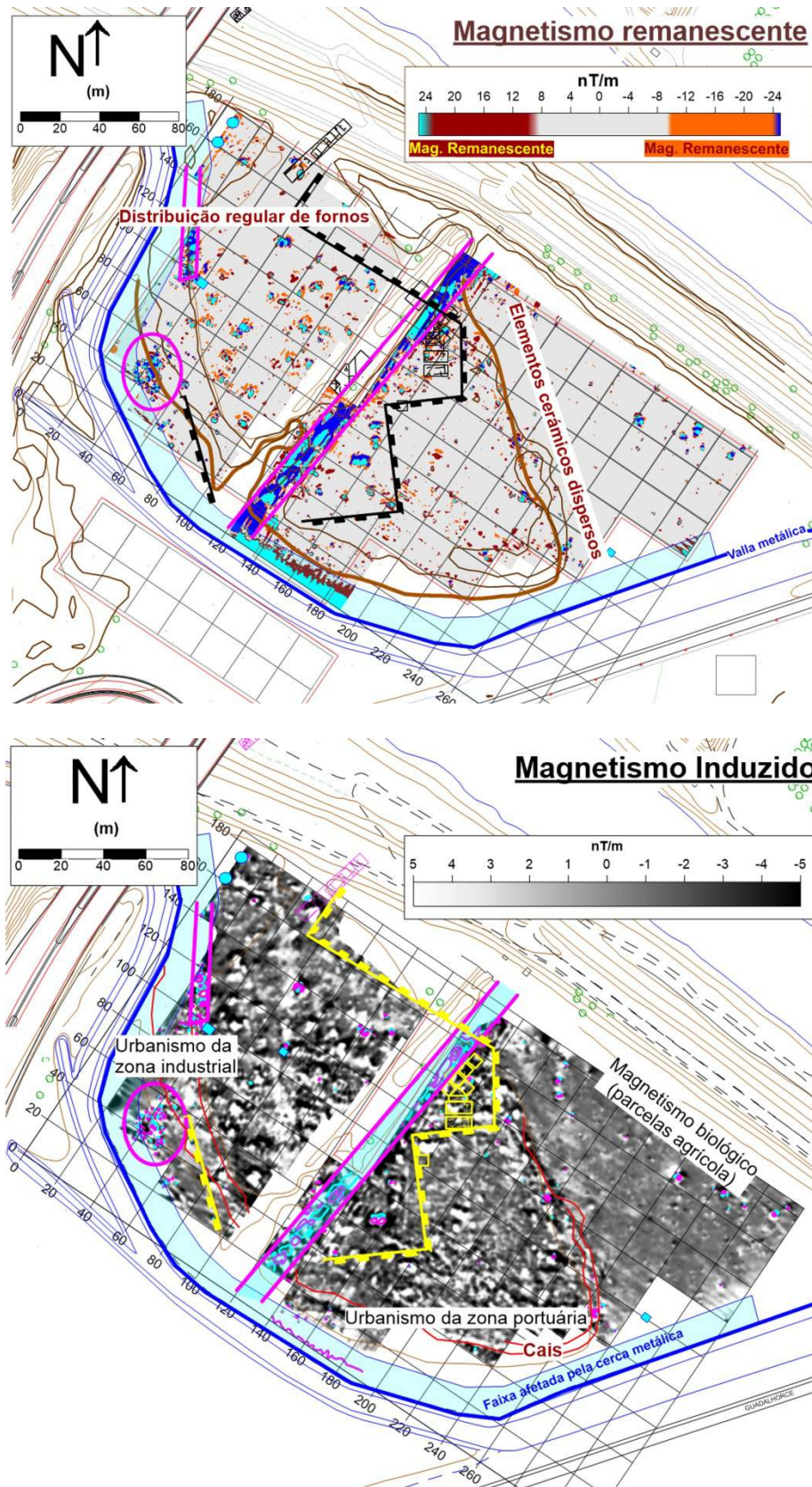


*Tipos de anomalias presentes nos mapas magnéticos arqueológicos*

O tipo de magnetismo produzido pelos corpos superficiais é utilizado para interpretar os mapas de anomalias magnéticas. Como exemplo, considerou-se o caso de estudo da exploração magnética do sítio Fenício de Cerro del Villar (Málaga, Espanha), em que os dados foram adquiridos por um array de quatro magnetómetros (Teixidó & Peña, 2018). Geralmente, a análise dos dados permite classificar as anomalias magnéticas nas seguintes categorias (Figura 2.27):

- Anomalias fortes (superiores a  $\pm 50-100$  nT/m), relacionadas com objetos fêrricos contemporâneos (cercas metálicas, valas, tubos metálicos) ou históricos (acumulação de escórias). O intervalo de valores depende da profundidade do objeto, do seu estado de oxidação e da percentagem de ferro na sua composição.
- Anomalias médias (superiores a  $\pm 20-50$  nT/m), provocadas normalmente por fontes produtoras de magnetismo remanescente (fornos, acumulações cerâmicas, vestígios de fornos) e de magnetismo biológico (poços, recintos cercados).
- Anomalias débeis (inferiores a  $\pm 10$  nT/m), provocadas por magnetismo induzido desde que os corpos produtores sejam compostos por materiais paramagnéticos que respondam ao campo externo indutor. Num sítio arqueológico, são associadas a materiais de construção de adobes e a magnetismo biológico débil (antigos limites de terras).





**Figura 2.27:** A análise de um mapa de anomalias magnéticas geralmente realiza-se mediante a classificação dos distintos tipos de anomalias. Sítio arqueológico Fenício de *Cerro del Villar* (Málaga, Espanha). Neste local está situada a desembocadura do rio Guadalhorce, que na época Fenícia (VII a.C.) era uma ilha dentro de um estuário (Aubet Semmler et al., 1999). Adaptado de Teixidó et al. (2010).

#### 2.2.4. Equipamentos de medição

Os primeiros equipamentos de medição magnética foram concebidos nos inícios de 1900, sendo usados em levantamentos terrestres para medir as componentes do campo magnético terrestre  $\vec{Z}_T$ ,  $\vec{H}_T$  e  $\vec{B}_T$  (Kearey et al., 2002). Estes primeiros equipamentos eram compostos por variómetros magnéticos cuja medição implicava a nivelção do equipamento em cima de uma plataforma estável, tendo como principais consequências o aumento do tempo de cada medição e a limitação de apenas se poder usar em espaço terrestre. No início, os magnetómetros estavam concebidos para localizar anomalias do tipo geológico; apenas a partir de 1940 começaram a ser desenvolvidas novas gerações de magnetómetros, que permitiam leituras com elevada sensibilidade da ordem de  $\pm 1$  nT, que podiam ser usados em terra e mar com fins bélicos, para localização de submarinos, por exemplo.

A aplicação em Arqueologia começou a partir das décadas de 1950-1960, após a II Guerra Mundial, em que se usaram magnetómetros de torção que mediam anomalias entre os  $\pm 20$ -50 nT (Herbich & Zych, 2015). Atualmente, os magnetómetros utilizados em Arqueologia medem o campo total  $\vec{B}_T$  com sensibilidades na ordem dos  $\pm 0.1$  nT, valor que se aproxima de cerca de uma parte em  $5 \times 10^6$  nT do campo magnético total.

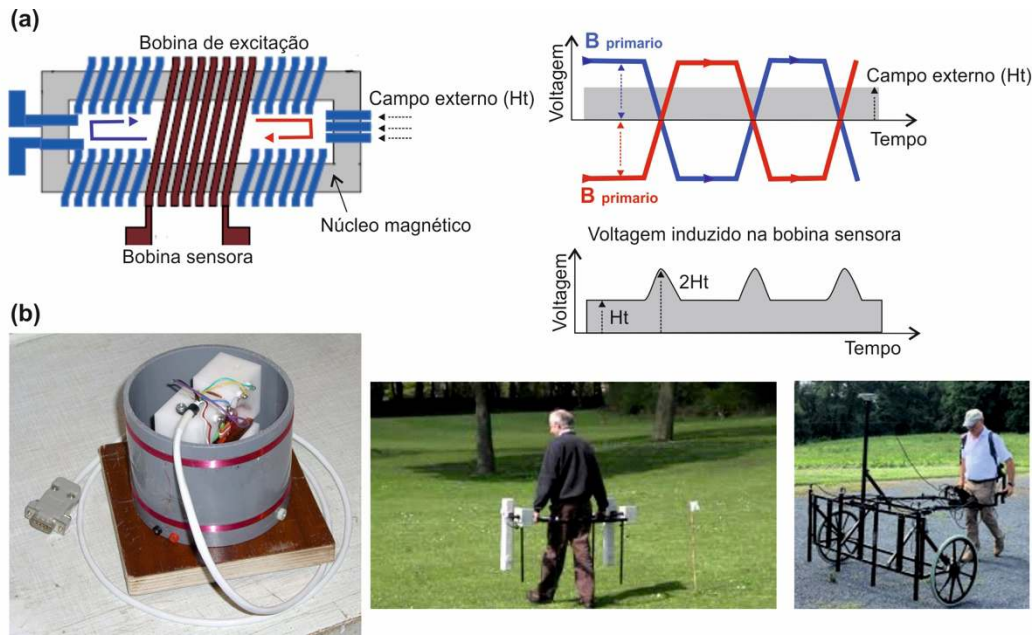
##### *Magnetómetro fluxgate*

Este tipo pertence ao grupo dos magnetómetros vetoriais uma vez que têm a capacidade de medir qualquer direção das componentes do campo magnético total. Em Arqueologia são usados apenas para medir a componente vertical  $\vec{Z}_T$  ou horizontal  $\vec{H}_T$ . São formados por dois núcleos idênticos, de material ferromagnético ( $\mu$ -metal: níquel-ferro, cobre-molibdeno) de permeabilidade muito alta, de modo a que à passagem de corrente alternada (bobina de excitação) o campo magnético primário induzido produz uma magnetização próxima do valor de saturação do metal (Figura 2.28). A variação do campo magnético primário gera uma diferença de potencial no circuito secundário (bobina de deteção). A presença do campo terrestre total faz variar a resposta do circuito secundário, possibilitando a medição. A sensibilidade destes magnetómetros é de cerca de  $\pm 1$  nT e permite uma medição contínua, o que possibilita, em andamento, obter amostras com um intervalo de amostragem de cerca de 25 cm. São muito utilizados em Arqueologia devido ao baixo custo e normalmente são usados em *arrays* para efetuar o varrimento de mais superfície no mesmo intervalo de tempo (Figura 2.28).

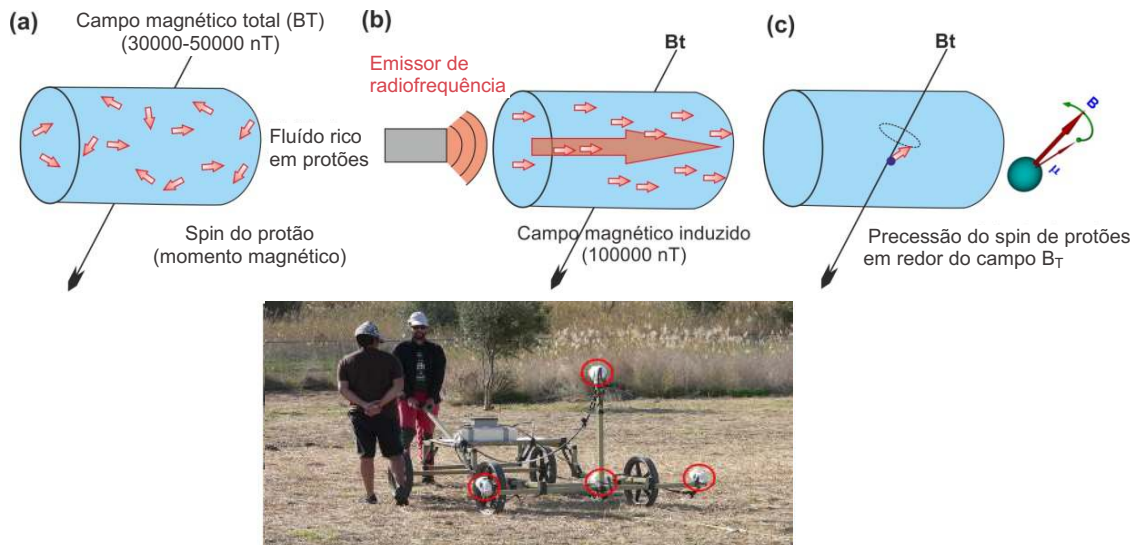
##### *Magnetómetro de efeito overhauser*

Este tipo de magnetómetro é muito comum em levantamentos arqueológicos e são uma otimização dos magnetómetros de precessão protónica. São do tipo escalar uma vez que apenas medem a intensidade do campo total  $\vec{B}_T$  com precisões da ordem de  $\pm 0.05$  nT. Os sensores são constituídos por

recipientes preenchidos por um líquido rico em átomos de hidrogénio (como querosene ou água). Os prótons do hidrogénio são excitados por um sistema de radiofrequência com polarização contínua (Figura 2.29), que atuam como pequenos dipolos que ficam paralelamente orientados com o campo magnético  $\vec{B}_T$ . Devido ao design deste magnetómetro permitir taxas de amostragem máximas de 5 leituras/s quando se trabalha com 4 sensores, para se conseguir uma cobertura espacial adequada é preciso adequar a velocidade de deslocação (imagem inferior da Figura 2.29).



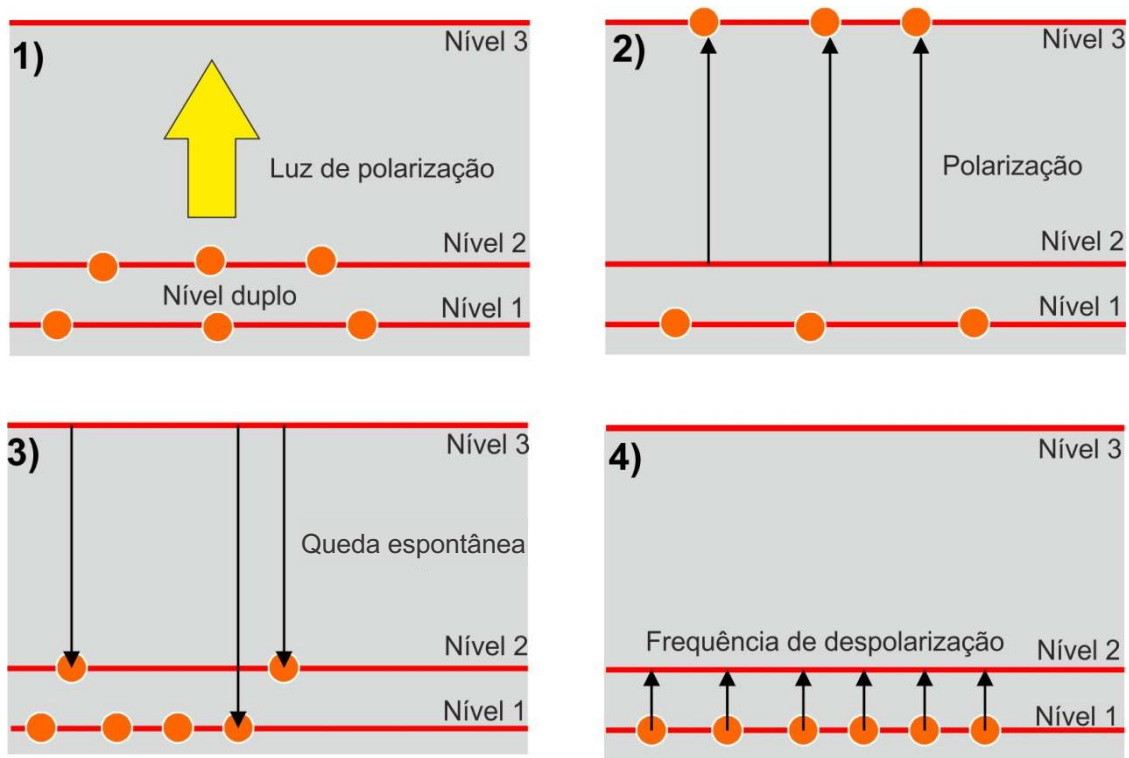
**Figura 2.28:** Esquema de funcionamento do magnetómetro *fluxgate*. (a) Circuito, campos magnéticos gerados e sinal registado. (b) Imagem do circuito interno e fotografias da aquisição de dados em modo *array*, com 4 sensores (2 sensores em cada barra vertical) e com 8 sensores.



**Figura 2.29:** Esquema de funcionamento do magnetómetro *overhauser*. (a-c) Os prótons de hidrogénio do líquido atuam como pequenos dipolos, que ficam paralelamente orientados com o campo magnético  $\vec{B}_T$ . A imagem inferior é de um equipamento de 4 sensores (círculos vermelhos).

*Magnetómetro de bombeamento ótico*

Os magnetómetros de bombeamento ótico ou de vapor alcalino (Figura 2.30) são significativamente mais precisos que os restantes ( $\pm 0.0001$  nT) e também são do tipo escalar. Estes magnetómetros são constituídos por uma célula de vidro que contém no seu interior um metal alcalino no estado gasoso (césio, rubídio ou potássio). No estado de equilíbrio, os átomos destes gases possuem eletrões corticais que se encontram num nível energético inferior devido à ação de um campo magnético externo (efeito *Zeeman*, 1 e 2 na Figura 2.30-1). Quando estes são iluminados com uma luz de comprimento de onda específica capaz de excitar apenas os eletrões do nível 2, então estes passam para um nível eletrónico superior (3 na Figura 2.30-2). Se a luz de polarização for interrompida, os eletrões regressam aos níveis duplos por queda espontânea (Figura 2.30-3). Repetindo a operação, chega um momento em que o nível 2 está sem qualquer eletrão e o gás deixa de absorver luz, deixando de estar opaco para ficar transparente (Figura 2.30-4). Mediante outra luz cujo comprimento de onda corresponde à diferença energética do nível duplo, os eletrões deslocam-se para o nível 2. A frequência de despolarização (de *Larmor*) é diretamente proporcional ao campo magnético ambiente, possibilitando a sua medição. Estes magnetómetros são capazes de medir em contínuo com um intervalo de amostragem mínimo de 5 amostras/s, o que representa uma amostra por cada 10-15 cm quando o dispositivo for transportado a uma velocidade de cerca de 2 km/h, que é a velocidade média quando se caminha a passo lento. São muito utilizados em Arqueologia, no entanto, devido ao seu elevado custo, geralmente apenas são usados dois sensores (Figura 2.30).



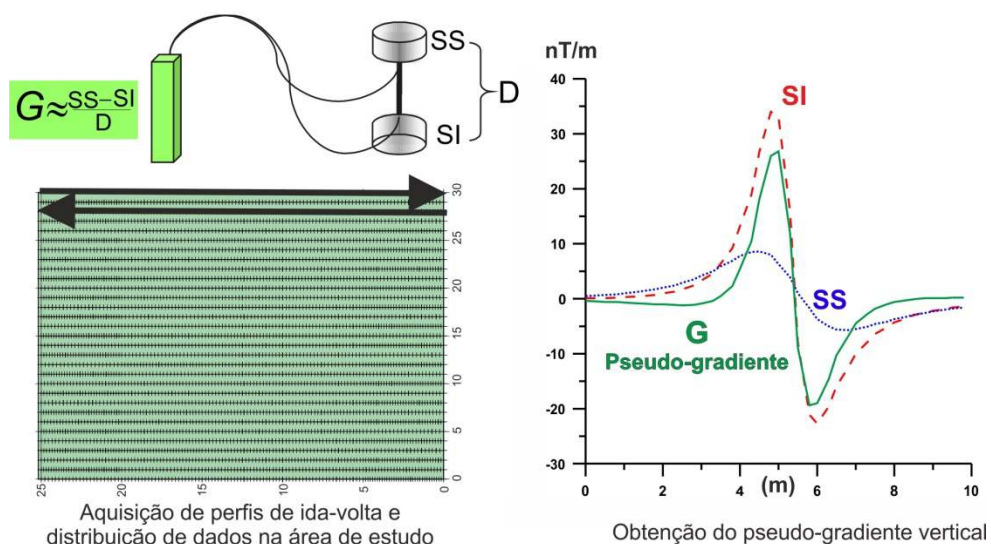


**Figura 2.30:** As imagens mostram o esquema de funcionamento de um magnetómetro de bombeamento ótico (1-4). A imagem inferior mostra uma aquisição de dados com um equipamento de dois sensores (gradiómetro).

### 2.2.5. Levantamento magnético terrestre em modo gradiómetro

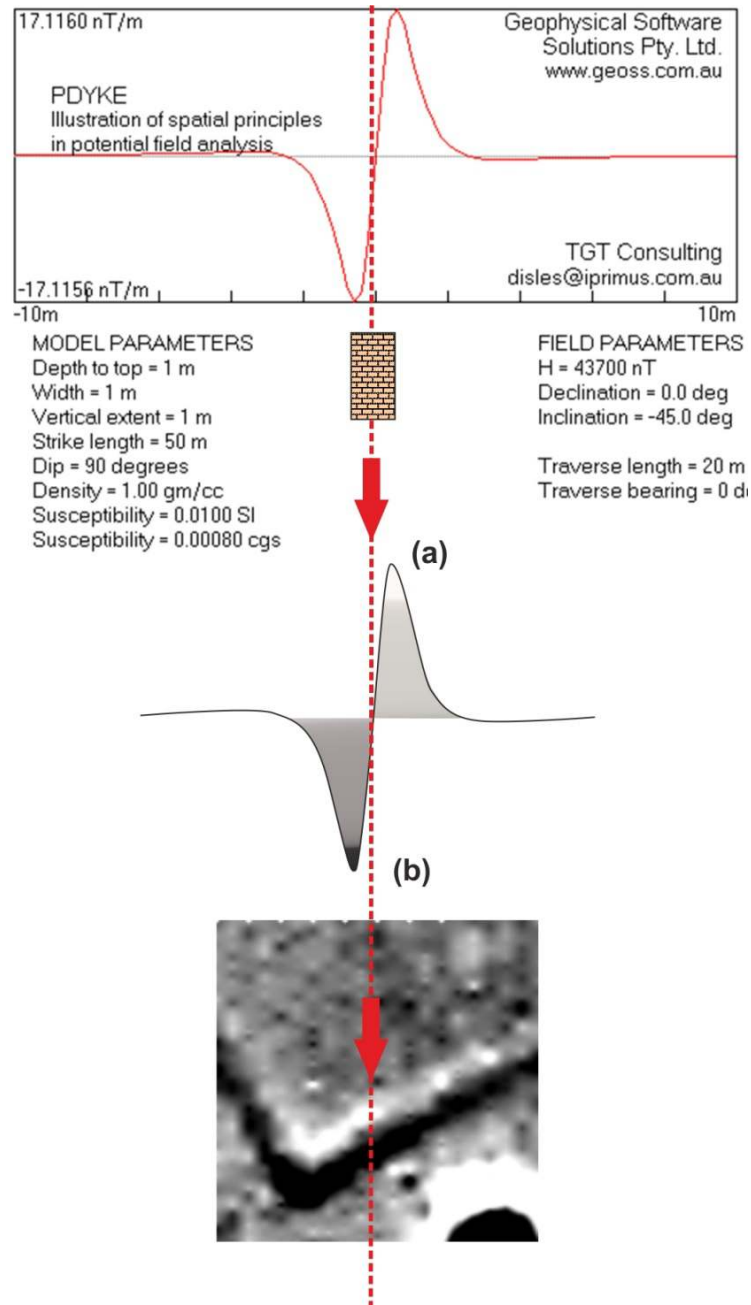
Em Arqueologia, quando se aplica o método magnético por norma opta-se pela configuração em modo gradiómetro vertical para detetar anomalias mais superficiais. A unidade básica de um gradiómetro é formada por dois sensores separados por uma distância fixa e pequena (no que respeita à distância aos corpos que provocam a anomalia). No caso de um gradiómetro vertical (Figura 2.31), 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.

Medição do campo em pseudo-gradiente vertical



**Figura 2.31:** 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 2.32a). Uma vez obtidos todos os dados, é necessário efetuar interpolação espacial para produzir o mapa de anomalias (Figura 2.32b) que corresponde à sua distribuição espacial.



**Figura 2.32:** (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  $\pm 10$  nT/m.

Nesta tese foram usados dois equipamentos de prospeção magnética:

- Um *array* de quatro magnetómetros de protões com efeito *overhouser* (GEM Systems). Estes são usados montados num carte de material não metálico, que permite a aquisição de três perfis ao mesmo tempo, separados de 0.5 m. Numa posição superior, à distância aproximada de 1 m do sensor central inferior, encontra-se outro sensor que permite o cálculo posterior do valor do gradiente vertical do campo magnético (Figura 2.29).
- Um magnetómetro diferencial formado por dois sensores de vapor de potássio (GEM Systems), em configuração de gradiómetro vertical, separados de 1 m (Figura 2.30).

### 2.2.6. Processamento básico de dados de pseudo-gradiente vertical

No esquema da Figura 2.33 estão esquematizadas as etapas de processamento de dados magnéticos até se obter um mapa de anomalias magnéticas.

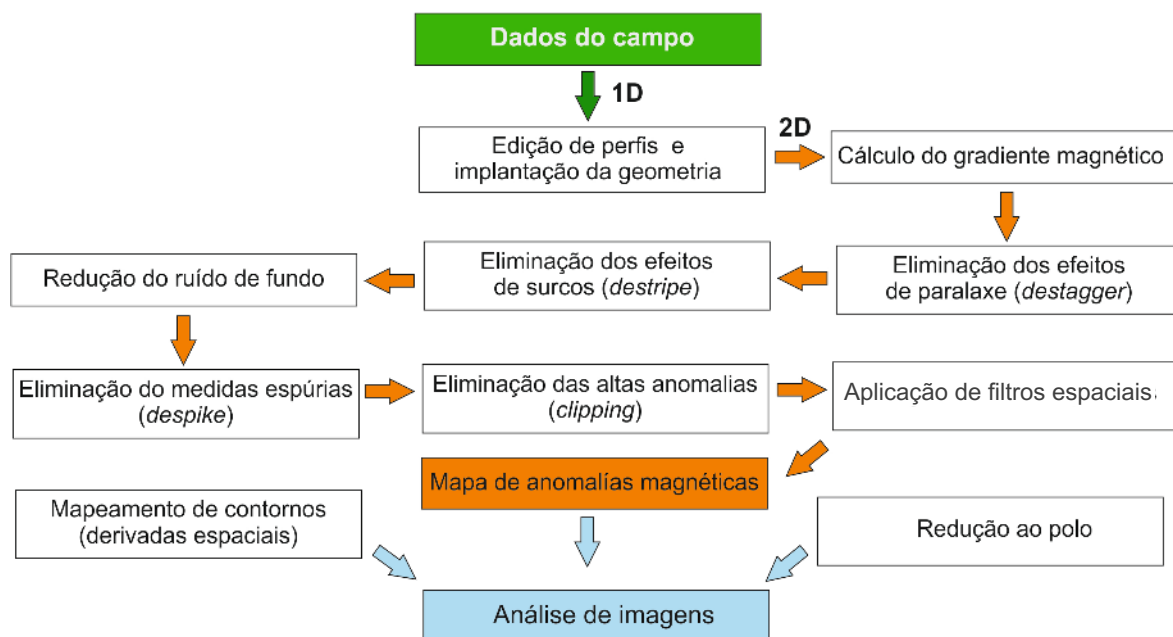
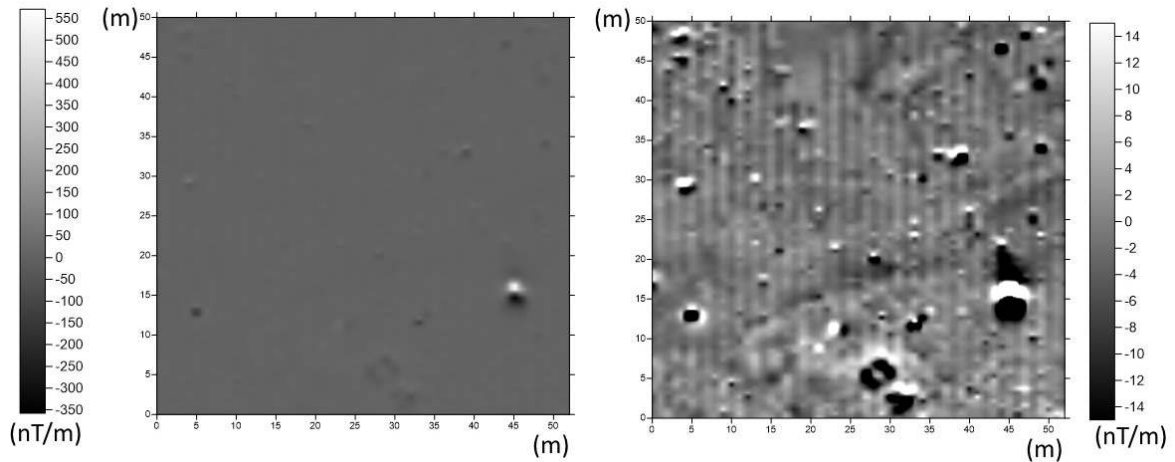


Figura 2.33: Etapas do processamento de dados magnéticos para obtenção do mapa de anomalias magnéticas.

Para mostrar o efeito da aplicação destes algoritmos foi considerada o mesmo setor mostrado no processamento de dados de GPR representado na Figura 2.14, que pertence ao sítio arqueológico de Útica (Tunes, Tunínia), onde se encontram vestígios Fenícios-Púnicos e Romanos (Peña & Teixidó, 2011; López-Castro et al., 2015). A zona de estudo corresponde à mesma forma quadrada com 50 m de lado. Os perfis magnéticos foram adquiridos em modo pseudo-gradiente vertical formado por dois sensores de vapor de potássio (GEM Systems) e a zona foi coberta por perfis paralelos em modo zig-zag separados de 0.5 m. Estes dados magnéticos foram processados com programas próprios (Peña & Teixidó, 2013).



Uma vez editado cada um dos perfis, é implantada a geometria da aquisição e agrupam-se todos os dados num conjunto 2D. A malha obtida é constituída por colunas que contêm a posição este-oeste (eixo X) e norte-sul (eixo Y) para cada medida, e três colunas adicionais onde se encontram os valores de cada um dos sensores e do gradiente magnético. Nesta etapa é conveniente analisar os mapas dos dados em bruto para estabelecer os parâmetros principais (como o intervalo de valores das anomalias e nível de ruído de fundo) e definir o fluxo de processamento a aplicar (Figura 2.34).



**Figura 2.34:** À esquerda: Mapa bidimensional de anomalias magnéticas (dados brutos) em escala linear de cinzas. Os valores correspondentes aos pontos localizados entre os perfis foram interpolados. Apenas se destaca uma anomalia forte cujos valores de intensidade definem o intervalo de valores ( $\pm 500$  nT/m). À direita: O mesmo mapa representado numa escala de cores modificada que permite observar as anomalias mais débeis.

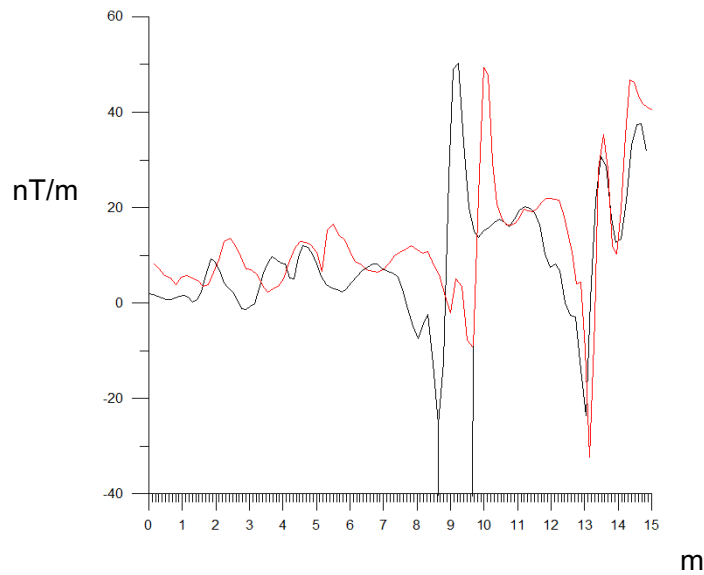
#### *Eliminação dos efeitos de paralaxe (destagger)*

Uma característica da aquisição dos dados em perfis é o efeito de paralaxe, que consiste numa deformação em forma de zig-zag das anomalias lineares orientadas perpendicularmente aos perfis. Este efeito deve-se ao desfazamento que se produz na localização dos pontos de medida entre perfis consecutivos, uma vez que estes são adquiridos em sentidos contrários. Este erro tem uma componente sistemática que facilita a sua correção (Figura 2.35).

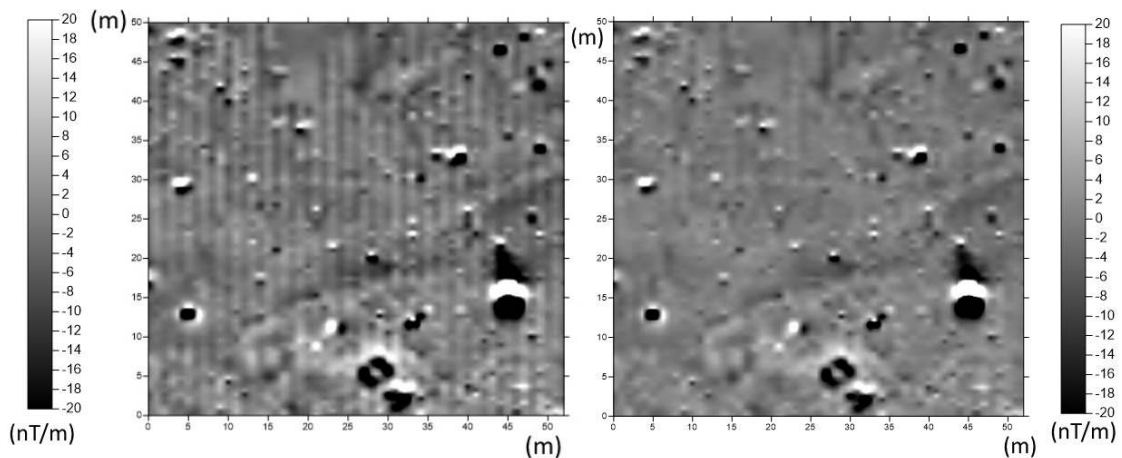
#### *Eliminação do efeito de bandado (destripe)*

Outra característica que se observa num mapa magnético é a existência de sulcos na direção dos perfis. Isto deve-se ao facto de as linhas do campo magnético terrestre estarem dirigidas de sul para norte; quando um perfil é adquirido neste sentido, a intensidade do campo “apoia” o campo induzido detetado nos materiais enterrados. Pelo contrário, quando o perfil é adquirido no sentido norte-sul, o campo magnético é direcionado contra o mesmo. Apesar de a utilização do método do gradiente, este fenómeno surge devido à fraca variação do campo magnético com a altura.

Normalmente, este efeito é eliminado através do cálculo do ruído magnético de fundo para cada um dos conjuntos de perfis (linhas pares e ímpares). As médias obtidas são ponderadas para aplicar os filtros espaciais que permitem dissipar esse efeito em faixas (Figura 2.36).



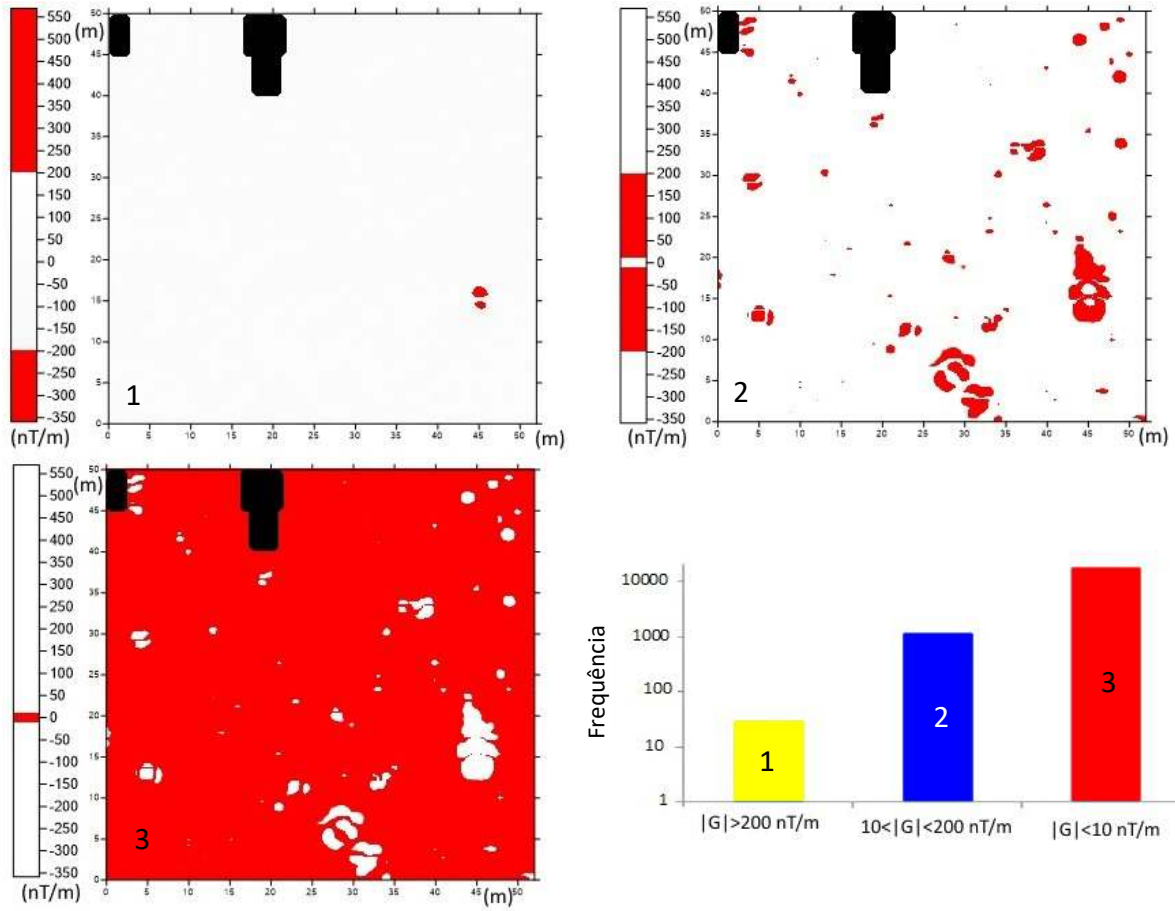
**Figura 2.35:** A análise da paralaxe é realizada através da comparação dos perfis coincidentes adquiridos em sentido contrário (linha de controlo). Neste caso, o desfaseamento é de 1 m, de forma que cada perfil deve ser deslocado  $\pm 0.5$  m dependendo do sentido da aquisição.



**Figura 2.36:** Comparação do mapa de anomalias magnéticas antes (esquerda) e depois (direita) da correção dos sulcos. Observa-se que a correção dos dados não produziu perda de informação.

#### *Correção de valores anómalos e de anomalias de alto valor (despike e clipping)*

Nesta etapa do processamento geralmente efetua-se uma discriminação de anomalias, de modo a classificá-las em anomalias fortes, intermédias e débeis. Neste exemplo, a classificação consiste nas seguintes categorias (em valor absoluto): anomalias altas, maiores que 200 nT/m, anomalias intermédias, entre 200 e 10 nT/m, e anomalias débeis, menores que 10 nT/m (Figura 2.37).



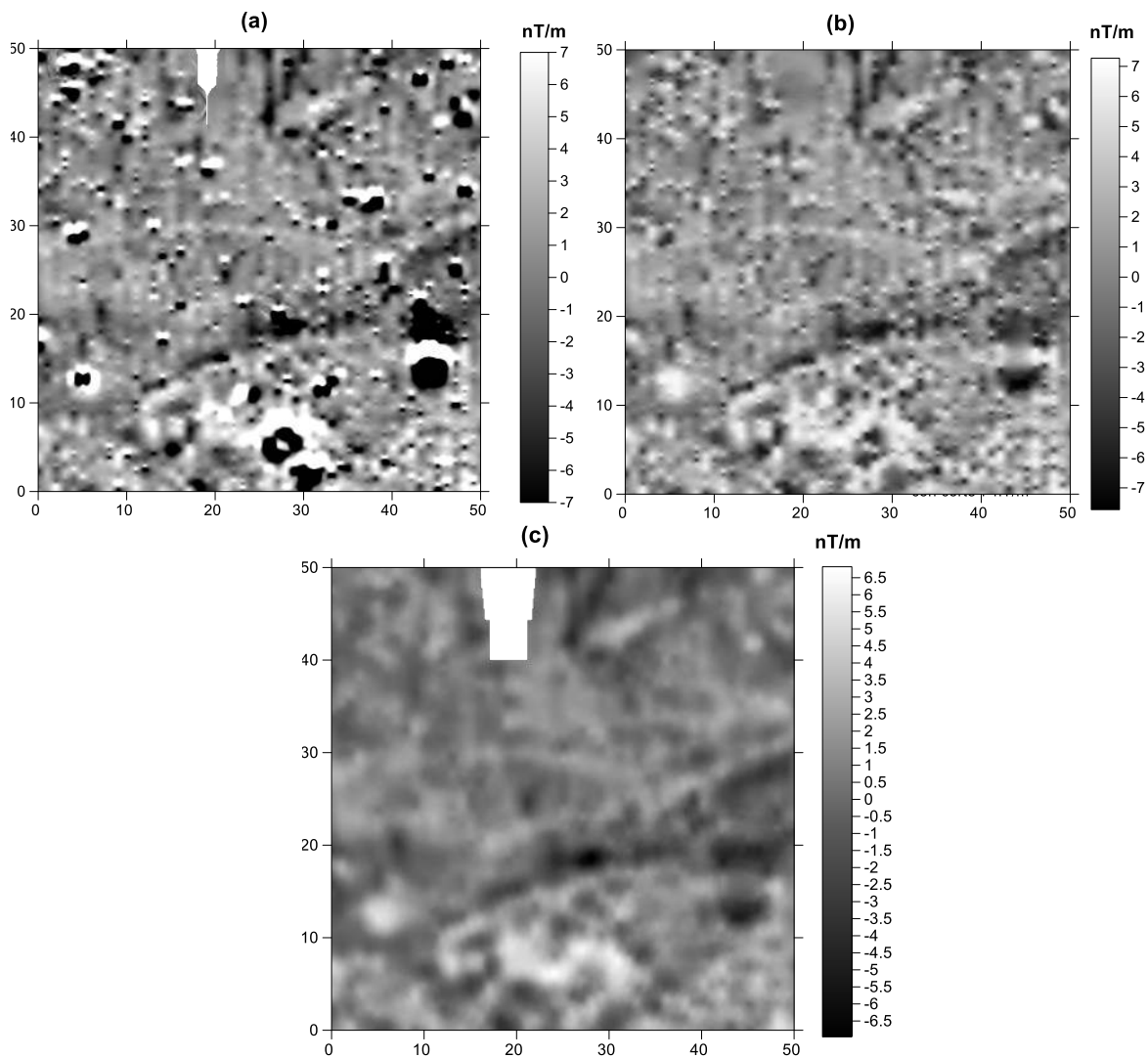
**Figura 2.37:** Superior esquerda: Mapa de anomalias fortes (ferromagnéticas). Superior direita: Mapa de anomalias intermédias. Inferior esquerda: Mapa de anomalias débeis. Inferior direita: Histograma de cada grupo de anomalias. As anomalias mais fortes correspondem ao grupo 1, as intermédias ao grupo 2 e as débeis ao grupo 3. Neste gráfico pode observar-se de forma quantitativa a predominância dos sinais mais débeis sobre os restantes.

Nos três mapas obtidos pode observar-se a predominância do magnetismo débil (induzido) sobre os sinais fortes e intermédios (Figura 2.37). Os quocientes sinal forte/sinal fraco e sinal intermédio/sinal débil são de valor muito baixo. Isto implica uma relação sinal/ruído muito próxima da unidade, e, portanto, a informação relevante encontra-se misturada no sinal correspondente ao ruído que existe entre  $\pm 10$  nT/m. Por esta razão, é imprescindível extrair do mapa os dados anómalos (*spikes*) e os valores altos (*clipping*), de modo a realçar as anomalias débeis (Figura 2.38b).

Existem diferentes estratégias para a eliminação dos valores anómalos e todos eles são baseados fundamentalmente na aplicação de filtros espaciais passa-baixo, enquanto que o efeito das altas amplitudes geralmente é corrigido através da interpolação de uma nova malha de dados com eliminação/substituição dos valores altos por valores médios do campo ambiente.

### Filtros espaciais e mapa resultante final

A aplicação de filtros espaciais do tipo passa-banda permite suavizar o ruído de fundo que ainda permanece nos dados após a aplicação das restantes operações e consiste num filtro gaussiano ou na substituição do valor de um pixel central pelo valor médio ou mediano de um conjunto de pixéis da sua vizinhança, ambos definidos pelo utilizador. Após a aplicação desta última operação obtém-se o mapa resultante final (Figura 2.38c).



**Figura 2.38:** (a) Mapa de anomalias magnéticas antes das correções dos valores anómalos e de anomalias de alto valor. (b) Mapa resultante de ambas as correções. (c) Mapa resultante da aplicação de filtros espaciais passa-banda.

### Mapas de contorno e redução ao polo

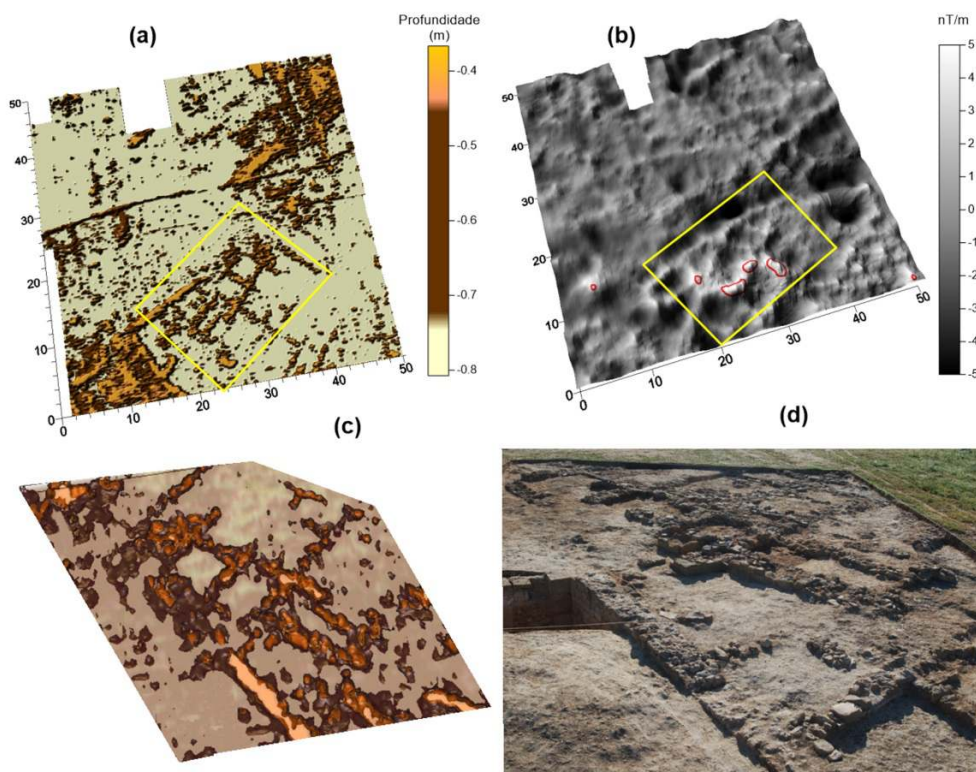
As operações anteriormente descritas podem ainda ser complementadas por mais duas operações que poderão facilitar a interpretação dos resultados do levantamento magnético, através do cálculo das derivadas verticais e da redução ao polo magnético.

O cálculo das derivadas verticais (Henderson & Zietz, 1949; Telford et al., 1990) permite realçar características de baixo comprimento de onda (por exemplo, os limites espaciais de zonas onde se encontram anomalias), permitindo aumentar a perceção sobre a subsuperfície próxima. A primeira derivada vertical do campo magnético, numericamente igual ao valor do gradiente vertical do campo magnético, realça características da superfície próxima. A segunda derivada vertical enfatiza os limites da anomalia se o modo de visualização espacial for uma vista de corte vertical.

A redução ao polo magnético (Baranov, 1957; Spector & Grant, 1985; Telford et al., 1990) remove os efeitos da inclinação e declinação magnética, transformando os dados em medições artificiais tal que o polo magnético indutor é vertical, o que poderá permitir uma melhor interpretação sobre a distribuição espacial das anomalias magnéticas.

### 2.2.7. Interpretação

Em semelhança com o método de GPR, a interpretação dos resultados do método magnético consiste na análise espacial dos valores de amplitude do gradiente vertical do campo magnético, depois de aplicadas as operações de processamento necessárias (Figura 2.39). Pretende-se verificar se existem alinhamentos que sugiram a presença de estruturas enterradas. A sua visualização é efetuada através de mapas bidimensionais de gradientes de cor, com representação dos valores de amplitude em função da localização espacial.



**Figura 2.39:** Interpretação conjunta dos resultados de GPR-3D (a,c) e gradiente vertical magnético (b) cuja existência foi confirmada pela escavação arqueológica (d).

## 2.3. MÉTODOS GEOESPACIAIS

Além dos métodos geofísicos mencionados nas secções anteriores, os métodos geoespaciais podem ser usados de forma complementar como ferramentas para integrar os resultados produzidos pelas técnicas geofísicas. Destacam-se as técnicas usadas durante a execução do trabalho apresentado: Fotogrametria com recurso a drone, GPS diferencial, Sistemas de Informação Geográfica e gestão de cartografia.

### 2.3.1. Fotogrametria com recurso a drone

A morfologia de uma superfície pode ser descrita através da representação gráfica de um modelo digital de superfície (DSM). A criação de um DSM pode ser efetuada através de medições *in situ*, usando por exemplo uma estação total ou GPS, ou com recurso a técnicas como LIDAR, SAR ou varrimento laser (Stefanik et al., 2011). Esses métodos, apesar de serem bastante precisos, apresentam elevados custos para produção de resultados (Pérez et al., 2013). A Fotogrametria com recurso a drone apresenta-se como um método alternativo às técnicas mencionadas, possuindo um vasto campo de aplicação, nomeadamente na Arqueologia e Herança Cultural, Agricultura de Precisão e Engenharia Civil (Pérez et al., 2013).

A Fotogrametria é uma técnica de registo geoespacial que pode ser aplicada a um local ou objeto, permitindo a produção de uma nuvem de pontos que contém toda a informação espacial de todo um alvo de estudo (superfície ou objeto), a partir da qual, depois de processada, permite a criação de diversas representações gráficas. A criação da nuvem de pontos é efetuada a partir da cobertura total do alvo de estudo com fotografias digitais, que deverão possuir taxas de sobreposição transversal e longitudinal de cerca de 75 % para que não se verifique subamostragem, uma vez que esta provoca zonas de sombra nos resultados (Li et al., 2018).

O método apresenta diversas vantagens (Gonçalves & Henriques, 2015), tais como: os relativos baixos custos na aquisição do equipamento; alto nível de automação do processo de levantamento; baixos custos operacionais; equipamentos de pequenas dimensões adaptados para realizar voos em áreas pequenas; possibilidade de repetição dos levantamentos sem grandes custos operacionais associados; possibilidade de obtenção de fotografias aéreas de alta resolução devido à proximidade ao objeto fotografado; possibilidade de preparação prévia do levantamento, para implantação e localização com GPS diferencial de pontos de controlo em terra; possibilidade de visualização das fotografias durante o processo de aquisição, o que permite a repetição em caso de deteção de alguma falha; baixo risco de acidente com o drone, devido ao seu baixo peso; rápido planeamento da missão, o que permite efetuar um levantamento logo que seja necessário, por exemplo a seguir a uma tempestade.

As desvantagens desta técnica (Gonçalves & Henriques, 2015) incluem: o elevado preço que por vezes se verifica na aquisição de toda uma solução para aplicar e processar Fotogrametria (drone, programa e computador para o processamento); a maioria dos drones não é adequada para efetuar voos muito extensos num curto intervalo de tempo; a carga de uma bateria apenas permite cerca de 15 a 20 minutos de voo e/ou memória disponível para os dados é limitada, obrigando o drone a regressar à base para se trocar a bateria e/ou o cartão de memória; os sensores disponíveis apenas se destinam à navegação automática do drone; os dados produzidos pelos sensores podem ser associados às fotos, no entanto não possuem a precisão necessária para algumas aplicações fotogramétricas; a pequena distância entre fotos consecutivas conjugada com variações bruscas no relevo produzem problemas de ocultação de objetos na superfície; limitação na distância entre o drone e o controlador, que geralmente é inferior a 5 km; o vento com velocidade superior a 25 km/h, em drones de pequena dimensão, impede o voo em condições de segurança.

O processo de aquisição e processamento de dados de Fotogrametria consiste essencialmente na seguinte sequência de etapas (Azzola et al., 2019):

1. Aquisição dos dados:

- Definição da área de estudo e plano de voo;
- Parametrização da aquisição e implantação de pontos de controlo no solo, para posterior localização com GPS diferencial;
- Aquisição das fotografias digitais, com recurso ao drone;

2. Processamento dos dados:

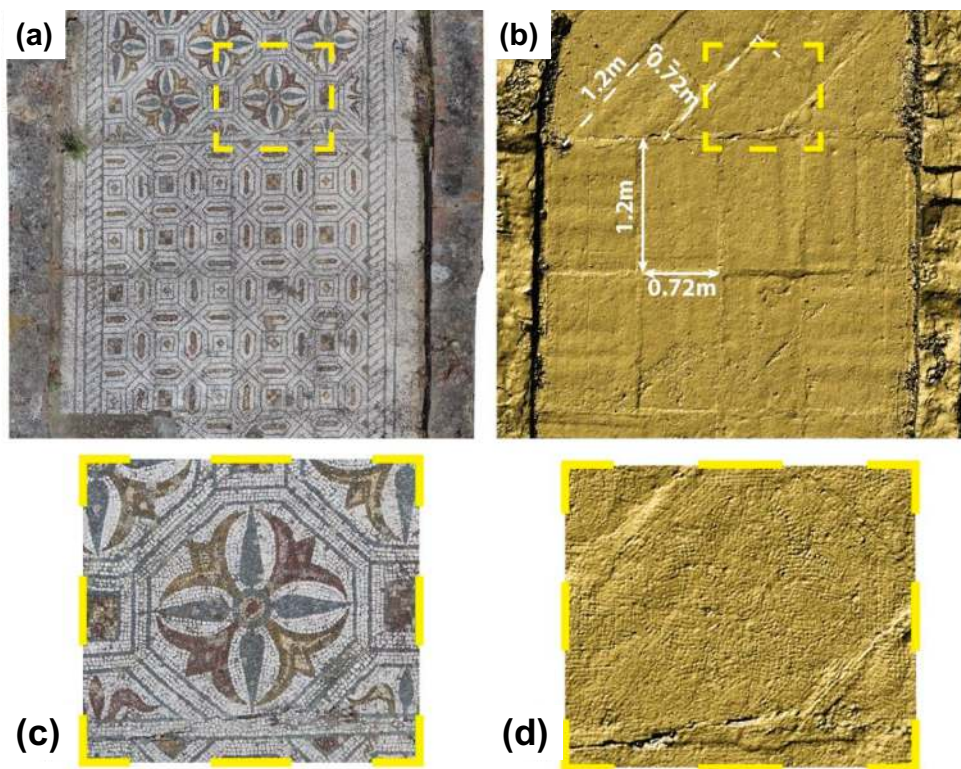
- Registo automático das imagens;
- Produção da nuvem de pontos esparsa;
- Georreferenciação da nuvem a partir dos pontos de controlo no solo (com a informação adquirida com o GPS diferencial sobre esses pontos);
- Produção da nuvem de pontos densa;
- Produção de grelha para projeção da textura da nuvem de pontos;

3. Produção de: DSM, ortofotografias e modelo tridimensional.

Os dados de Fotogrametria depois de processados permitem a produção de representações gráficas como o DSM, ortofotografias e modelo tridimensional do alvo de estudo. As saídas gráficas 2D podem ser introduzidas em ambiente SIG, para posterior integração dos resultados obtidos pelos métodos geofísicos na mesma área de estudo, sendo de grande utilidade no processo de interpretação desses resultados considerando o meio envolvente. A elevada resolução gráfica dos resultados da Fotogrametria permite efetuar a análise da superfície coberta pela aplicação da técnica, podendo ser identificadas patologias que possam existir, como desnivelamentos do relevo ou fraturação. As saídas gráficas 3D podem ser importadas em programas de visualização de dados 3D, permitindo a

observação da superfície prospectada como se estivesse no próprio local e considerando todas as informações altimétricas do mesmo.

Um exemplo da aplicação de Fotogrametria com recurso a drone em ambiente arqueológico é, por exemplo, para o estudo detalhado de um pavimento de mosaico da Villa Romana de Pisões (Caldeira et al., 2019, Anexo 1). A ortofotografia obtida (Figura 2.40a) exhibe todos os pormenores do mosaico com resolução elevada (gigapixel) como se se estivesse no próprio local. O DSM (Figura 2.40b) exhibe o relevo da estrutura, com a mesma resolução gráfica da ortofotografia e permite observar a existência de patologias na estrutura do mosaico, assim como detalhes sobre o modo de aplicação do mosaico.



**Figura 2.40:** (a) Fragmento da ortofotografia do mosaico obtido a partir da Fotogrametria. (b) Fragmento do DSM da mesma área mostrada em (a). (c) Detalhe ampliado da área selecionada em (a). (d) Detalhe ampliado da área selecionada em (b).

### 2.3.2. Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS)

Os Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS), vulgarmente designado por Sistema de Posicionamento Global (GPS), são sistemas de radionavegação por satélite, disponíveis em permanência, capazes de fornecer dados de localização (latitude, longitude e elevação), extremamente precisos em qualquer localização do planeta (Lange & Gilbert, 2005; Wells et al., 1987). A precisão na localização de um GPS, em condições normais, pode atingir os 5 m em equipamentos comerciais de utilização generalizada (vulgarmente designados por GPS de mão). Para se obter localizações de elevada



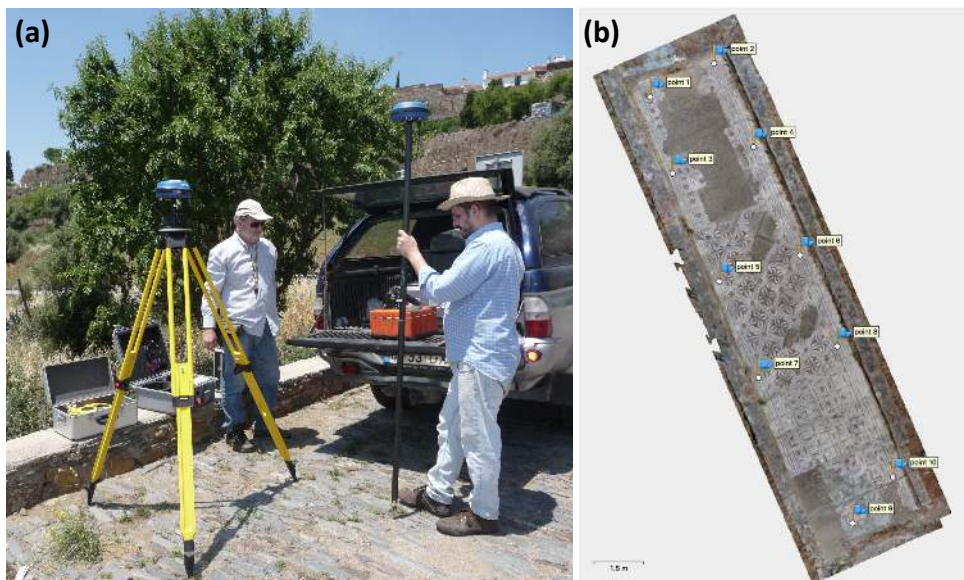
precisão (milimétrica), é necessária a utilização de equipamentos de GPS diferencial, cuja aquisição é efetuada através de um conjunto de equipamentos constituído por um GPS base e um GPS móvel, em que os registos de posição podem ser corrigidos de forma a obter-se localizações com a exatidão necessária.

Em termos práticos, o recetor GPS base é instalado nas imediações do local do levantamento, onde fica estacionado durante o tempo que o levantamento durar. Por outro lado, o recetor móvel visita os pontos do levantamento onde regista as posições. Durante todo este processo cada vez que o recetor móvel visita um ponto de registo, o cálculo da posição é feito pela triangulação do sinal de tempo emitido por um conjunto de satélites e recebido nos dois recetores que estão sincronizados através de uma comunicação rádio ou wireless estabelecida entre eles. Desta forma as posições relativamente à base são obtidas com uma elevada exatidão (erros milimétricos). Para conseguir que essas localizações preservem a exatidão em termos absolutos, basta conhecer a posição exata da base. Para isso, os dados da base serão processados, em tempo real ou num momento posterior, conjuntamente com os dados registados na mesma janela temporal em que a base esteve em funcionamento por uma ou mais estações fixas de uma rede geodésica. Dessa triangulação sai a posição absoluta da base com uma exatidão milimétrica. Finalmente, a correção a aplicar à localização de todos os pontos do levantamento é feita somando à posição de cada ponto localizado a correção da base (diferença entre a posição da base usada no levantamento e a posição calculada por pós-processamento). Para que a correção da localização dos pontos do levantamento medidos pelo GPS móvel possa ser efetuada considerando as medições do GPS base, é necessário assumir-se que, num raio que pode atingir várias centenas de quilómetros, o erro associado à medição da localização num mesmo instante de tempo, será o mesmo em todos os equipamentos de GPS utilizados (Lange & Gilbert, 2005; Rohani et al., 2014).

As correções da localização podem ser aplicadas em tempo real, modo RTK (*Real Time Kinematic*), ou posteriormente ao levantamento, modo PPK (*Post Processing Kinematic*), usando programas de pós-processamento de dados de GPS diferencial (Lange & Gilbert, 2005). Em ambos os casos é necessário o uso de dados de localização fornecidos por Estações Permanentes pertencentes ao Sistema Global de Navegação por Satélite. No modo RTK, é necessário estabelecer ligação à rede de estações permanentes em tempo real, via telefónica, para correção imediata da localização da base, o que implica que haja cobertura permanente durante a execução do levantamento, que em localizações mais remotas por vezes não é possível. No modo PPK, o GPS base armazena um ficheiro de dados para ser usado no pós-processamento, não sendo necessária qualquer ligação telefónica durante o levantamento, ou seja, apenas necessita da cobertura de satélites para a boa execução do levantamento. Em Portugal, a Direção-Geral do Território possui um serviço de Rede Nacional de Estações Permanentes GNSS (ReNEP), que permite o serviço de correção RTK e produz ficheiros horários/diários para aplicar a correção do modo PPK. A rede ReNEP é constituída por Estações

GPS/GNSS, de observação contínua, que difundem observações de todas as estações permanentes do continente e regiões autónomas.

Os sistemas de GPS, ao longo do tempo, têm substituído os levantamentos geodéticos convencionais (Zhu et al., 2012), realizados, por exemplo, com recurso a estações totais, possuindo um vasto campo de aplicação, nomeadamente, para observação contínua de deformação em deslizamento de terras (Biessy et al., 2011), observação de subsidência mineira (Biessy et al., 2011; Lu et al., 2008) e deformação de estruturas antropogénicas, como pontes (Meng et al., 2007) ou edifícios (Breuer et al., 2002). Também é usado para levantamentos topográficos e para medições de localizações diversas, como por exemplo, a localização milimétrica de pontos de controlo em solo em Fotogrametria e localização de áreas de prospeção geofísica (Figura 2.41). O método permite também a ocupação de localizações exatas seleccionadas *a priori* da sua ocupação efetiva no local, muito útil em prospeção geofísica para a definição de áreas de estudo numa etapa prévia.



**Figura 2.41:** (a) Levantamento de GPS diferencial (modo PPK) com antena base (no tripé) e antena móvel (no bastão). (b) Representação de alguns pontos de controlo em solo usados num levantamento de Fotogrametria.

### 2.3.3. Sistemas de Informação Geográfica

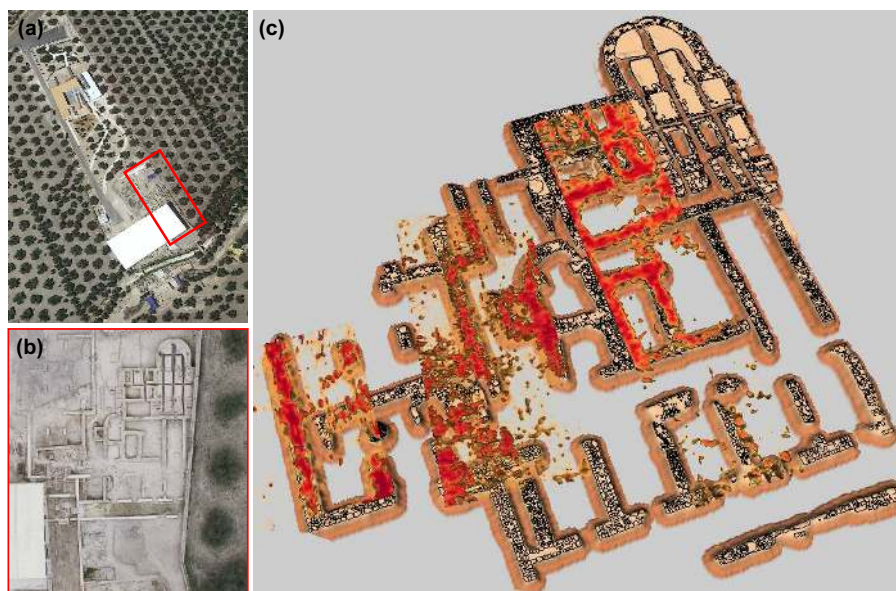
Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são ferramentas computadorizadas concebidas para coligir e analisar dados espacialmente orientados (Shaw & Atkinson, 1990), que podem conter atributos descritivos. A maioria dos programas de SIG permitem armazenar e organizar atributos de dados associados a localizações e tempo (Jensen, 1986). Como exemplo prático pode-se considerar um conjunto de dados com a distribuição espacial de ninhos de aves ao longo de vários anos (Shaw & Atkinson, 1990): em cada localização definida por coordenadas X e Y, existe informação definida por atributos, com o nome da espécie, comprimento das penas, altura a que se encontra na árvore.

Cada atributo corresponderá a uma camada de dados (*layer*) que se encontra georreferenciada e que poderá ser simultaneamente comparada e relacionada com outras (Shaw & Atkinson, 1990).

Os dados espaciais podem ser armazenados em três categorias geométricas fundamentais, pontos (localização de cada ninho), linhas (caminhos) e polígonos (lagos), que por sua vez podem ser armazenados sob a forma de estruturas básicas, do tipo *raster* e do tipo vetorial. Os dados armazenados em estruturas do tipo *raster* podem ser encaradas como dados matriciais, que em cada elemento está associado a uma localização e a um valor de amplitude correspondente à informação do atributo. Em estruturas do tipo vetorial, os dados são armazenados em sequências de coordenadas e vetores, associadas a uma variável alfanumérica que indica o atributo (Shaw & Atkinson, 1990).

A entrada de dados é uma das etapas mais importantes e trabalhosas de um SIG, em que é necessário escolher que escala, resolução e tipos de dados deverão ser considerados (Chrisman, 1987; Shaw & Atkinson, 1990). Os programas de SIG apresentam um grande potencial de assimilação de dados de diversas proveniências e tipologias, bastando que a informação esteja georreferenciada e associada a um sistema de coordenadas (Shaw & Atkinson, 1990).

O uso de programas de SIG em geofísica é de extrema utilidade para se proceder à integração dos resultados dos diferentes métodos geofísicos usados num local (Figura 2.42), permitindo a sobreposição de camadas e facilitando deste modo a sua comparação. Geralmente os resultados dos levantamentos geofísicos são sobrepostos a imagens aéreas obtidas por Fotogrametria com recurso a drone e podem ser também sobrepostas a imagens de satélite ou imagens diversas georreferenciadas, como por exemplo, cartas militares, mapas geológicos ou mapas interpretativos.



**Figura 2.42:** Villa Romana de Fuente Álamo, Ponte Genil (Córdoba, Espanha). (a) Ortofotografia da zona de estudo (IGN, 2008). (b) Ortofotografia detalhada do retângulo vermelho depois da escavação (IGN, 2014). (c) Representação tridimensional do modelo de GPR-3D sobre a planimetria arqueológica (Teixidó & Peña, 2010a). Os dois conjuntos estão georreferenciados no mesmo SIG.

### 2.3.4. Gestão da cartografia

Outra ferramenta fundamental em prospeção geofísica é a gestão de toda a cartografia disponível (mapas, ortofotografias, fotografias aéreas) para a análise de possíveis alterações edafológicas (relevo, vegetação) uma vez que podem indicar a presença de vestígios arqueológicos. Como exemplo, é apresentada a análise cartográfica realizada no sítio arqueológico fenício de *Cerro del Villar* (Málaga, Espanha), do qual foram apresentados os mapas de anomalias magnéticas da Figura 2.27.

O sítio arqueológico de *Cerro del Villar* foi descoberto em 1965 por M. Muñoz Gambero e a investigação foi realizada em levantamentos arqueológicos (Arribas & Arteaga Mamute, 1975). A partir da década de 1980 foi escavado por Maria Eugénia Aubet (Aubet Semmler, 1992; Aubet Semmler et al., 1999) e no início do século XXI, as escavações continuaram no perímetro de alguns dos edifícios localizados nas primeiras fases da escavação (Delgado Hervás, 2008).

Este sítio fenício está localizado na foz do rio Guadalorce, na margem direita, formando um delta como uma barra fluvial com forma oval e rodeada de canais fluviais (Figura 2.43). A investigação arqueológica indica que se tratou de um povoado fenício de grandes dimensões, fundado por volta do século VIII A.C. e abandonado entre 580-550 A.C. devido a inundações.



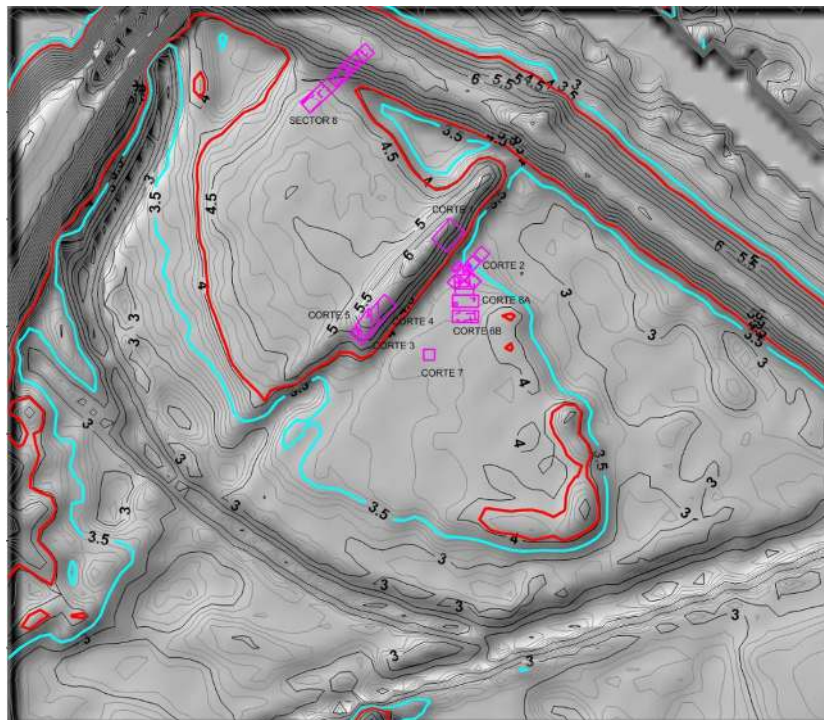
**Figura 2.43:** Reconstrução paleogeográfica da localização do sítio arqueológico de *Cerro del Villar*. Este aparece como uma barra fluvial no que seria um antigo estuário (marcado com ponto vermelho).

O sítio de *Cerro del Villar* servia de porta de entrada em direção às terras altas de Granada e aos campos de Córdoba e de Sevilla até Tartessos. Este sítio é um dos acessos naturais mais importantes desde a costa de Málaga até ao interior, dominando o vale do rio Guadalhorce, a principal artéria de comunicação entre a costa e Vega de Antequera e Genil. Em termos gerais, este local mostra um urbanismo muito complexo (Figura 2.43), em que o padrão urbano está organizado na base de grandes vivendas separadas por pátios e ruas porticadas com áreas de mercado, restos de possíveis edifícios portuários, a presença de uma provável muralha e vestígios de um cinturão industrial que rodeava o perímetro setentrional do local.

Se forem consideradas as bases cartográficas disponíveis, convenientemente tratadas, estas permitem que se observem aspetos de interesse à investigação arqueológica.

### 1. Modelo Digital de Terreno (Folha 1053 IGN – 7 de fevereiro de 2018<sup>1</sup>)

A análise do MDT (Figura 2.44) permite traçar as curvas de nível atuais, em que se foi omitido o relevo modificado da parte central, produzido por uma conduta contemporânea e pela antiga via férrea, é detetado um *platô* definido entre as altitudes 3.5 a 4.1 m, cuja morfologia é muito parecida a uma elipse e que coincide com a reconstrução paleogeográfica (Figura 2.43).



**Figura 2.44:** Modelo Digital de Terreno (MDT) permite a elaboração de um mapa de isolinhas. Neste caso foram produzidas curvas de nível a cada 0.1 m para enfatizar o relevo e assinalaram-se as linhas de altitude 3.5 m com cor azul e de 4.1 m com cor vermelha para realçar a semelhança morfológica com a reconstrução paleogeográfica.

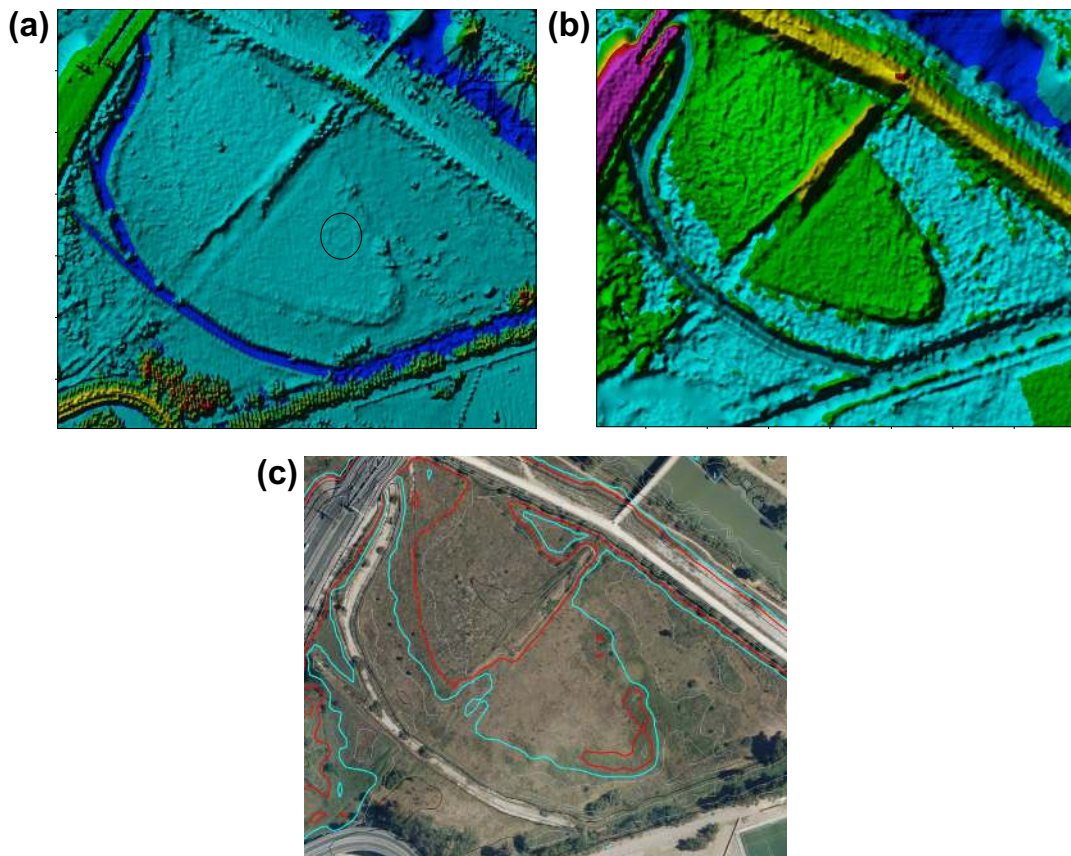
<sup>1</sup> Disponível em: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>

## 2. Mapas elaborados com dados de LIDAR (Folha 1053 IGN – 7 de fevereiro de 2018<sup>1</sup>)

Neste caso foram produzidos dois mapas, um considerando a elevação das primeiras reflexões (Figura 2.45a) e outro considerando o grupo de segundas reflexões (Figura 2.45b). O primeiro está muito marcado pela vegetação, embora mostre também a morfologia da antiga “ilha-barra fluvial” e as suas orientações predominantes. Observa-se um alinhamento em forma de recinto (círculo negro) que constitui um potencial alvo de estudo. Por seu lado, o segundo mapa corresponde ao “terreno”, uma vez que foram eliminadas muitas das reflexões originadas pela vegetação. A imagem resultante mantém o mesmo alinhamento identificado e também outro, menos visível, situado a norte do primeiro. Observam-se algumas direções estruturais que também constituem um alvo de estudo.

## 3. Ortofotografia PNOA-MA (Folha 1053 IGN – 7 de fevereiro de 2018<sup>1</sup>)

Esta ortofotografia (Figura 2.45c) foi usada para gerar mapas de situação para destacar alguns dos aspetos edafológicos que possuem relação com as orientações identificadas.



**Figura 2.45:** (a) Mapa elaborado com dados de LIDAR provenientes da primeira reflexão da onda, que se assemelha ao relevo da vegetação. (b) Mapa elaborado a partir das últimas reflexões da onda, que se assemelha ao relevo do solo. (c) Ortofotografia com representação das curvas de nível da altitude 3.5 m (azul) e 4.1 m (vermelho).

#### 4. Ortofotografia de infravermelho (Junta de Andalucía – Base de dados Rediam<sup>2</sup>)

Na Figura 2.46 existe uma divisória do terreno que chama a atenção, provocada por uma antiga via férrea, que parece mais larga do o que se vê no local a olho nu, particularmente no extremo SW, antes do limite com o canal de drenagem, concordante com a anomalia magnética forte correspondente à vala com uma conduta metálica. Existe outro alinhamento, junto do bordo SE da “ilha-barra”, em que a falsa cor possui uma coloração vermelha mais intensa, que normalmente é associada a uma maior vitalidade de vegetação. Isto poderá indicar que há probabilidade de existirem estruturas que estarão mais profundas uma vez que a camada de terra fértil sobre as mesmas é maior. Por sua vez, esta zona mais colorida aparece rodeada por uma curva de nível de altitude superior. O oposto ocorre no limite NW, em que as cores mais claras são coerentes com estruturas mais superficiais.



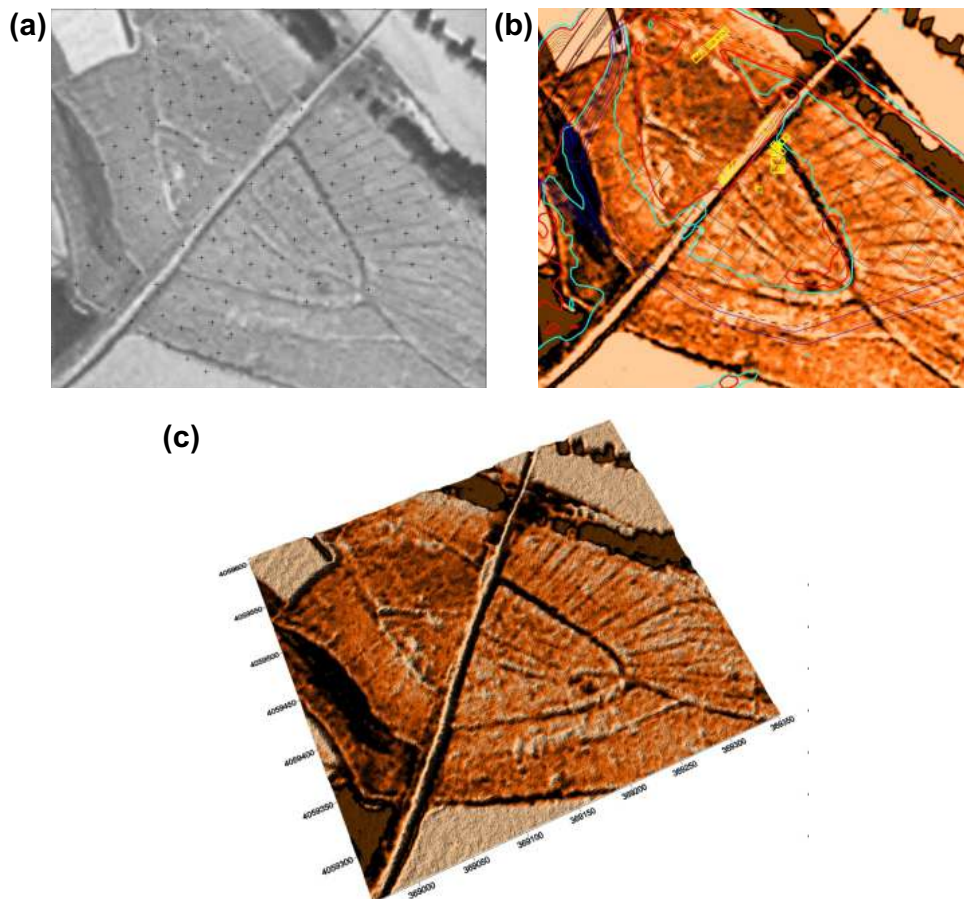
**Figura 2.46:** Ortofotografia de infravermelho do local, onde se observam alguns alinhamentos correspondentes a uma antiga linha férrea, onde atualmente está localizada uma conduta metálica. Observam-se também alinhamentos que poderão corresponder a estruturas enterradas a uma maior profundidade.

#### 5. Fotografia do voo americano de 1956-1957 (Folha 1053 IGN – 7 de fevereiro de 2018<sup>1</sup>)

Na Figura 2.47 estão representadas três imagens desse voo correspondentes a uma porção do sítio arqueológico. A primeira (a) é a ortofotografia original georreferenciada, em que foram incorporadas as posições das estacas usadas na exploração geofísica (cruzes negras). A segunda (b) é o resultado da aplicação de um tratamento aos pixéis que formam a imagem para enfatizar as zonas claras e

<sup>2</sup> Disponível em: <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam/>

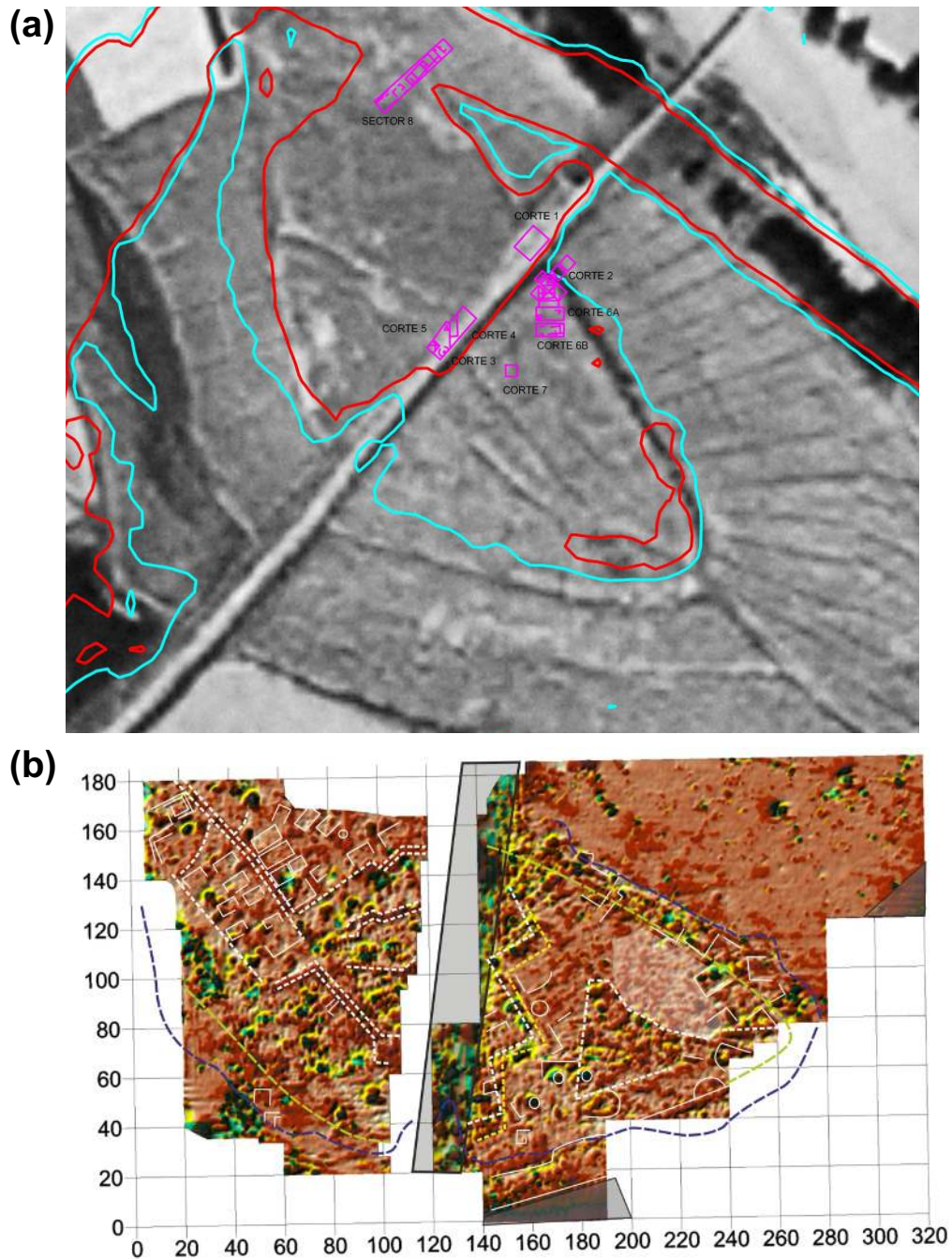
escuras. A terceira imagem (c) é a mesma imagem representada em (b) em que se incorporou o “relevo” associado à cor do pixel. Os tratamentos aplicados à imagem original, que por si mesma proporciona informação valiosa, resultam numa série de alinhamentos e geometrias que podem ser usados como apoio à interpretação geofísica.



**Figura 2.47:** Porção da ortofotografia do voo americano de 1956-1957 correspondente ao sítio arqueológico. (a) Imagem original, em escala de cor cinza, onde foram assinaladas as localizações das estacas usadas na prospeção geofísica. (b) Resultados obtidos pelo processamento da imagem original para se obterem alinhamentos de interesse à exploração arqueológica. (c) Representação da imagem anterior incluindo o “relevo” associado à cor do pixel.

Na Figura 2.48 está representada uma porção da ortofotografia do voo americano em que se sobrepueram as curvas de nível correspondentes às altitudes 3.5 e 4.1 m. De acordo com uma comunicação oral de Suárez & Peral (2019), a maioria das parcelas observadas poderiam corresponder a plantações de canas. A partir da comparação pode observar-se a forma como os limites de parcelas dos lados oriental e meridional confluem no sulco de grandes dimensões correspondente à altitude 3.5 m (linha azul), e no setor ocidental correspondente à altitude 4.1 m (linha vermelha), que marca as divisórias das parcelas. Ao comparar as altitudes atuais com os alinhamentos da fotografia antiga observam-se três áreas onde o terreno parece ter sofrido modificações nos últimos anos, assinalados com linhas amarelas.





**Figura 2.48:** (a) Porção da ortofotografia do voo americano de 1956-1957 correspondente ao sítio arqueológico, em que se sobrepueram os cortes arqueológicos e as curvas de nível que definem a “ilha-barrá”. (b) Mapa de anomalias magnéticas com outra escala gráfica de valores.

A análise de todas as fontes de informação cartográfica apresentadas facilita a interpretação arqueológica da exploração magnética, sobretudo pela ajuda a estabelecer a diferenciação entre o sistema arqueológico e o magnetismo biológico e contemporâneo.



## CAPÍTULO 3

### MELHORIA DA IMAGEM DE GPR-3D ATRAVÉS DE DECOMPOSIÇÃO EM VALORES SINGULARES

#### ALGORITMO SVD

Por vezes o processamento aplicado a um conjunto de dados de GPR não torna evidente a existência de estruturas enterradas no local, não pela ausência destas, até porque por vezes o contexto arqueológico permite inferir que existe forte possibilidade destas se encontrarem no local, mas devido a baixos valores da razão sinal/ruído, que confere ao cenário baixa perceptibilidade e impede uma eficaz compreensão sobre dados obtidos. Nestas condições adversas de baixo contraste, a eliminação do ruído de fundo dos radargramas sem afetar muito o nível do sinal é um fator crucial para aumentar o grau de amplitude do sinal útil.

O objetivo deste capítulo é o estabelecimento de uma nova metodologia capaz de eliminar, na medida do possível, o ruído de fundo dos radargramas sem modificar o sinal útil de GPR. Para isso, foi seguido um procedimento que consiste na identificação do ruído de fundo sob condições controladas. Partiu-se da comparação entre radargramas obtidos de um modelo real criado em laboratório em ambiente controlado, e de radargramas sintéticos criados de um modelo sintético, em ambiente numérico, que replica o cenário real.

O procedimento prossegue com a extração do ruído de fundo realizada através do estudo do sinal no domínio espectral e com recurso à técnica de fatorização de Decomposição em Valores Singulares.

### 3.1. TESTE LABORATORIAL (AMBIENTE CONTROLADO)

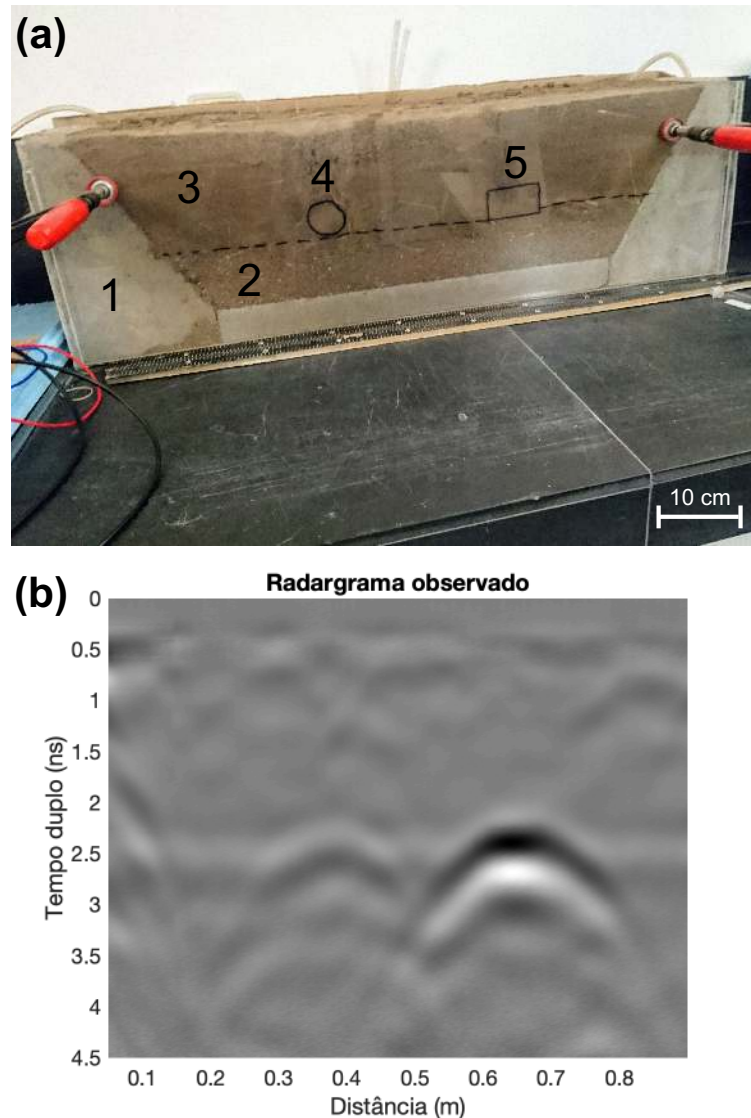
Uma das melhores formas de validar modelos de GPR é através do seu uso para o cálculo dos radargramas sintéticos (problema direto) e sua comparação com os correspondentes radargramas registrados. Para avaliar esta metodologia foi construído laboratorialmente um modelo estrutural sobre o qual se fizeram diversas medições. Paralelamente foi aplicado o problema direto para o cálculo de radargramas sintéticos para um modelo numérico similar ao modelo real. A comparação entre os dois radargramas permitiu verificar que apesar de estarem presentes nos dois conjuntos de dados, as reflexões mais importantes, correspondentes aos objetos enterrados, os dados sintéticos não apresentam várias reflexões exibidas nos dados observados e, por isso, foram entendidas como ruído de fundo. Este aspeto foi detetado quando se aplicou um algoritmo de ajuste automático de dados e se verificou que não existia convergência para uma solução, mesmo depois de aplicar filtros de remoção de ruído de fundo para tentar tornar os dados observados mais semelhantes aos dados sintéticos.

Assim, perante a incapacidade de se remover o ruído de fundo através do uso das ferramentas mais convencionais e disponíveis nos programas de tratamento de dados de GPR, o estudo foi direcionado no sentido de se conceber uma metodologia eficaz e personalizada para que o ruído de fundo seja identificado e removido. Essa metodologia foi inicialmente concebida para dados obtidos em contexto laboratorial (ambiente controlado), encontrando-se alguns resultados relatados na publicação Oliveira *et al.* (2016a). Posteriormente foi efetuado um teste com dados de campo (ambiente não controlado), com dados provenientes de um levantamento de GPR realizado na Villa Romana de Horta da Torre (Fronteira, Portugal). Inicialmente foi aplicada a um perfil de GPR e depois à totalidade dos perfis usados para produzir o modelo de GPR-3D.

#### 3.1.1. Modelo laboratorial

O primeiro teste laboratorial começou com a criação de um modelo real de escala reduzida capaz de ser replicado numericamente. Foi um modelo baseado nas experiências realizadas pelo Laboratório Central de Pontes e Estradas (Bitri & Grandjean, 1998), em Nantes (França). O modelo foi construído no interior de uma caixa de acrílico (Figura 3.1a) onde foi colocado solo proveniente de um sítio arqueológico prospetado (Vila Romana de Horta da Torre), separado em duas granulometrias diferentes para definir duas camadas. A base e os limites laterais do modelo foram construídos em argamassa de cimento, permitindo que a parte preenchida por solo defina uma forma trapezoidal. No meio do solo, em localizações e orientações conhecidas, foram colocados objetos: um cilindro oco de plástico, e um prisma maciço de alumínio. A permitividade dielétrica relativa e a condutividade elétrica dos materiais que definem o modelo laboratorial foram determinadas experimentalmente e os valores de permeabilidade magnética não foram medidos uma vez que tendem sempre para a unidade, qualquer que seja o material.

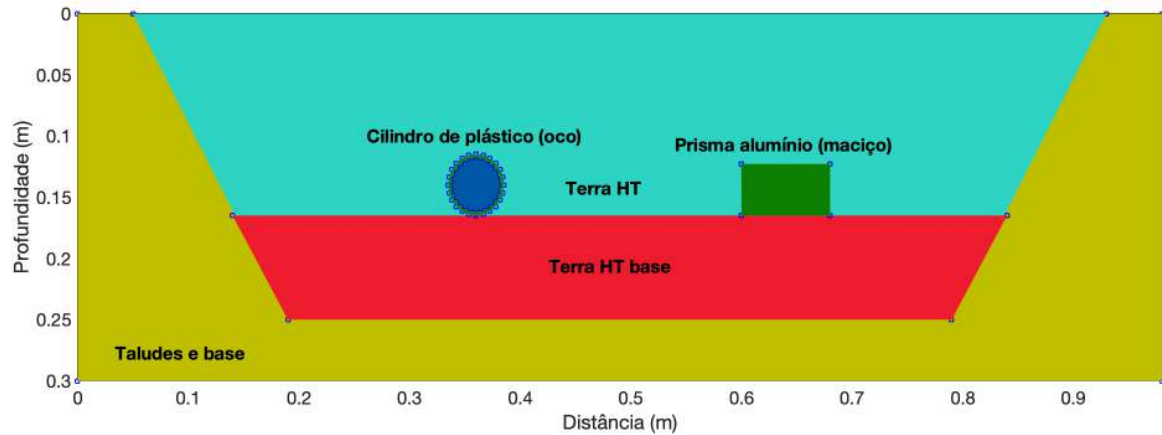
Sobre este modelo foram definidos perfis longitudinais e realizadas aquisições de GPR, com o equipamento GSSI SIR-3000 com antena de 1.6 GHz. Os radargramas desses perfis serão usados como dados de entrada neste estudo. A Figura 3.1b mostra o radargrama registado num desses perfis.



**Figura 3.1:** (a) Modelo real criado em laboratório, onde foi adquirido um perfil 2D de GPR e determinados os valores dos parâmetros físicos necessários à criação do modelo sintético. (1) Taludes e base em argamassa de cimento. (2) Solo (camada 1). (3) Solo (camada 2). (4) Cilindro de plástico, oco. (5) Prisma de alumínio, maciço. (b) Radargrama adquirido com uma antena de 1.6 GHz, sobre o modelo laboratorial (dados brutos).

### 3.1.2. Modelo sintético

A construção do modelo sintético (Figura 3.2) e o cálculo do radargrama sintético equivalente ao radargrama do modelo laboratorial (Figura 3.3) foram realizados com o programa livre MatGPR R2 (Tzanis, 2010), que parametriza o modelo e reproduz numericamente a geometria, a localização espacial e os parâmetros físicos de cada objeto presente no modelo laboratorial.



**Figura 3.2:** Representação gráfica do modelo sintético criado a partir do modelo real criado em laboratório, obtido pelo programa MatGPR R2. (1) Taludes e base em argamassa de cimento. (2) Solo (camada 1). (3) Solo (camada 2). (4) Cilindro de plástico, oco. (5) Prisma de alumínio, maciço.

Os parâmetros físicos que são requeridos como dados de entrada para cada material parametrizado no modelo sintético são os definidos no formalismo teórico que governa a propagação da OEM num meio: a permissividade dielétrica relativa (constante dielétrica), a condutividade elétrica e a permeabilidade magnética. Estes valores foram determinados para cada material (Tabela 3.1). Para materiais como o ar e o prisma de alumínio, na impossibilidade de efetuar medição experimental da resistividade elétrica, usaram-se valores baseados em valores tabelados, de modo a que o modelo sintético, em ambiente numérico, permita a sua introdução. No caso do ar, uma vez que é um material isolante, é altamente resistivo, usou-se um número várias ordens de grandeza superior ao valor dos restantes materiais; e no alumínio, pelo contrário, sendo um metal, possui um valor de resistividade muito baixo, tendo-se usado um valor várias ordens de grandeza inferior ao valor dos restantes materiais.

**Tabela 3.1:** Parâmetros físicos dos materiais que constituem o modelo laboratorial, para serem considerados no modelo sintético. Nos materiais assinalados com (\*) foram usados valores compatíveis com o algoritmo.

Material	Resistividade elétrica ( $\Omega.m$ )	Constante dielétrica	Velocidade de propagação (m/ns)	Permeabilidade magnética relativa
Argamassa de cimento	3000	5.0	0.13407	1
Solo (nível 1)	200	3.3	0.16503	1
Solo (nível 2)	184	3.3	0.16503	1
Cilindro de plástico (oco)	100000	5.0	0.13407	1
Ar (parte oca) (*)	1000000	1.0	0.29980	1
Prisma de alumínio (maciço) (*)	1	1.0	0.12099	1

A simulação da propagação da OEM é precedida de uma etapa prévia de parametrização do modelo de diferenças finitas onde é necessário adequar a dimensão da célula elementar ao valor da frequência central ( $f_c$ ) da antena a considerar e do valor da velocidade de propagação mínima não dispersiva ( $v_{min}$ ). De acordo com Bano (1996), Irving & Knight (2006) e (Tzanis, 2010), a discretização do espaçamento vertical ( $dz$ ), do espaçamento horizontal ( $dx$ ), da distância entre traços, do intervalo entre amostras ( $dt$ ) e o alcance temporal do traço (tempo duplo) devem respeitar os valores máximos dados pelas seguintes equações:

$$dz_{max} = \frac{v_{min}}{8f_c} \quad 3.1$$

$$dx_{max} = 2dz \quad 3.2$$

$$dt_{max} = \frac{1}{8f_c} \quad 3.3$$

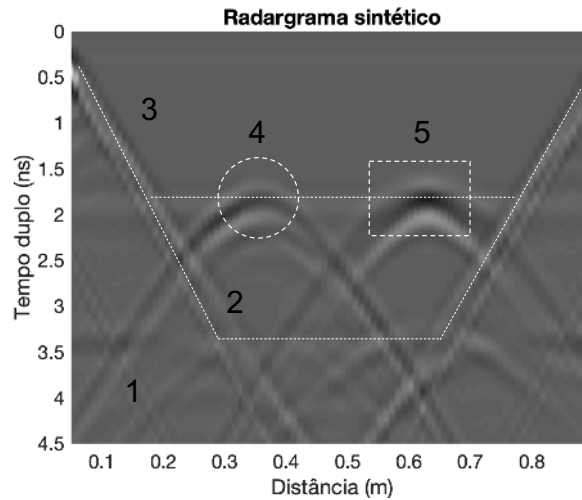
O valor de  $dz$  deve garantir uma discretização adequada, uma vez que para velocidades de propagação maiores, maior será a dimensão de  $dz$  e  $dx$ ; tendo como consequência a obtenção de modelos com menor resolução. Já o valor da frequência central, quanto maior for, menor será a dimensão de  $dz$  e  $dx$ , produzindo por isso modelos de maior resolução. Para o cálculo do radargrama sintético deste caso laboratorial foram usados parâmetros de modo a recriar o radargrama adquirido experimentalmente (Tabela 3.2). Estes valores são inferiores aos máximos permitidos pelo algoritmo e foram escolhidos em função dos valores dos parâmetros do radargrama observado.

**Tabela 3.2:** Parametrização experimental usada para o cálculo do radargrama sintético, para o caso laboratorial e valores máximos admissíveis pelo algoritmo.

Parâmetro	Valor experimental	Valor máximo
Frequência central ( $f_c$ )	1.6 GHz	n.a.
Espaçamento vertical ( $dz$ )	0.002518 m	0.002518 m
Espaçamento horizontal ( $dx$ )	0.002000 m	0.005036 m
Espaçamento entre amostras ( $dt$ )	0.004888 ns	0.005309 ns
Alcance temporal	5 ns	n.a.

Concluída a etapa de parametrização torna-se possível efetuar o cálculo do radargrama sintético, que será realizado através de um algoritmo baseado num método de diferenças finitas no domínio do tempo (Irving & Knight, 2006). A solução deste problema direto através de diferenças finitas, no que respeita ao tempo de execução, é um processo que pode ser bastante demorado (horas ou dias), especialmente em situações de modelos de elevada dimensão ou de frequência central de valor elevado, podendo até ocorrer saturação da memória RAM alocada ao programa MATLAB.

O radargrama sintético obtido (Figura 3.3) apresenta reflexões correspondentes aos objetos contidos no modelo sintético definido. Salienta-se que, por comparação com o radargrama experimental, este possui consideravelmente menos ruído de fundo, estando os refletores correspondentes aos objetos enterrados muito bem definidos, assim como o contacto entre os solos de granulometria diferente.



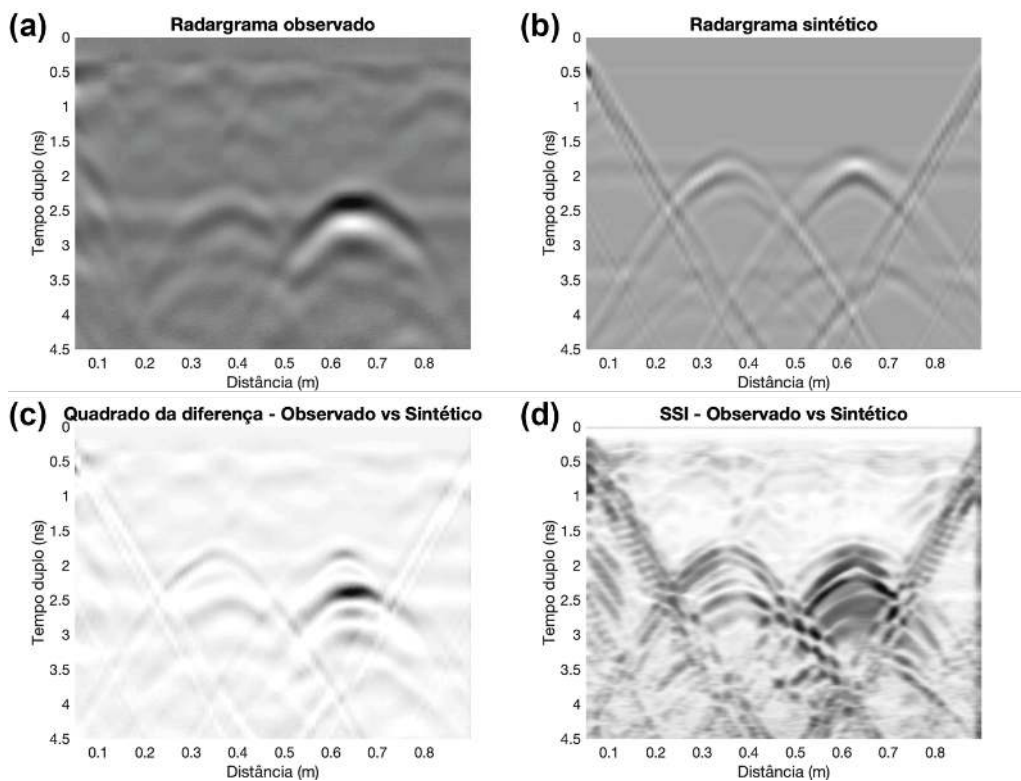
**Figura 3.3:** Radargrama sintético calculado com o programa MatGPR R2. (1) Taludes e base em argamassa de cimento. (2) Solo (camada 1). (3) Solo (camada 2). (4) Cilindro de plástico, oco. (5) Prisma de alumínio, maciço.

### 3.1.3. Comparação de radargramas

Obtido o radargrama sintético, é necessário estabelecer a comparação entre este e o equivalente experimental. Para tal é necessário realizar um pré-tratamento para que os dois conjuntos de dados se tornem comparáveis. Este consiste na subtração, a todos os valores de amplitude do radargrama, do valor médio dos dados (Tzanis, 2010) e na normalização das amplitudes para valores entre 0 e 1. Os dois conjuntos de dados são depois alinhados utilizando um algoritmo de alinhamento automático de imagens da *Toolbox* de Processamento de Imagens do MATLAB (Costin & Rotariu, 2009; Gaudreau-Balderrama, 2012). A função *imregister* efetua o alinhamento de imagens baseado nos valores de intensidade através do mapeamento de píxeis em cada imagem com base em padrões de intensidade relativa. O ajustamento é realizado iterativamente até que as semelhanças entre as duas imagens estejam otimizadas, permitindo as seguintes modificações aos dados: translação, rotação, redimensionamento e corte. Nos dados em questão apenas se permitiu que a modificação dos dados fosse do tipo translação, uma vez que os dados possuem a mesma taxa de amostragem e apenas se encontram em localizações espaciais diferentes, sendo pretendido que estejam sobrepostos nas mesmas localizações, de modo a poder estabelecer-se a comparação. Depois de alinhadas, as partes dos dois conjuntos de dados que não se sobrepõem são eliminadas. Perante duas matrizes com a mesma dimensão e estando alinhadas no espaço, estas estão prontas para serem comparadas.



O estabelecimento da comparação foi efetuado através de diferentes métodos, no sentido verificar que todos os resultados convergem para um resultado idêntico. Aplicou-se o quadrado da diferença dos dois conjuntos de dados, que permite uma boa observação gráfica das diferenças entre os dois conjuntos de dados (um bom ajuste corresponde a uma imagem em que os valores de amplitude são nulos, isto é, uma imagem toda branca). De modo a quantificar a diferença, foi calculado o desvio quadrático médio normalizado (NRMSD), cujo valor nulo corresponderá a dois radargramas sem diferenças. Também foi calculado o Índice de Similitude Estrutural (SSI), que quantifica a similitude entre dois conjuntos de dados (Wang et al., 2004), cujo resultado pode ser representado na forma gráfica (em que são exibidas as diferenças entre os dados) e na forma de percentagem (cujo valor 100 % corresponde a dados iguais). Os resultados encontram-se apresentados na Figura 3.4.



**Figura 3.4:** (a) Perfil de GPR adquirido no modelo laboratorial, com uma antena de 1.6 GHz. (b) Radargrama sintético calculado por diferenças finitas no domínio do tempo. (c) Quadrado da diferença entre os dois conjuntos de dados (observado e sintético), que realça as diferenças. (d) Representação gráfica do Índice de Similitude Estrutural que realça as semelhanças.

A análise gráfica dos resultados mostra que existe uma grande semelhança entre os dados observados (Figura 3.4a) e os sintéticos (Figura 3.4b), nomeadamente pela presença das hipérbolas correspondentes aos objetos enterrados e das reflexões correspondentes aos limites laterais do modelo nas devidas localizações espaciais. As principais diferenças observadas entre os dados observados e sintéticos, através dos diagramas que evidenciam as diferenças e as semelhanças (quadrado da diferença, Figura 3.4c, e Índice de Similitude Estrutural, Figura 3.4d), estão realçadas essencialmente

nas reflexões correspondentes ao objeto metálico, que no modelo real apresentam maior valor de amplitude. Também se verificou que existem perturbações nos radargramas observados, que não existem nos correspondentes sintéticos. São perturbações provocadas por heterogeneidades do solo ou mesmo refletores na superfície que não se relacionam com as estruturas que se procuram caracterizar, daí que se considerem essas perturbações como ruído de fundo. Nos dados sintéticos, o modelo considerado é homogêneo, o que justifica a ausência do ruído identificado. O valor obtido para o parâmetro NRMSD é de 28,8 % e de SSI é de 68,03 %, ambos compatíveis com as diferenças que são observadas graficamente.

As diferenças calculadas entre os dois conjuntos de dados, apesar das semelhanças morfológicas que se observam nas principais reflexões, resultam dos desajustes na posição e amplitudes dos dados sintéticos relativamente aos observados. Não apresentam exatamente as reflexões comuns nos mesmos locais, embora as que correspondem a objetos enterrados existam nos dois conjuntos de dados e se encontram bem localizadas. O maior contributo para essas diferenças resulta das reflexões de fundo que se observam no radargrama observado estão ausentes no radargrama sintético. Essas perturbações consideradas ruído de fundo poderão corresponder a reflexões produzidas por pequenos objetos existentes no solo (heterogeneidades) não considerados no modelo sintético por se estar a usar um modelo relativamente simples. Porém, apesar de não existir informação sobre a variação de pormenor dos parâmetros no modelo, é evidente que essa informação é uma parte importante no conjunto de dados, uma vez que poderá provocar dificuldades na identificação de refletores importantes em ambiente não controlado.

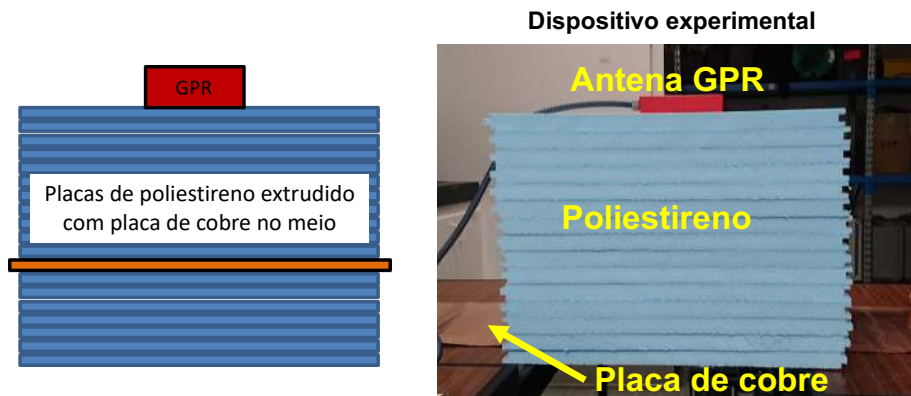
A abundância de reflexões de fundo nos dados observados, produzidas por heterogeneidades distribuídas aleatoriamente, constitui um problema que dificulta ou até impede a interpretação dos dados. A identificação deste problema motivou o desenvolvimento de uma abordagem que permita limpar grande quantidade de ruído presente nos dados e assim permitir que estes possam ser interpretados.

Para descartar a hipótese de o problema poder dever-se à propagação da OEM no caso sintético, o trabalho foi dirigido no sentido de se estudar a aplicação da operação de desconvolução de uma forma personalizada aos dados, para se remover o efeito da forma de onda emitida pela antena de GPR nos dados observados, permitindo reduzir a sobreposição de reflexões e melhorando a precisão da localização temporal de objetos muito próximos (Abdel-Qader et al., 2014). O motivo de se estudar uma forma personalizada de aplicar a desconvolução aos dados de GPR deve-se a que, por vezes, não é possível usar a parametrização que melhor se adequa aos dados devido a que não se conhecer a forma dos pulsos de onda emitidos pelas antenas de GPR. Na maioria dos programas comerciais apenas é possível variar a duração do pulso emitido, cujo valor é limitado a números inteiros, o que impede que a desconvolução seja aplicada de forma personalizada e eficaz a cada conjunto de dados. Assim, tornou-se necessário determinar experimentalmente a forma de onda emitida pelas antenas de GPR

(informação não disponibilizada pelos fabricantes do equipamento) e encontrar um algoritmo que permita aplicar a operação de desconvolução de forma mais flexível e personalizada.

### 3.2. DETERMINAÇÃO DA FORMA DE ONDA

A determinação experimental da forma de onda emitida pelas antenas de GPR foi baseada nos procedimentos laboratoriais desenvolvidos nos estudos de modelação de sinais de GPR aplicados a infraestruturas de transporte (Loulizi, 2001). O ensaio consiste na aquisição de dois perfis de GPR em modo tempo, colocando a antena imobilizada em cima de um conjunto de placas de poliestireno extrudido. Numa das aquisições é colocada uma placa de cobre entre as placas de poliestireno extrudido (Figura 3.5), de modo a que a onda emitida seja refletida pela placa de cobre; na outra aquisição não é usada placa de cobre. A espessura do conjunto de placas de poliestireno e a localização da placa de cobre deve ser escolhida em função da profundidade temporal que se pretende alcançar com a aquisição, devendo permitir que o pulso refletido pela placa de cobre fique perfeitamente individualizado e identificado no traço. Numa antena de 1.6 GHz, para se atingir uma profundidade temporal de 10 ns, deve ser usada uma espessura de pelo menos 0.8 m.

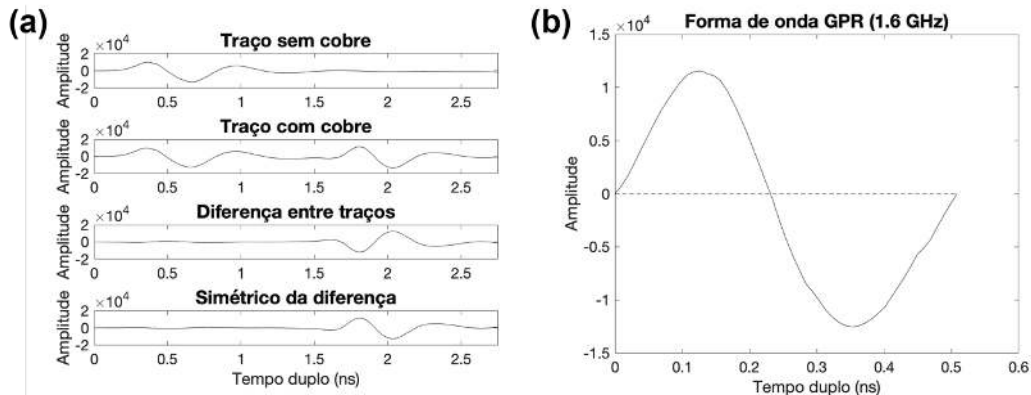


**Figura 3.5:** Esquema de montagem usado para determinar a forma de onda emitida pelas antenas de GPR.

O processamento que se aplica aos dois conjuntos de dados consiste no cálculo do traço médio de cada conjunto de dados (com cobre e sem cobre) e na sua diferença (que anula totalmente as amplitudes dos dois traços, exceto a parte correspondente à onda refletida na placa de cobre (Figura 3.6a). O simétrico do resultado, após ajustar a origem do referencial para o início da onda refletida, corresponderá à forma de onda emitida pela antena de GPR (Figura 3.6b).

O valor obtido para a duração da onda emitida para a antena de GPR de frequência 1.6 GHz é de 0.51 ns, que é compatível com a duração mencionada pelo manual do fabricante, de 0.70 ns, no entanto, o pequeno desvio de 0.19 ns que se observa no valor experimental implica que a frequência central desta antena esteja localizada no valor de 1.9 GHz, que tem como consequência um desvio na gama de frequências que são amostradas no levantamento. Quanto aos valores de amplitude, estes

variam com o ganho aplicado em cada aquisição, necessitando de ser ajustados em função das condições físicas do local, implicando que se proceda ao ajuste do ganho aplicado à onda emitida de modo a que fique com o mesmo usado no momento da aquisição.



**Figura 3.6:** (a) Do topo para a base: traço médio sem a placa de cobre; traço médio com a placa de cobre; diferença entre os dois traços; traço resultante (simétrico da diferença entre os traços). (b) Forma de onda emitida pela antena de GPR de frequência 1.6 GHz depois de ajustar o traço resultante à origem.

### Desconvolução iterativa

A informação que se obteve sobre a forma de onda emitida pela antena de GPR será usada na operação de desconvolução. Depois de estudar sem sucesso a aplicação de diferentes funções disponíveis no programa MATLAB para efetuar a operação de desconvolução (desconvolução e desconvolução de *Wiener*), optou-se por testar, com sucesso, um algoritmo iterativo no domínio do tempo, utilizado em sinais complexos em Sismologia para a obtenção de funções recetoras (Ligorria & Ammon, 1999). Este algoritmo é baseado na minimização, através do método dos mínimos quadrados, da diferença entre a componente horizontal dos sismogramas observados e o sinal estimado, gerado pela convolução de um grupo de onda do tipo *spike*, iterativamente atualizado, com a componente vertical do sismograma (Ligorria & Ammon, 1999). Como os dados de GPR são traços muito semelhantes aos traços sísmicos e as questões que justificam a desconvolução por este método são semelhantes nos dois problemas, isso justifica a aplicação do algoritmo neste problema. Para se comprovar a adequação deste juízo, irá ser aplicado apenas a um traço, antes de se aplicar a um radargrama.

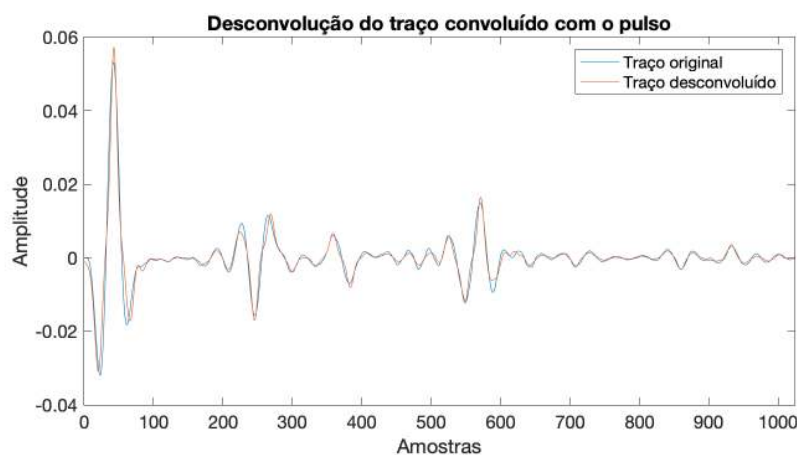
Os parâmetros de entrada do algoritmo são os seguintes: traço (GPR), pulso (forma de onda emitida), taxa de amostragem, número de amostras em cada traço, desfasamento temporal (opcional), filtro Gaussiano (largura), número máximo de iterações, e valor de corte para o erro (critério de convergência). A dimensão do traço e do pulso deve ser a mesma e deve ter o dobro da dimensão inicial para que não haja corte de dados nos resultados, portanto, é necessário adicionar zeros nas matrizes de dados até que fiquem com a dimensão certa (*zero padding*). A taxa de amostragem é a mesma do radargrama e a largura do filtro Gaussiano tem de ser testada até que se obtenha um valor mínimo de RMS e sem que sejam introduzidas deformações espaciais ao resultado obtido. O valor de corte para

o erro não tem de ser necessariamente pequeno para que produza o menor desvio. Depois de se testar para valores muito baixos, que por vezes provocaram instabilidade na compilação do algoritmo, provocando um aumento do RMS, foi usado um valor baixo que não provoque essas instabilidades, devendo por isso ser testado para cada caso.

Para testar o algoritmo usou-se um traço de um radargrama sintético calculado a partir do modelo numérico que reproduz o modelo de laboratório. O traço foi convoluído com o pulso da onda emitido pela antena, determinado anteriormente. O traço convoluído foi depois desconvoluído do pulso, usando o algoritmo iterativo. No teste realizado, a parametrização usada encontra-se enunciada na Tabela 3.3, tendo sido obtido um RMS no valor de  $7.71683 \times 10^{-5}$ , usando um valor de corte para o erro de 0.000001, num total de 3987 iterações realizadas. O traço desconvoluído resultante é praticamente o mesmo que o original (Figura 3.7), demonstrando que a abordagem de Ligorria e Ammon (1999) é aplicável aos dados de GPR.

**Tabela 3.3:** Parametrização usada para o cálculo do radargrama sintético, para o caso laboratorial.

Parâmetro	Valor
N.º de amostras	2047
Desfasamento temporal	0
Largura do filtro Gaussiano	15
N.º máximo de iterações	30000
Valor de corte para o erro	0,000001



**Figura 3.7:** Resultado do teste ao algoritmo de Ligorria e Ammon (1999), mostrando o traço original e o traço desconvoluído, muito semelhante ao original.

Aplicando a abordagem em teste a um radargrama observado (Figura 3.8a), verifica-se que no resultado obtido (Figura 3.8b) desapareceram algumas reflexões que podiam ser consideradas reflexões

múltiplas, tendo como consequência um aumento da definição gráfica de alguns contornos das reflexões que correspondem aos objetos enterrados. O valor médio de RMS obtido foi de aproximadamente  $1 \times 10^{-3}$ , usando um valor de corte para o erro de 0.001, tendo sido efetuadas para cada traço entre 95 e 150 iterações.

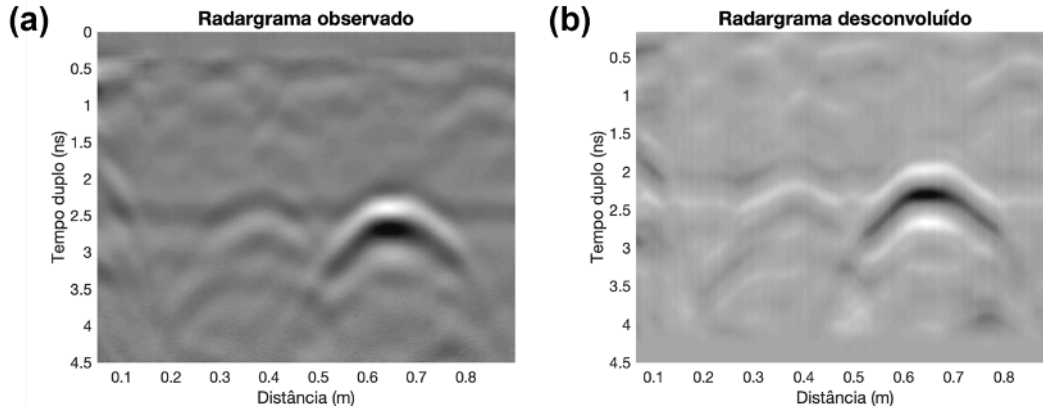


Figura 3.8: (a) Radargrama antes da desconvolução. (b) Radargrama depois da desconvolução.

O passo seguinte consistiu no ajustamento automático entre o radargrama observado desconvoluído (Figura 3.9a) e o radargrama sintético (Figura 3.9b), através da abordagem experimental atrás descrita.

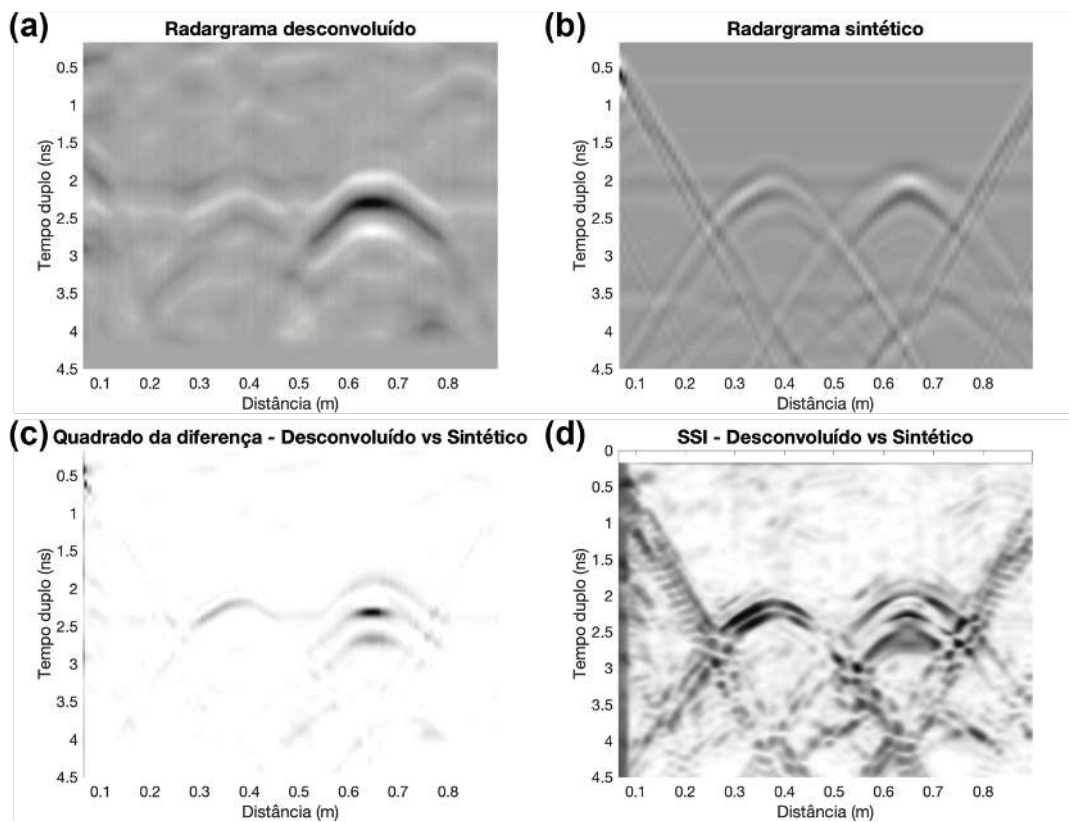


Figura 3.9: (a) Radargrama observado desconvoluído. (b) Radargrama sintético. (c) Diferença ao quadrado entre (a) e (b), depois de alinhados. (d) Índice de Similitude Estrutural.

A diferença entre os dados, evidenciada quando se representa graficamente o quadrado das diferenças (Figura 3.9c) e o SSI (Figura 3.9d), continua a ser maior nas reflexões correspondentes ao prisma maciço de alumínio. O valor do NRMSD é de 19.6 % (- 9.2 % relativamente ao procedimento mostrados na Figura 3.4) e o valor de SSI é de 72.81 % (- 4.78 %) depois de se aplicar a desconvolução iterativa. O desvio que se observa, quer graficamente, quer pelo valor de NRMSD e SSI, poderá indicar que a parametrização do modelo sintético poderá necessitar de maior ajuste de modo a que os dados sintéticos gerados sejam mais próximos dos observados (não considerando o ruído de fundo que não se consegue adicionar ao modelo sintético).

A aplicação com sucesso da operação de desconvolução iterativa a dados obtidos em laboratório, em ambiente controlado, parece sugerir que esta abordagem de desconvolução pode ser testada igualmente com sucesso em dados obtidos em campo, em ambiente não controlado. Antes, será ainda testada uma abordagem de estimativa do ruído de fundo para sua filtragem do conjunto de dados.

### 3.3. ESTIMATIVA E REMOÇÃO DO RUÍDO DE FUNDO NO DOMÍNIO ESPETRAL

A presença de ruído de fundo num radargrama, como foi já referido, prejudica a sua interpretação, sobretudo perante condições de baixa perçetibilidade, pois dificulta ou mesmo impossibilita a distinção entre as componentes correspondentes ao sinal útil e ao ruído de fundo. Nos programas comerciais de processamento de dados de GPR, os filtros usados para remover o ruído de fundo nem sempre são suficientemente eficazes, sendo frequentes os casos em que este não é de todo removido ou é removido em excesso juntamente com a informação útil.

Face ao problema observado nos programas comerciais surge uma questão: será possível considerar o conjunto dos dados que compõem o radargrama e classificar a informação nele contida em informação útil *versus* ruído?

Para responder à questão, a bibliografia sugere diversas abordagens aplicadas a imagens com ruído, com recurso a filtros espaciais. Uma são abordagens que podem ser aplicadas no domínio do espaço, pixel a pixel (Fialka & Čadík, 2006; Hirani & Totsuka, 1996). Outras são aplicadas no domínio da frequência, convertendo os dados para o domínio de *Fourier* (Fialka & Čadík, 2006; Gonzalez & Woods, 2002). Nos filtros aplicados no domínio do espaço, em que o termo espacial se refere ao plano da própria imagem, o filtro é aplicado através da manipulação de cada pixel que compõe a imagem, apenas permitindo um controlo local da sua aplicação, não possuindo qualquer informação sobre a estrutura geral da imagem e, em diversas situações, estando a sua ação limitada aos vizinhos próximos devido a constrangimentos computacionais (Hirani & Totsuka, 1996). A aplicação do filtro é realizada através da convolução dos dados com a matriz que define o filtro, cujo esforço computacional é crescente com o aumento da quantidade de dados (Fialka & Čadík, 2006).

Os filtros aplicados no domínio da frequência consistem na modificação da transformada de *Fourier* da imagem (Gonzalez & Woods, 2002), o que permite atuar na sua estrutura, no entanto, com perda do controlo local comparativamente aos filtros aplicados no domínio espacial. A sua aplicação é efetuada através da multiplicação dos dados transformados com a matriz que define o filtro igualmente transformada. Esta operação é mais simples que a convolução e provoca a diminuição do esforço computacional que passa a ser constante qualquer que seja a quantidade de dados (Fialka & Čadík, 2006).

### 3.3.2. Transformada discreta de *Fourier* 2D aplicada a imagens de GPR

De acordo com Gonzalez and Woods (2002), a transformada discreta de *Fourier* de uma imagem definida por uma função  $f(x, y)$  de dimensão  $M \times N$  é dada pela seguinte equação:

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)} \quad 3.4$$

em que  $j$  é a unidade imaginária do número complexo,  $u$  e  $v$  são variáveis de transformação ou de frequência,  $x$  e  $y$  são variáveis de imagem ou de espaço.

A partir de  $F(u, v)$  é possível obter  $f(x, y)$  através da aplicação da transformada inversa de *Fourier*:

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{j2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)} \quad 3.5$$

As partes real e imaginária de  $F(u, v)$  são definidas respetivamente por  $R(u, v)$  e  $I(u, v)$ , designadas por coeficientes de Fourier. A partir destes é possível definir o espetro de amplitudes (Equação 3.6) e o espetro de fases (Equação 3.7). O espetro de amplitudes possui informação sobre a distribuição de energia do sinal através da frequência. O espetro de fases possui informação acerca da estrutura do sinal, e, tipicamente, contém maior quantidade de informação que o espetro de amplitudes (Hansen & Hess, 2007).

$$|F(u, v)| = \sqrt{R^2(u, v) + I^2(u, v)} \quad 3.6$$

$$\Phi(u, v) = \tan^{-1}\left(\frac{I(u, v)}{R(u, v)}\right) \quad 3.7$$

Geralmente, costuma-se multiplicar a matriz da imagem por  $(-1)^{x+y}$  depois de calcular a transformada discreta de *Fourier*, de modo a que a origem de  $F(u, v)$  seja deslocada (*shift*) para passar a estar localizada em  $\left(\frac{M}{2}; \frac{N}{2}\right)$ , ou seja, no centro da área  $(M \times N)$ . De salientar que  $u$  e  $v$  são números inteiros e  $M$  e  $N$  são números inteiros pares.



Ainda sobre a transformada discreta de *Fourier* 2D, se  $f(x, y)$  é real, então a sua transformação de *Fourier* é simétrica do seu conjugado,

$$F(u, v) = F^*(-u, -v) \quad 3.8$$

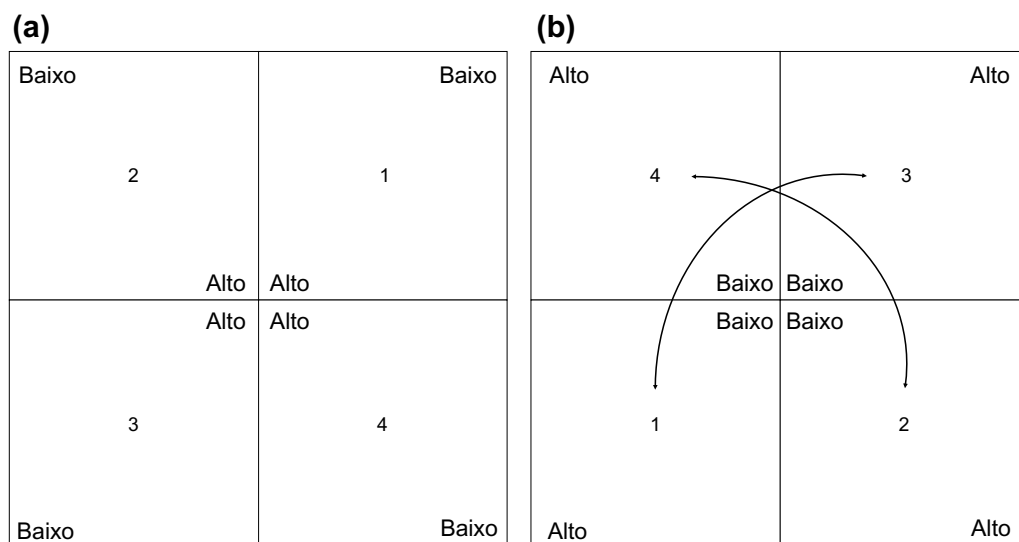
Em que \* indica a operação de conjugação de um número complexo.

Da equação 3.8 tira-se que o espectro de amplitudes de *Fourier* é simétrico, isto é,

$$|F(u, v)| = |F(-u, -v)| \quad 3.9$$

A simetria conjugada e a propriedade de centralização simplificam significativamente a parametrização de filtros simetricamente circulares no domínio da frequência, sendo uma vantagem o seu uso para processar dados do tipo imagem ou similares, como é o caso dos dados de GPR.

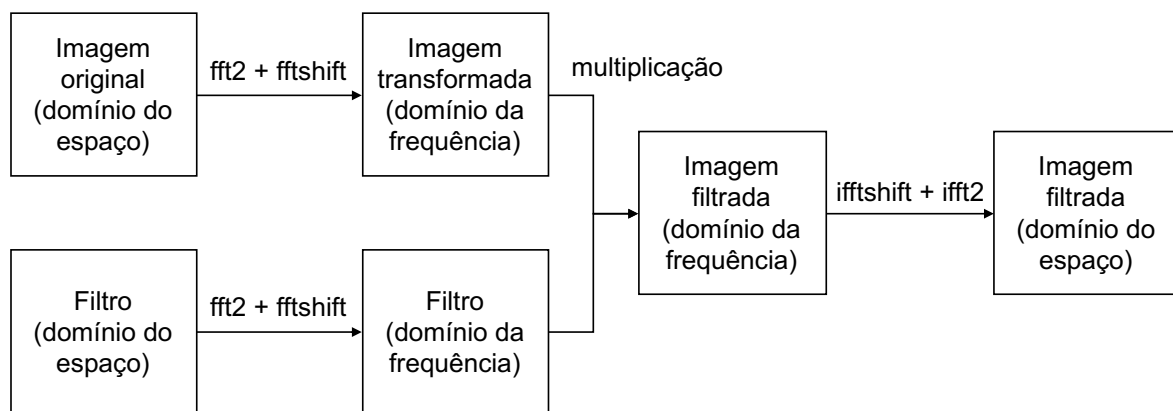
Ao aplicar-se a transformada discreta de *Fourier* 2D a uma imagem, torna-se possível a visualização dos dados em termos de um diagrama de distribuição de frequências (Brown et al., 2001), através da representação do espectro de amplitudes num mapa de gradiente de cor, em que no centro deste está localizado o conteúdo de altas frequências e na periferia o conteúdo de baixas frequências, estando também divididos em quadrantes (Figura 3.10a). Se a posição dos quadrantes for reorganizada, através da aplicação de uma mudança na posição dos quadrantes, de tal forma que as frequências baixas fiquem ao centro do espectro, e as altas na periferia (Figura 3.10b), torna-se mais fácil a aplicação de filtros, uma vez que o sinal útil está localizado nas frequências mais baixas, isto é, no centro do espectro, facilitando assim a parametrização dos filtros.



**Figura 3.10:** (a) Esquema da representação do espectro de amplitudes de Fourier, mostrando a distribuição dos dados transformados em frequências, ficando as de valor alto localizadas no centro do espectro e as baixas na periferia e divididas em quadrantes. (b) Espectro depois de se trocar a posição dos quadrantes, de modo a que as baixas frequências passem a estar localizadas no centro do espectro e as altas na periferia, facilitando a definição da matriz do filtro. Adaptado de Brown et al. (2001).

A aplicação do filtro no domínio da frequência pode então ser efetuada de acordo com a abordagem que se aplica no tratamento de imagens, esquematizada na Figura 3.11 (Gonzalez & Woods, 2002; Shaikh et al., 2016):

1. Aplicação da transformada de *Fourier* aos dados de entrada;
2. Análise espectral dos dados transformados;
3. Definição da matriz que parametriza o filtro;
4. Aplicação da transformada de *Fourier* ao filtro;
5. Multiplicação entre os dados e o filtro (ambos transformados);
6. Aplicação da transformada inversa de *Fourier* para obtenção dos dados filtrados.



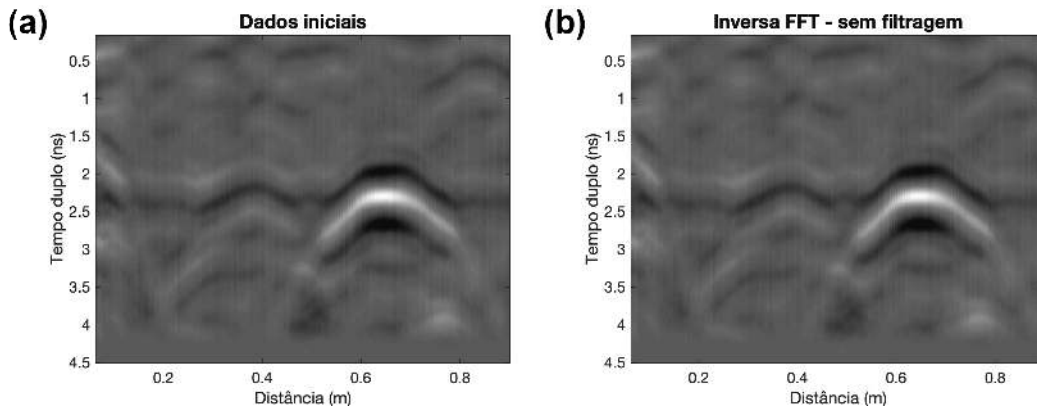
**Figura 3.11:** Esquema da aplicação do filtro no domínio da frequência. Adaptado de Shaikh et al. (2016).

As saídas gráficas do GPR, os radargramas, consistem em mapas bidimensionais de amplitudes. Se forem encarados como imagens, podem *a priori* ser alvo das mesmas técnicas de processamento para remoção do ruído de fundo usando filtros aplicados no domínio de *Fourier*.

### 3.3.2. Análise de um radargrama no domínio de Fourier

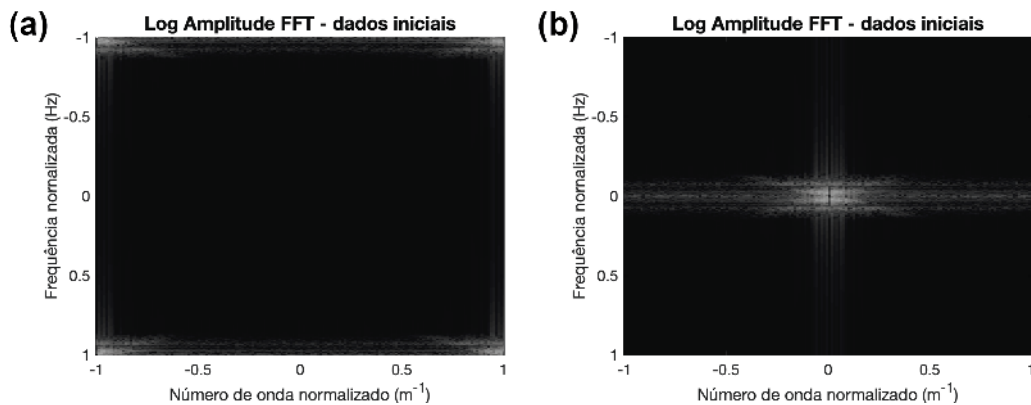
Uma etapa crucial, antes de se poder parametrizar o filtro a aplicar aos dados, é o estudo espectral dos próprios dados, depois de se aplicar a transformada discreta de *Fourier* 2D.

Como dados de entrada usou-se o radargrama observado depois de desconvoluído (Figura 3.12a). A este foi aplicada a transformada discreta de *Fourier* 2D e fez-se a representação gráfica do espectro de amplitudes e do espectro de fases. De modo a confirmar que a transformada de *Fourier* não introduz qualquer deformação ou modificação aos dados, aplicou-se a inversa da transformada de *Fourier* aos dados transformados (Figura 3.12b), não se verificando qualquer alteração nem deformação.

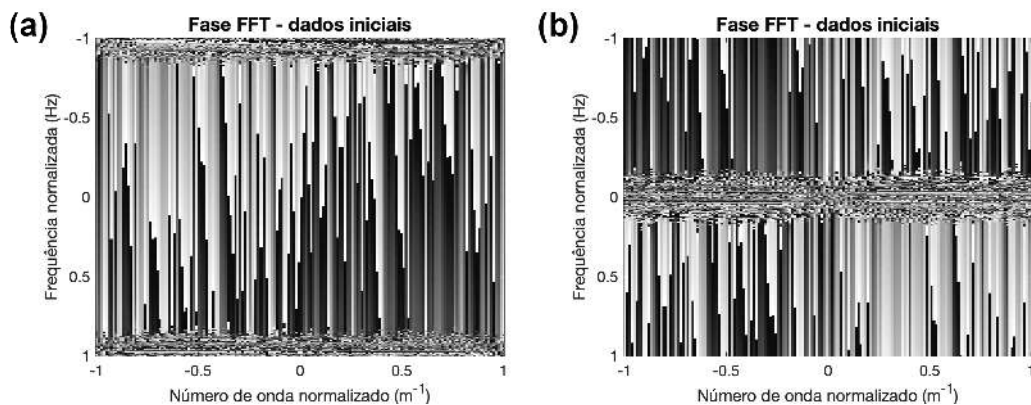


**Figura 3.12:** (a) Dados de entrada: radargrama desconvolvido. (b) Dados de saída: radargrama depois de aplicar a transformada discreta de *Fourier* seguida da operação inversa aos dados de entrada (a), sem aplicação de qualquer operação de filtragem, para verificar que o uso da transformada de *Fourier* não introduz qualquer deformação aos dados de entrada.

O espectro de amplitudes, antes de se aplicar o *shift* (Figura 3.13a) exibe informação na sua periferia. Ao aplicar-se o *shift* esta fica concentrada no centro do espectro (Figura 3.13b). O mesmo acontece com o espectro de fases (Figura 3.14).



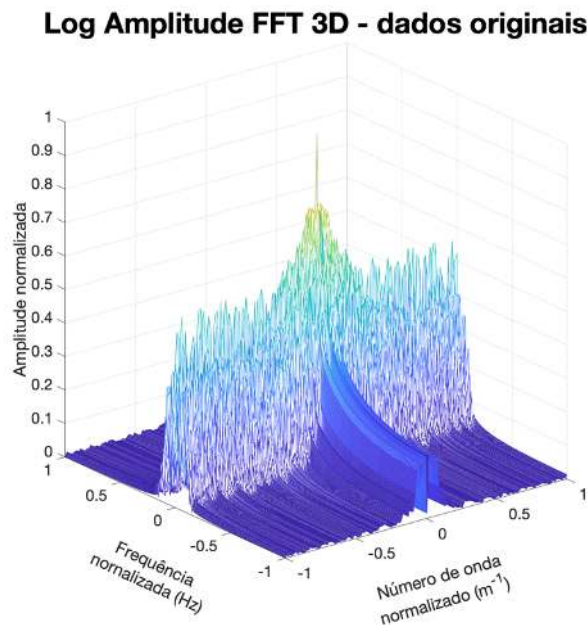
**Figura 3.13:** Espectro de amplitudes dos dados de entrada. (a) Antes da aplicação do *shift*. (b) Depois da aplicação do *shift* (dados ficam centrados e com simetria).



**Figura 3.14:** Espectro de fases dos dados de entrada. (a) Antes da aplicação do *shift*. (b) Depois da aplicação do *shift* (dados ficam centrados e com simetria).

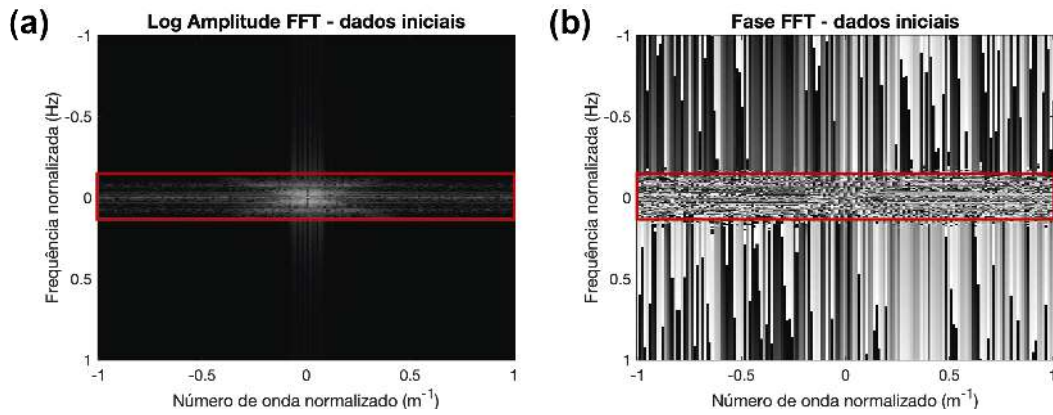
Em termos de interpretação dos espectros, é necessário considerar os dados iniciais antes de se aplicar a transformada discreta de *Fourier* 2D. Um radargrama consiste numa representação gráfica da amplitude em função de  $x$  (eixo das abcissas) e de  $t$  (eixo das ordenadas). Após a transformação para o domínio de *Fourier*,  $x$  é convertido em número de onda  $k$ , e  $t$  em frequência  $f$ , ou seja, o domínio de *Fourier* dos dados de GPR é um espaço bidimensional de frequência – número de onda. Assim, a representação gráfica dos espectros é função do número de onda (eixo das abcissas) e da frequência (eixo das ordenadas). Os valores de frequência encontram-se limitados ao intervalo definido na parametrização da aquisição dos dados, estando definidos apenas na parte central do espectro (considerando o eixo vertical) e os valores de número de onda existem em todo o domínio da função transformada, isto é, em toda a largura do espectro (considerando o eixo horizontal).

Para tentar facilitar a interpretação do espectro de amplitudes, no sentido de localizar os dados úteis do radargrama no espectro, criou-se um gráfico 3D do espectro de amplitudes dos dados de entrada (Figura 3.15). Este modo de visualização permite classificar as amplitudes do espectro em sinal útil, correspondente às amplitudes de maior valor, e ruído de fundo, correspondente às amplitudes nulas e de valor mais baixo. Observa-se também um valor anômalo, *outlier*, localizado no centro do espectro, que corresponde aos valores de número de onda próximos de zero, ou seja, correspondem aos valores elevados de comprimento de onda (domínio espaço – tempo), responsáveis pelo aparecimento de refletores que definem um bandado horizontal (ruído de baixa frequência característico do próprio método de GPR).



**Figura 3.15:** Vista 3D do espectro de amplitudes dos dados de entrada.

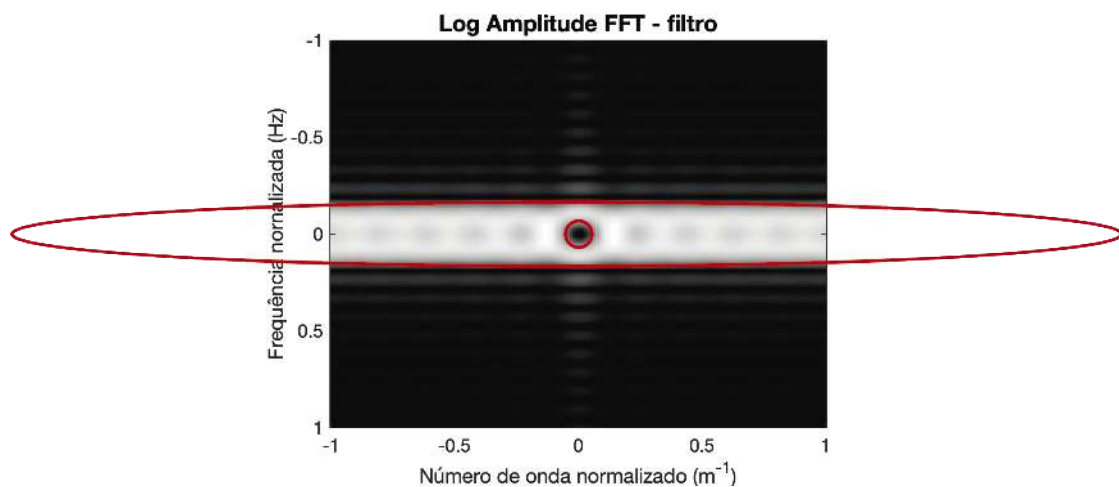
Pela análise dos espectros (Figura 3.16) é possível observar que a informação útil dos dados de entrada está localizada no interior da área definida pela linha de cor vermelha assinalada nos espectros.



**Figura 3.16:** Localização dos dados no espectro de amplitudes (a) e no espectro de fases (b).

De modo a determinar a parametrização do filtro a aplicar no domínio espectral será efetuado um teste à abordagem. A principal intenção é a utilização do conceito de filtro para selecionar informação sem modificar os dados.

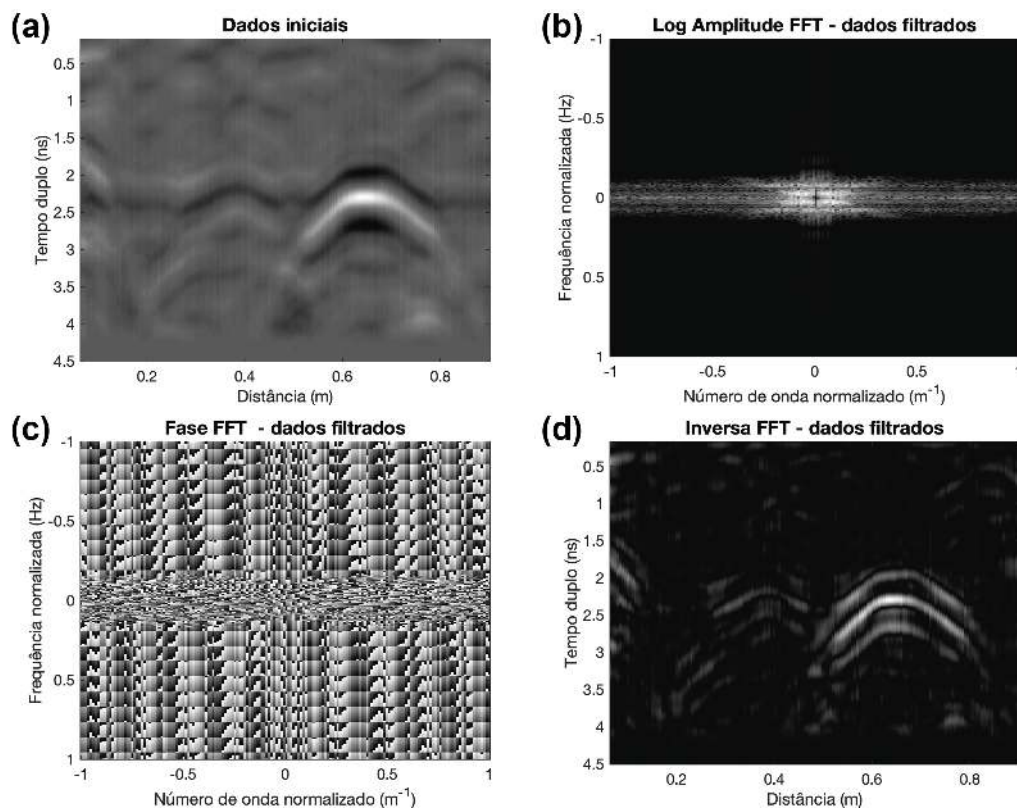
O teste consistiu em definir uma área que contenha a mancha de dados que se observa na Figura 3.16. Do interior dessa área deve ser retirada uma subárea circular em torno de  $k=0$ , para eliminar os valores de número de onda que correspondem a refletores de largo comprimento de onda no domínio do espaço – tempo. O desenho do filtro foi efetuado por parametrização direta do utilizador, por tentativa e erro, até que se desenhasse a área pretendida (Figura 3.17). Para definir a área pretendida foi criada uma forma elíptica de modo que a sua área cubra a totalidade da mancha de dados que se observa no espectro de amplitudes. Para que os valores em torno de  $k=0$  sejam removidos, teve que ser criada uma pequena área com forma circular em torno do centro do espectro. A área total que parametriza o filtro corresponde ao interior da forma elíptica, exceto a parte central definida pela forma circular. O filtro a aplicar será do tipo passa-banda, tomando valor unitário na área a manter e valor nulo na área a eliminar.



**Figura 3.17:** Espectro de amplitudes do filtro parametrizado por tentativa e erro a partir da análise direta do espectro de amplitudes dos dados de entrada. A linha vermelha esquematiza o desenho do filtro.

Depois de desenhado o filtro foi necessário calcular os seus coeficientes através do uso da *toolbox* de Processamento de Imagem do programa MATLAB (Phillips et al., 2008), com recurso às funções *freqspace* e *fsamp2* (Russ, 1998). A função *freqspace* permite obter um intervalo de frequências implícito para respostas de frequência igualmente espaçadas. A função *fsamp2* projeta um filtro FIR bidimensional com a resposta de frequência determinada pela função *freqspace*, devolvendo os coeficientes do filtro.

O passo seguinte consiste na aplicação da transformada discreta de *Fourier* 2D à matriz dos coeficientes do filtro e multiplicar pelos dados de entrada transformados. Para visualizar os dados filtrados, no domínio do espaço – tempo, aplica-se a transformada inversa de *Fourier*. Na Figura 3.18 encontram-se detalhados os resultados do processo de filtragem.



**Figura 3.18:** Resultados da aplicação do filtro no domínio espectral. (a) Dados de entrada no domínio do espaço – tempo. (b) Espectro de amplitude dos dados filtrados. (c) Espectro de fases dos dados filtrados. (d) Dados filtrados no domínio do espaço – tempo.

O processo de parametrização da abordagem por tentativa e erro nos dados obtidos em laboratório, em condições controladas, sabendo onde se encontram os objetos enterrados e sendo evidente a localização das respetivas reflexões no radargrama, é um processo relativamente fácil de implementar.

A abordagem proposta mostra ser muito eficaz, tendo sido possível selecionar, na generalidade, apenas a informação correspondente aos objetos enterrados. No entanto, num cenário em que se esteja perante dados com maior complexidade e/ou com mais ruído de fundo, a tarefa de selecionar os

dados no domínio espectral poderá ficar comprometida por se estar dependente de uma boa parametrização por parte do utilizador. Por esse motivo e existindo técnicas matemáticas de classificação automática de dados, pretendeu-se averiguar a possibilidade de aplicar uma dessas técnicas em dados de GPR de modo a automatizar o processo de seleção dos dados, para que não haja dependência do utilizador.

### 3.3.3. Extração de informação útil usando Decomposição em Valores Singulares

Depois de se verificar a eficácia da seleção de informação útil contida num radargrama surgiu a necessidade de realizar a seleção da informação de um modo automático, sem depender de decisão do utilizador. Existe uma grande diversidade de técnicas de Estatística Multivariada que permitem classificar a informação de um conjunto de dados em componentes principais, atribuindo a cada grupo um determinado peso.

#### *Análise de Componentes Principais*

A Análise de Componentes Principais (PCA) é uma técnica que permite estimar a quantidade de componentes principais presentes num determinado conjunto de dados, através do cálculo dos seus vetores dominantes (Andrews & Patterson, 1976; Kamm & Nagy, 1998; Sadek, 2012). Na PCA, a decomposição em valores próprios da matriz de covariância dos dados está relacionada com a decomposição espectral de uma matriz quadrada  $X$  em  $VLV^T$ , em que  $V$  é ortogonal e  $L$  é diagonal. Se  $X$  for simétrica, então os valores singulares de  $X$  são os valores absolutos dos valores próprios de  $X$ .

Os dados de GPR, sendo dados matriciais semelhantes aos dados do tipo imagem no formato matricial, depois de se aplicar a transformada discreta de *Fourier* 2D, tornam-se simétricos, razão pela qual se pode aplicar PCA para classificar esse conjunto de dados.

#### *Decomposição em Valores Singulares*

A implementação numérica de PCA a dados matriciais do tipo imagem é efetuada através de algoritmos de Decomposição em Valores Singulares (SVD), que pode ser aplicada quer a matrizes de números reais como também de números complexos.

A SVD é uma técnica de fatorização bastante eficaz e estável para dividir um sistema num conjunto de componentes linearmente independentes, cada uma delas associada a um peso dentro do sistema, para diagonalizar matrizes em análise numérica (Andrews & Patterson, 1976; Kamm & Nagy, 1998; Sadek, 2012), sendo bastante útil para processamento de imagens devido à possibilidade de empacotamento de energia máxima geralmente usada em compressão de dados (Jar-Ferr Yang & Lu, 1995; Sadek, 2012; Xu et al., 2004) e à capacidade para manipular imagens para a dividir em dois

grupos, sinal e ruído (Ganic & Eskicioglu, 2004; Konstantinides et al., 1997; Sadek, 2012; Xu et al., 2004), muito útil em filtragem de ruído e com grande capacidade de adaptação às variações locais das estatísticas de uma imagem (Jar-Ferr Yang & Lu, 1995; Sadek, 2012). Em álgebra linear, a SVD consiste na fatorização de matrizes retangulares reais ou complexas, análoga à diagonalização de matrizes quadradas e simétricas usando uma base de vetores próprios (Andrews & Patterson, 1976; Moonen et al., 1992; Sadek, 2012).

De acordo com Sadek (2012), ao aplicar-se a SVD a uma imagem definida por uma matriz  $X$ , de dimensão  $(M \times N)$ , com  $(M > N)$ , a sua reconstrução pode ser efetuada através da combinação linear dos parâmetros calculados depois de selecionar as componentes principais que devem ser usadas na reconstrução (Equação 3.10).

$$X = USV^T \quad 3.10$$

$U$  é uma matriz ortogonal de dimensão  $(M \times N)$ , cujas colunas representam os vetores singulares esquerdos que são vetores próprios de  $(XX^T)$ .  $V$  é uma matriz ortogonal de dimensão  $(N \times N)$ , cujas colunas representam os vetores singulares direitos que são vetores próprios de  $(X^T X)$ .  $S$  é uma matriz de dimensão  $(M \times N)$ , em que os valores da sua diagonal representam os valores singulares de  $(X)$ , que são diferentes de zero, ordenados por ordem decrescente e a sua soma é a unidade.

Na SVD de uma imagem, os valores singulares especificam a luminância das camadas de uma imagem, e os respetivos pares de vetores singulares especificam a geometria de cada camada (Andrews & Patterson, 1976; Kamm & Nagy, 1998). As componentes principais de maior amplitude de uma imagem geralmente correspondem a imagens próprias associadas aos valores singulares de maior valor (Sadek, 2012). A reconstrução de uma imagem decomposta por SVD é efetuada através da combinação linear das componentes principais, podendo ser excluídas algumas componentes principais, correspondentes por exemplo a ruído, sem comprometer a integridade estrutural da própria imagem (Moonen et al., 1992; Sadek, 2008).

#### *Aplicação de SVD a dados de GPR*

Considerando os dados de GPR, estes são definidos por uma matriz de amplitudes definidas por números reais que possuem informação correspondente a estruturas enterradas e a ruído de fundo. Ao aplicar-se a transformada discreta de *Fourier 2D*, a matriz passa a estar definida por números complexos e os seus espectros possuem simetria. Estas características dos dados de GPR são compatíveis com os pressupostos teóricos em torno da técnica de SVD. Assim, na expectativa de que esta seja eficaz neste tipo de dados, torna-se necessário testar a sua aplicação.

O teste foi realizado no programa MATLAB com recurso à função *svd*, usando como dados de entrada o radargrama observado depois de desconvoluído e depois de aplicada a transformada discreta



de *Fourier* 2D. Ao aplicar-se essa função, são calculados os valores e vetores singulares da matriz, ficando armazenados nas variáveis  $U$ ,  $S$ ,  $V$ . A partir de  $S$  (valores singulares) são calculados os pesos que cada componente principal.

A projeção gráfica dos pesos de cada componente principal permitirá determinar quais as que terão maior expressão no conjunto de dados, o que poderá permitir que se possa decidir que componentes deverão ser consideradas na reconstrução dos dados, em detrimento da exclusão das restantes. No caso em estudo (Figura 3.19) é possível verificar que a primeira componente possui um peso muito maior (cerca de 65 %) que as restantes componentes ( $< 10\%$  cada). Para saber que componentes devem ser consideradas na reconstrução da matriz inicial, mantendo apenas a informação útil do radargrama e excluindo o ruído, é necessário fazer alguns testes, por tentativa e erro, para averiguar o efeito da remoção de componentes do conjunto de dados iniciais.

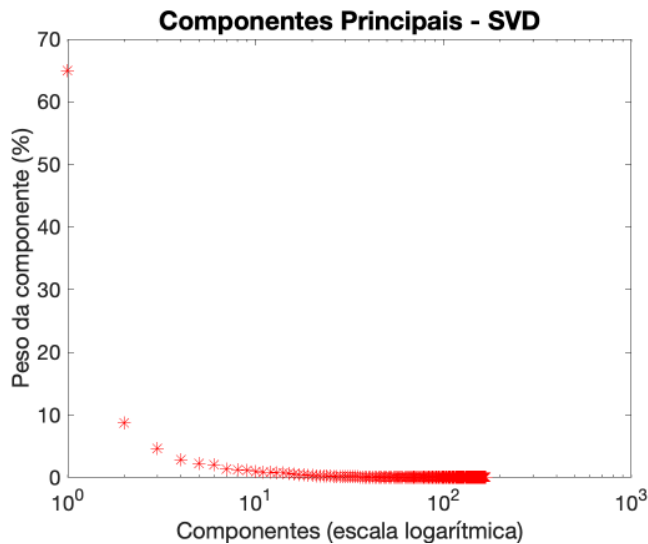


Figura 3.19: Componentes principais de um radargrama, obtidas por SVD dos dados transformados.

O primeiro teste a realizar consiste na reconstrução da matriz inicial dos dados considerando apenas a primeira componente principal, de modo a averiguar se esta, uma vez que possui um peso muito maior que as restantes, corresponde à informação útil do radargrama. Para verificar o efeito da exclusão de um conjunto de componentes principais, os dados terão que ser repostos para o domínio do espaço – tempo. Também se pode observar o espectro de amplitudes (vista 3D) para comparar com o espectro inicial (Figura 3.15).

Mantendo apenas a primeira componente principal, os dados filtrados mostram uma distribuição de amplitudes que não possui qualquer semelhança com os dados iniciais (Figura 3.20a) e o espectro de amplitudes revela que a maior parte da informação foi eliminada, tendo sido mantida apenas a parte correspondente à frequência central. Este resultado sugere que a hipótese da correspondência da primeira componente principal ao sinal útil do radargrama possa ser excluída.

O teste que se segue será a reconstrução da matriz inicial mantendo apenas as duas primeiras componentes principais. O objetivo é verificar a partir de que componente principal começa a ser visível

um padrão parecido com os dados iniciais. Os dados filtrados mostram que também não existe semelhança com os dados iniciais (Figura 3.20b) e o espectro de amplitudes também evidencia que a maior parte da informação nele contida foi eliminada.

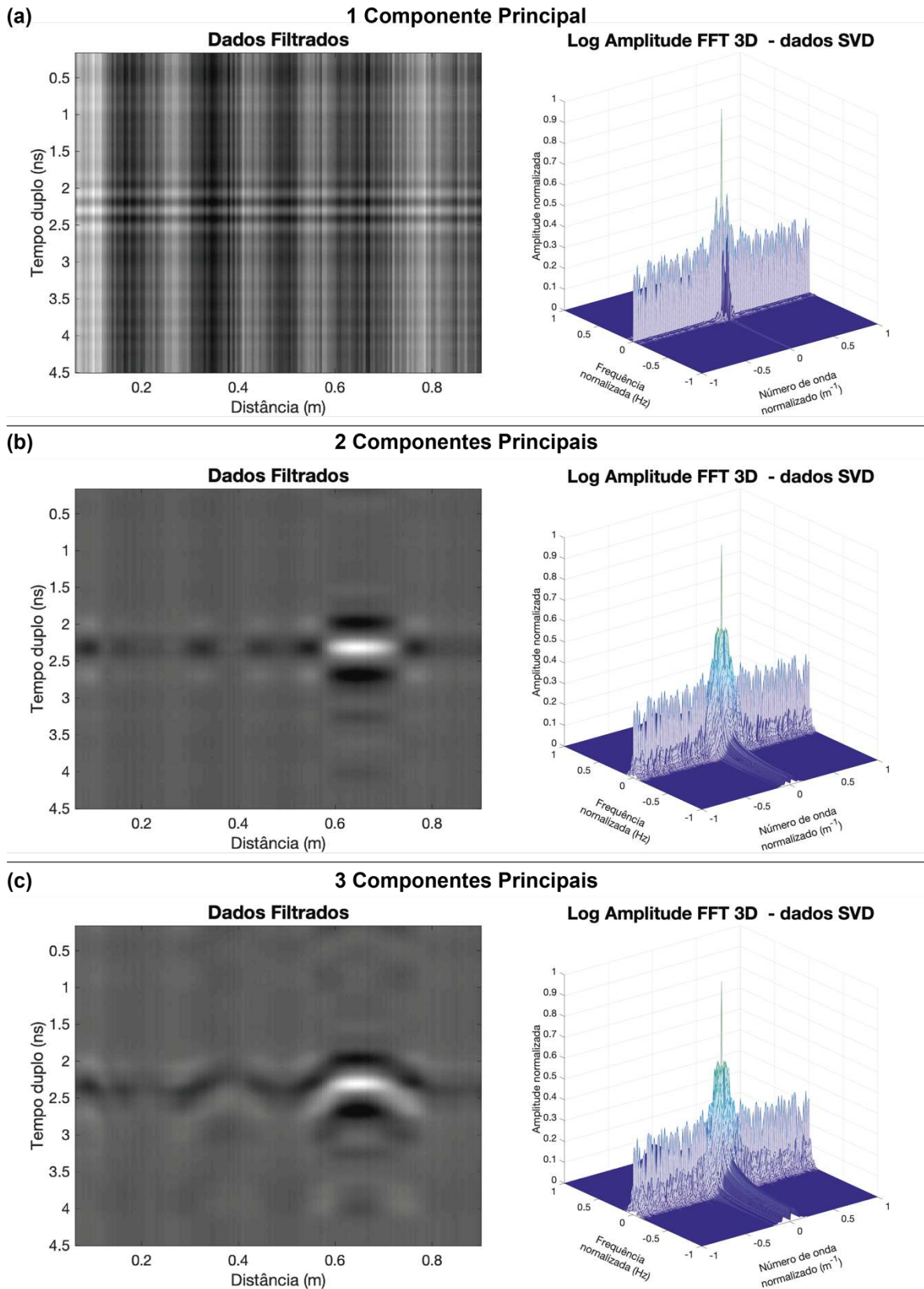
Continuando a aumentar o número de componentes principais a manter, ao reconstruir a matriz inicial mantendo as três primeiras componentes principais, os dados filtrados já começam a mostrar semelhanças com os dados iniciais (Figura 3.20c) e o espectro de amplitudes começa a apresentar semelhanças com o espectro de amplitudes inicial.

O teste seguinte consiste no restauro da matriz inicial mantendo todas as componentes principais, excluindo apenas a primeira. O resultado mostra que os dados filtrados não possuem o ruído de fundo que se observava nos dados iniciais (Figura 3.21a) e o espectro de amplitudes (Figura 3.21b) mantém a morfologia do espectro inicial (Figura 3.15).

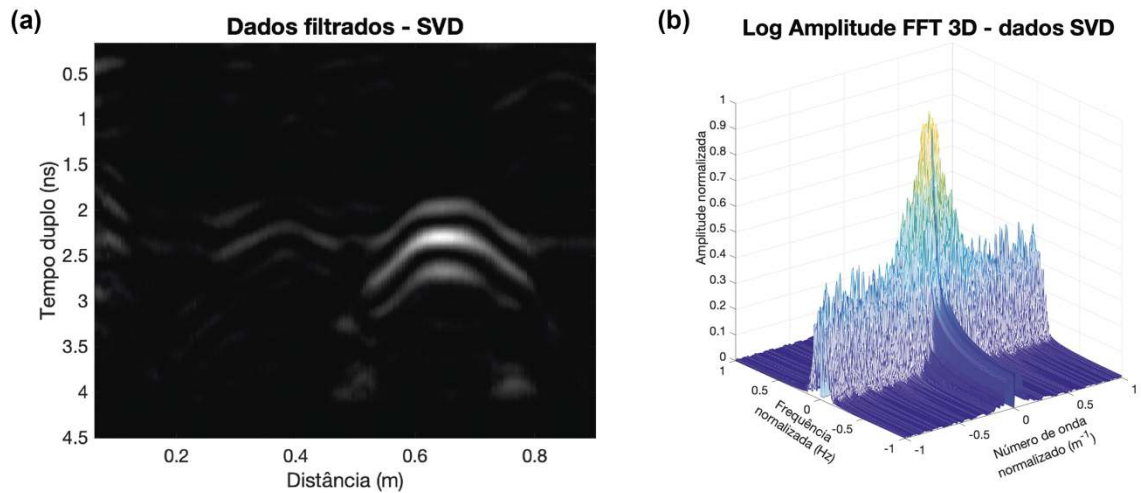
A soma dos pesos de todas as componentes principais exceto a primeira tem o valor de aproximadamente 35 %. Essas componentes principais com peso inferior à da primeira componente, são suficientes para representar os dados e a supressão desta não compromete a integridade estrutural do conjunto de dados. Pode-se concluir que a primeira componente principal corresponde ao ruído contido no radargrama e que as restantes correspondem à informação útil.

O passo seguinte será a eliminação das amplitudes em torno de  $k=0$ . Estas amplitudes não estão incluídas no ruído uma vez que fazem parte dos próprios dados, geradas por baixas frequências (encontram-se no centro do espectro de amplitudes). A sua eliminação tem de ser efetuada por tentativa e erro até que se consiga observar que a sua remoção é efetuada com sucesso. A implementação numérica consiste na criação de uma matriz unitária, em que no seu centro o valor é nulo (filtro binário), no domínio do espaço – tempo; na aplicação da transformada discreta de *Fourier* 2D, para que o filtro seja aplicado no domínio de *Fourier*; na sua multiplicação do filtro pelos dados filtrados por SVD. Para se visualizar os resultados de toda a abordagem aplicada é necessário repor o domínio espaço – tempo.

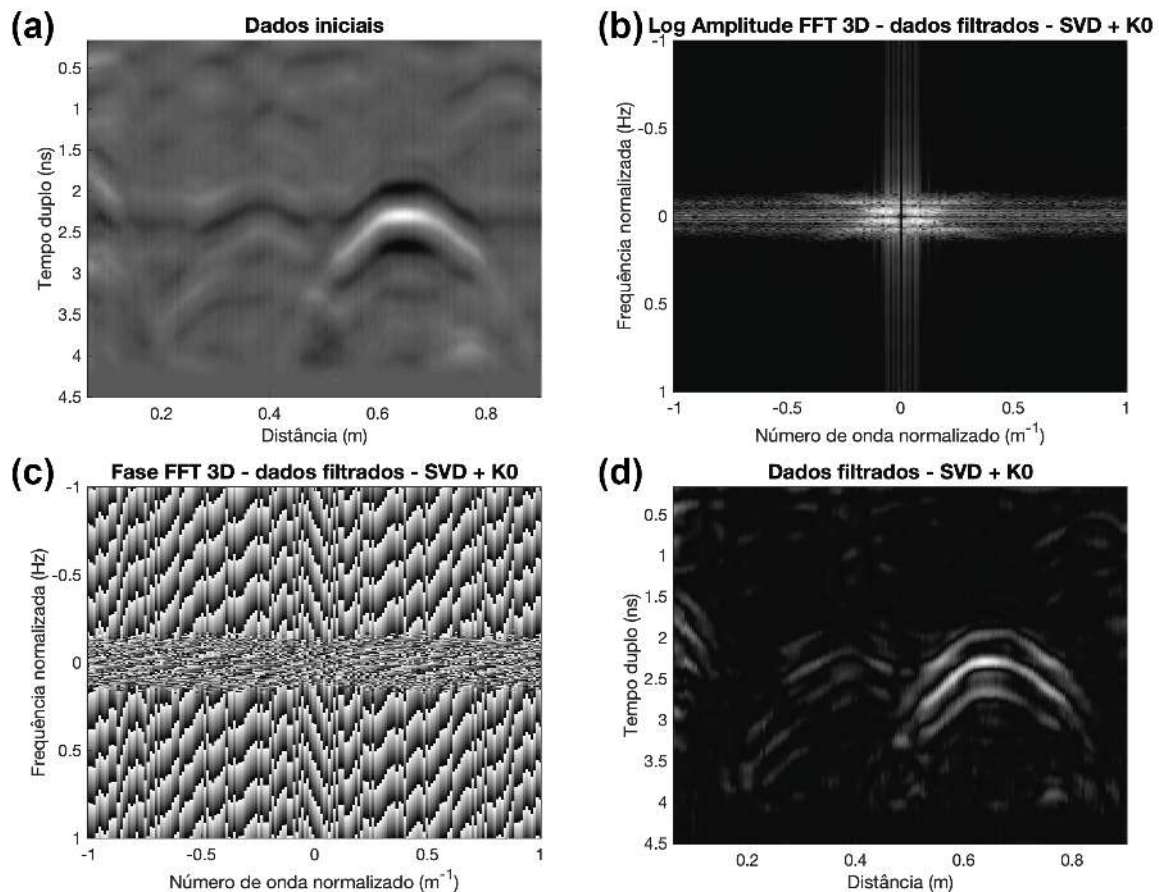
A aplicação do filtro, cuja parametrização foi efetuada através do uso da SVD e da remoção das amplitudes em torno de  $k=0$ , permitiu que se obtivesse um radargrama filtrado do ruído de fundo, mantendo apenas as reflexões correspondentes aos objetos enterrados no modelo real de laboratório. A análise dos dados de entrada, espectro de amplitudes e de fases e dados filtrados (Figura 3.22) permite verificar que esta abordagem funcionou, na medida em que os dados filtrados parecem muito semelhantes nas duas abordagens, contudo os diagramas dos espectros de amplitude apresentarem diferenças significativas. A eficácia da abordagem que se verifica nos dados de laboratório, em ambiente controlado, torna necessário que esta seja testada em dados de campo, em ambiente não controlado.



**Figura 3.20:** Resultado dos testes para verificação do efeito do restauro dos dados iniciais considerando apenas algumas componentes principais e respectivos espectros de amplitudes. (a) Dados filtrados mantendo apenas a primeira componente principal. (b) Dados filtrados mantendo as duas primeiras componentes principais. (c) Dados filtrados mantendo as três primeiras componentes principais.



**Figura 3.21:** Resultado do teste para verificação do efeito do restauro dos dados iniciais considerando todas as componentes principais exceto a primeira. (a) Dados filtrados. (b) Espectro de amplitudes dos dados filtrados (3D). Eliminando a primeira componente principal, correspondente ao ruído de fundo, o sinal restaurado corresponde à informação útil contida no radargrama.

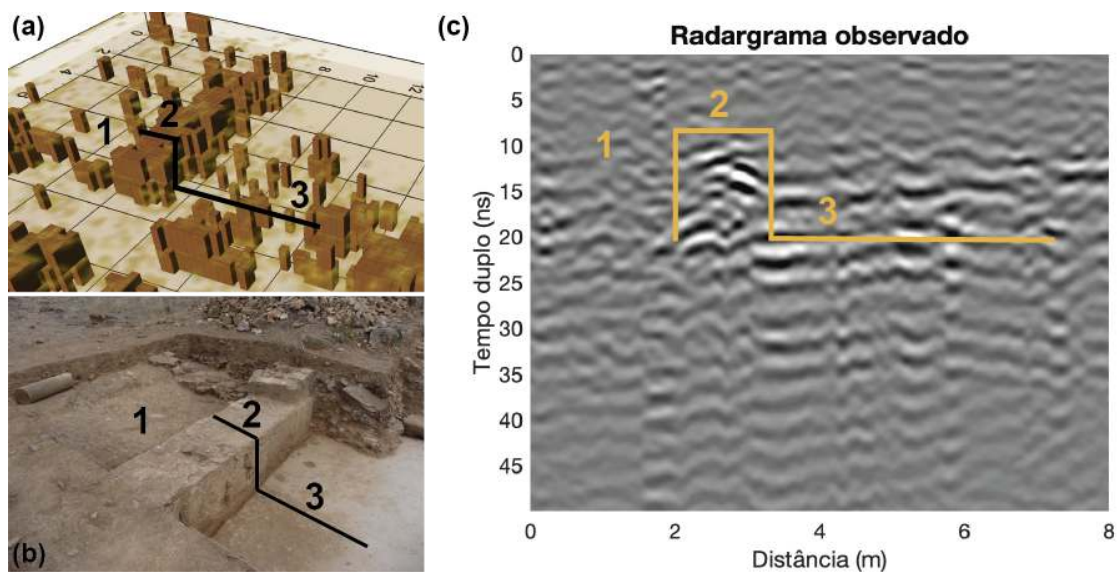


**Figura 3.22:** Resultados da aplicação do filtro no domínio espectral, usando SVD. (a) Dados de entrada no domínio do espaço – tempo. (b) Espectro de amplitude dos dados filtrados. (c) Espectro de fases dos dados filtrados. (d) Dados filtrados no domínio do espaço – tempo. A eliminação do sinal em torno de  $k=0$  elimina o bandado horizontal dos dados que se encontrava a camuflar o sinal útil do conjunto de dados.

### 3.4. TESTE EM DADOS DE CAMPO (AMBIENTE NÃO CONTROLADO)

#### 3.4.1. Modelo real

Depois de se conceber e testar a abordagem de processamento de sinal de GPR com dados de laboratório, em ambiente controlado, para que esta seja validada torna-se necessário efetuar testes com dados de campo, em ambiente não controlado. Os dados de campo usados são provenientes de um levantamento geofísico de GPR-3D, realizado em 2014 na Villa Romana de Horta da Torre (Oliveira et al., 2016c), onde foi adquirido um conjunto de perfis paralelos, espaçados de 0.25 m, numa área de aproximadamente 350 m<sup>2</sup>, junto às ruínas arqueológicas expostas. Os dados, depois de processados no programa RADAN, permitiram concluir que nesse local existiriam estruturas arqueológicas enterradas, cujas formas são compatíveis com estruturas do tipo muro, apresentando refletores bastante robustos que se observam a diferentes profundidades do modelo 3D obtido (Figura 3.23a). Neste local, após a realização do levantamento geofísico, foram realizadas escavações arqueológicas que puseram a descoberto muros e pavimentos de grande imponência e em elevado estado de conservação, que permitiram validar os resultados geofísicos obtidos.



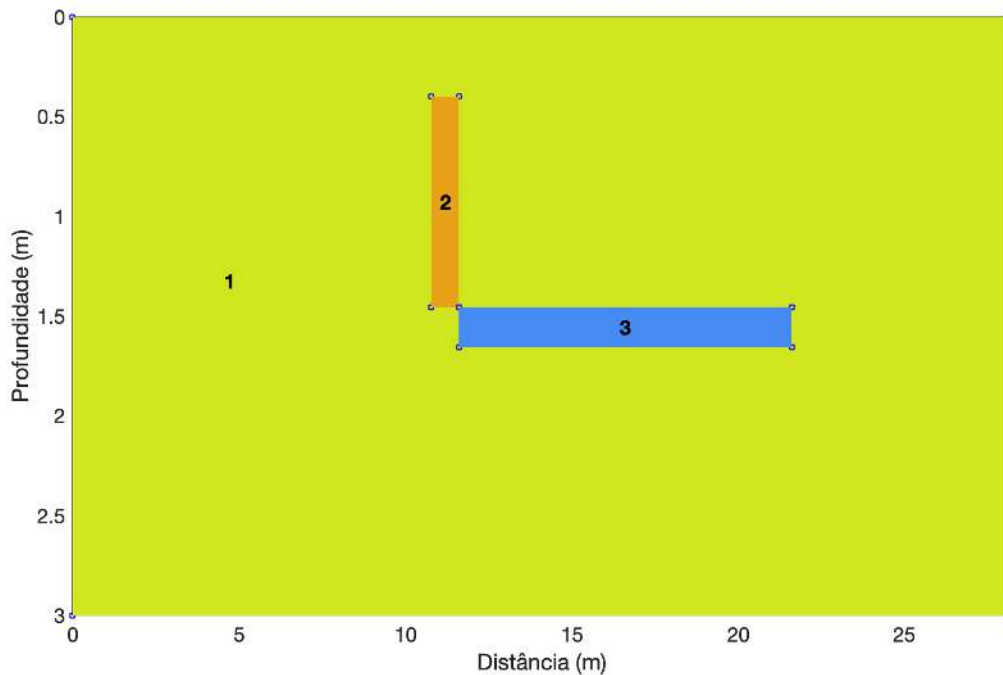
**Figura 3.23:** (a) Modelo GPR-3D. (b) Imagem da escavação no local onde os refletores evidenciam a presença de um muro robusto, assinalado a tracejado em (a). Principais estruturas observadas: 1 – solo; 2 – muro; 3 – pavimento. (c) Perfil de GPR adquirido no local assinalado pela linha em (b), onde é possível localizar as reflexões correspondentes ao muro e ao pavimento.

A partir da conjugação de várias fontes de informação, nomeadamente da representação tridimensional dos resultados do levantamento de GPR-3D (Figura 3.23a), dos resultados da escavação arqueológica (Figura 3.23b) e de um perfil de GPR que corta uma das estruturas visíveis dos dois conjuntos de dados anteriores (Figura 3.23c), foi selecionada uma localização, comum aos três conjuntos de dados, que irá ser considerada como modelo real que contém um muro adossado a um pavimento,

cobertos por solo. A partir desse conhecimento será criado um modelo sintético em ambiente numérico, para posterior cálculo de um radargrama sintético, em semelhança com o que foi efetuado nos testes com dados laboratoriais, em ambiente controlado.

### 3.4.2. Modelo sintético

O modelo sintético foi criado à escala a partir do registo das medições efetuadas em campo após a realização da escavação que colocou à vista o muro e o pavimento a considerar no modelo. A sua representação numérica (Figura 3.24) foi efetuada com o programa MatGPR R2 (Tzanis, 2010), em semelhança com o caso laboratorial. Houve necessidade de realizar vários testes para parametrização do modelo, devido à elevada complexidade da geometria e incerteza dos valores a atribuir aos parâmetros físicos a considerar de modo a produzirem um radargrama sintético semelhante ao observado.



**Figura 3.24:** Modelo sintético criado a partir do modelo real da Villa Romana de Horta da Torre (escala vertical exagerada). Legenda: (1) solo; (2) muro; (3) pavimento.

A escolha dos parâmetros físicos a considerar no modelo foi baseada em valores tabelados para materiais idênticos, devido a não ter sido possível efetuar determinações *in situ* dos materiais considerados no modelo. Assim, tendo em conta as tolerâncias descritas nas tabelas, foram feitos os ajustes considerados necessários ao caso em estudo, chegando-se ao conjunto de valores representados na Tabela 3.4. Foram considerados os seguintes materiais: solo, muro e pavimento (os dois últimos do mesmo material).

**Tabela 3.4:** Parâmetros físicos dos materiais que constituem o modelo real, em contexto de campo, para serem considerados no modelo sintético.

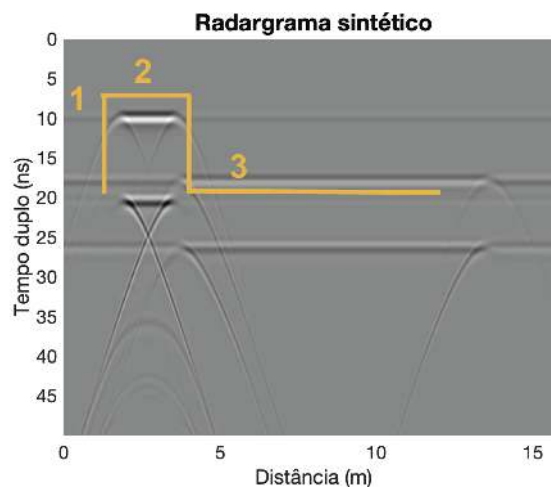
Material	Resistividade elétrica ( $\Omega.m$ )	Constante dielétrica	Velocidade de propagação (m/ns)	Permeabilidade magnética relativa
Solo	300	4.0	0.14742	1
Muro	3.000	7.0	0.11331	1
Pavimento	3.000	7.0	0.11331	1

*Cálculo do radargrama sintético*

O cálculo do radargrama sintético foi efetuado através do método de diferenças finitas no domínio do tempo (Irving & Knight, 2006). Os parâmetros de propagação usados (Tabela 3.5) são os mesmos que configuram o equipamento utilizado na aquisição do radargrama observado. Os dados obtidos (Figura 3.25) apresentam as principais reflexões nos locais onde se localizam as estruturas consideradas no modelo real e sintético (muro e pavimento). A principal diferença que se observa, em semelhança com o caso laboratorial, é a ausência de ruído de fundo no radargrama sintético. No radargrama observado existe elevada quantidade de reflexões correspondentes ao ruído de fundo.

**Tabela 3.5:** Parametrização usada para o cálculo do radargrama sintético, para o caso laboratorial.

Parâmetro	Valor experimental	Valor máximo
Frequência central, $F_c$	400 MHz	n.a.
Espaçamento vertical, $dz$	0.010072 m	0.010072 m
Espaçamento horizontal, $dx$	0.020000 m	0.020144 m
Espaçamento entre amostras, $dt$	0.097750 ns	0.312500 ns
Alcance temporal	60 ns	n.a.

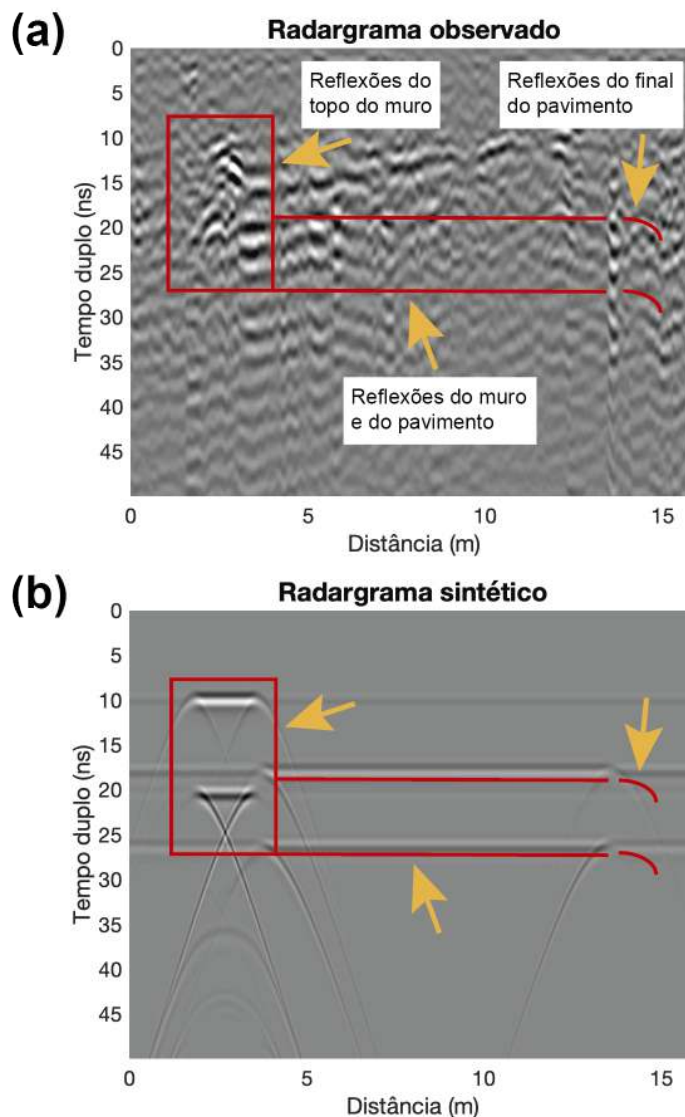


**Figura 3.25:** Radargrama sintético obtido do modelo sintético. Legenda: 1 – solo; 2 – muro; 3 – pavimento.

### 3.4.3. Comparação entre os dados sintéticos e observados

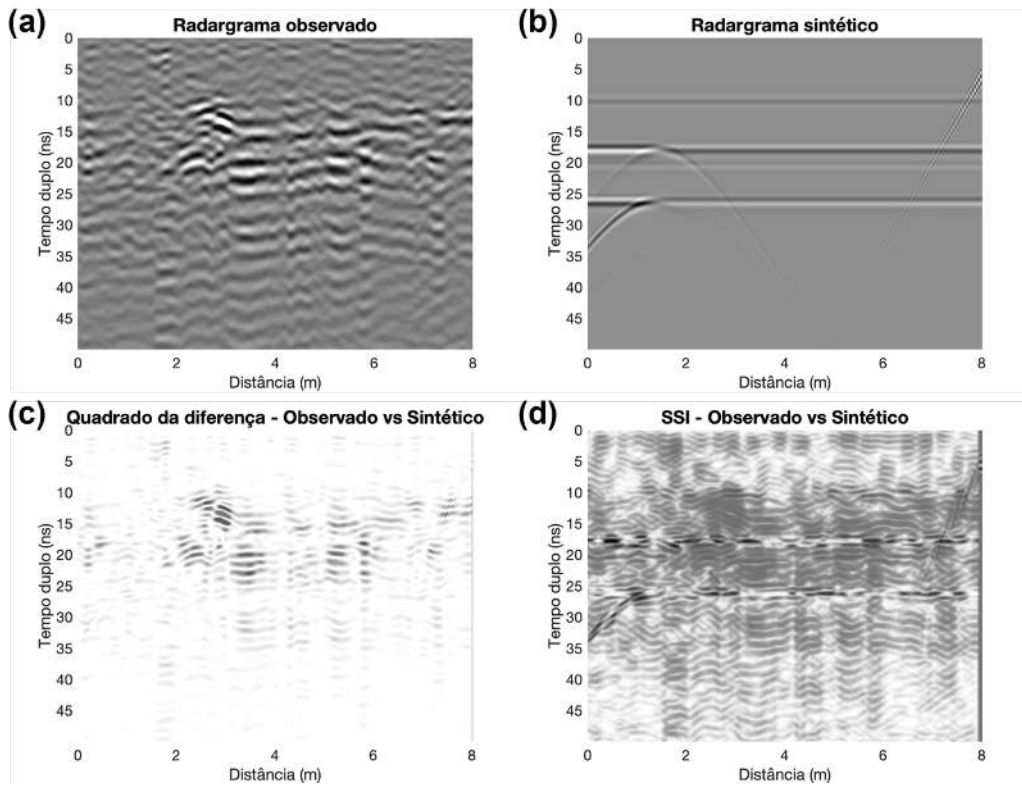
A análise visual dos dois conjuntos de dados (Figura 3.26) permite verificar que o radargrama observado possui maior quantidade de reflexões de fundo que o equivalente sintético. Estas deverão corresponder a derrubes existentes junto das estruturas que foram encontradas durante a escavação e que no cálculo do radargrama sintético não foram consideradas. A grande quantidade destas reflexões camufla as que são correspondentes às estruturas enterradas no local, prejudicando a interpretação do perfil observado.

O alinhamento automático dos dados permite efetuar uma comparação gráfica (Figura 3.27) e quantitativa, através da representação do quadrado da diferença, que possui o valor de 21.82 %, e do SSI, que possui o valor de 51.49 %.



**Figura 3.26:** Comparação visual entre o radargrama observado (a) e o radargrama sintético (b). Adaptado de Oliveira et al. (2016b).

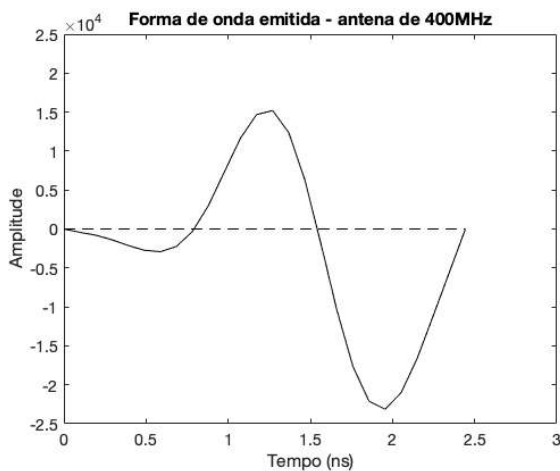




**Figura 3.27:** (a) Radargrama observado. (b) Radargrama sintético. (c) Diferença ao quadrado entre (a) e (b), depois de alinhados. (d) Índice de Similitude Estrutural.

### 3.4.4. Estudo da forma de onda emitida pela antena de GPR

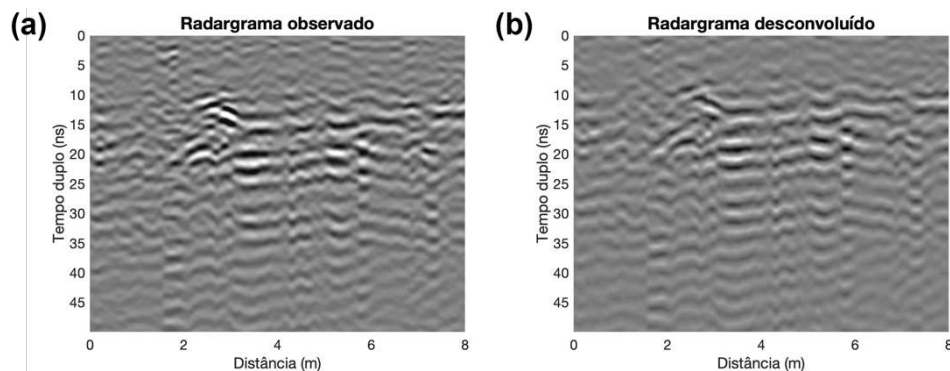
No seguimento da abordagem aplicada aos dados de laboratório, foi realizado o procedimento para estimar a onda emitida pela antena de GPR. A onda emitida pela antena de 400 MHz (Figura 3.28) possui duração de cerca de 2.5 ns (valor coincidente com a informação fornecida pelo fabricante do equipamento), não se verificando assim qualquer desvio da frequência central da antena, como o que aconteceu com a antena de 1.6 GHz.



**Figura 3.28:** Forma de onda emitida para a antena de 400 MHz determinada experimentalmente.

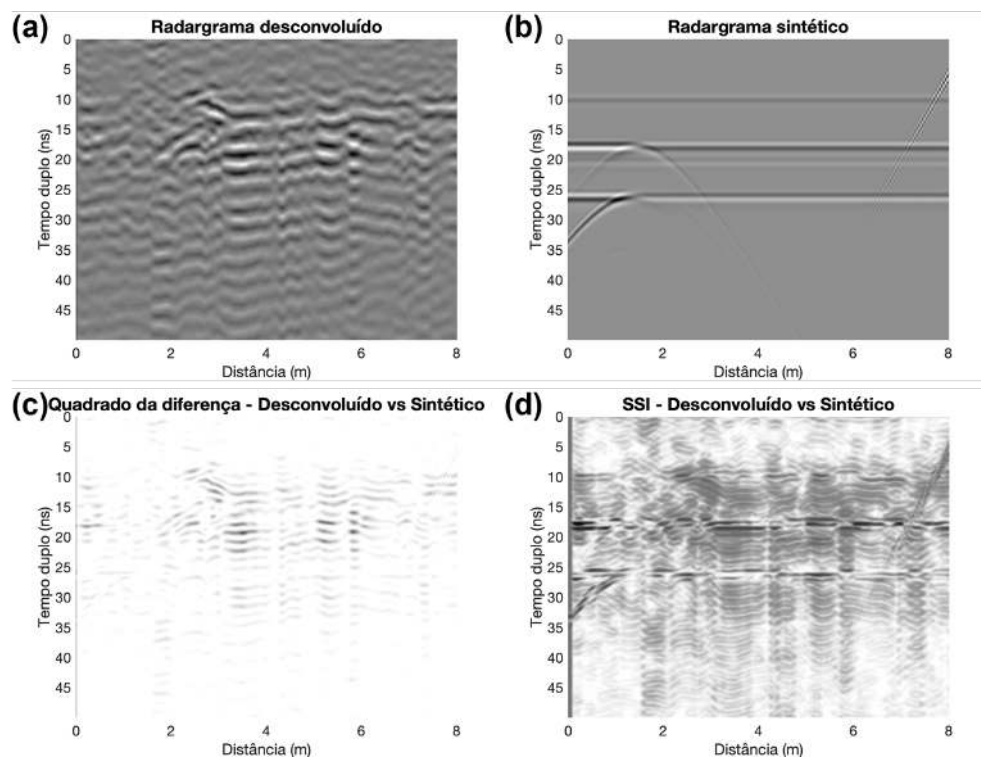
*Desconvolução iterativa*

Depois de determinada a forma de onda emitida pela antena de GPR, a informação obtida permitiu que se aplicasse o algoritmo de desconvolução iterativa de Ligorria & Ammon (1999), atrás descrito. O resultado obtido (Figura 3.29a) apresenta algumas melhorias na definição das reflexões correspondentes ao muro e ao pavimento quando comparado com os dados originais (Figura 3.29b).



**Figura 3.29:** (a) Radargrama antes da desconvolução. (b) Radargrama depois da desconvolução.

O passo seguinte consiste no alinhamento automático dos dados desconvoluidos e dos dados sintéticos para depois estabelecer a comparação gráfica (Figura 3.30) e quantitativa, através da representação do quadrado da diferença, que possui o valor de 16.69 % (- 5.13 %), e do SSI, que possui o valor de 62.99 % (- 11.5 %).

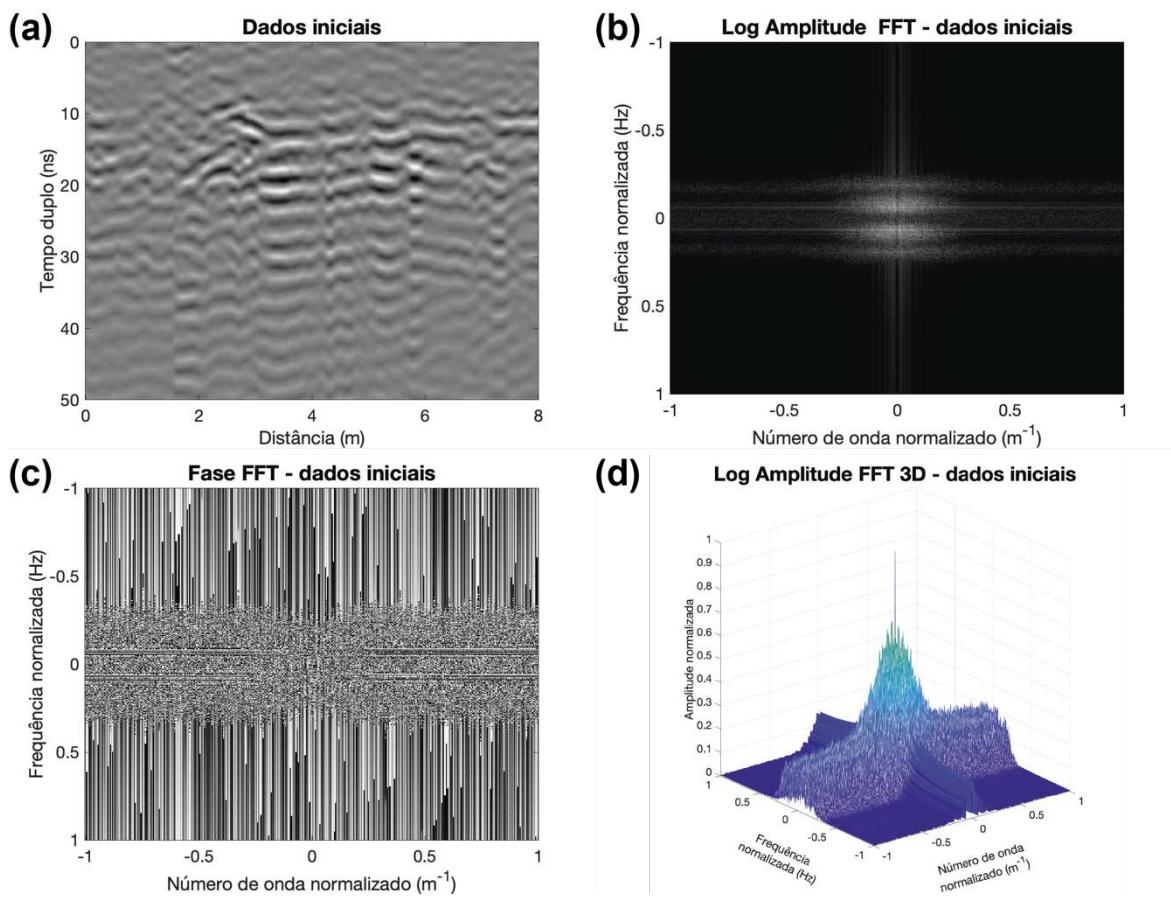


**Figura 3.30:** (a) Radargrama observado desconvoluido. (b) Radargrama sintético. (c) Diferença ao quadrado entre (a) e (b), depois de alinhados. (d) Índice de Similitude Estrutural.

Uma vez que a presença de ruído de fundo continua a condicionar a análise das reflexões do radar-grama, no sentido de averiguar a presença de estruturas enterradas, foi necessário, tal como no caso de laboratório, selecionar a informação útil de modo a excluir os restantes dados correspondentes ao ruído de fundo. Para isso foi usada a mesma abordagem estatística aplicada no domínio da frequência – número de onda usada no teste laboratorial.

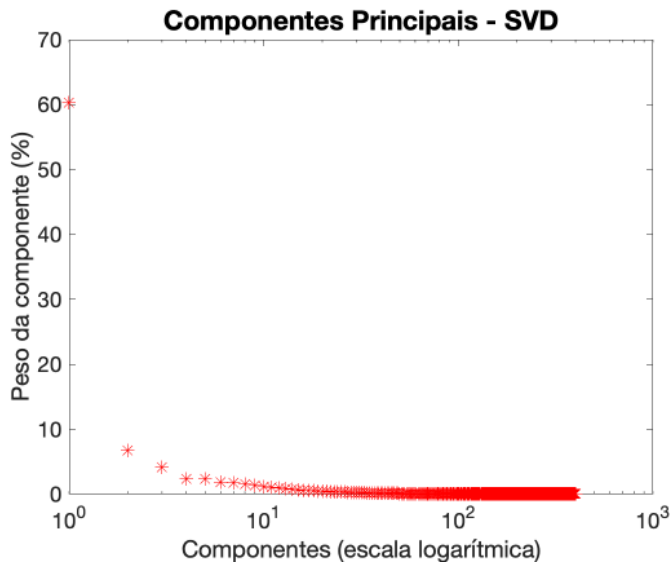
### 3.4.5. Extração de informação útil usando SVD aplicada no domínio de *Fourier*

Depois do sucesso verificado no teste laboratorial, tornou-se necessário testar a aplicabilidade da abordagem usando outros conjuntos de dados. Os dados de entrada usados correspondem ao radar-grama observado depois de ser aplicada a operação de desconvolução (Figura 3.31a). A partir deste foi aplicada a transformada discreta de *Fourier* 2D, tendo sido depois calculado o espectro de amplitudes (Figura 3.31b) e o espectro de fases (Figura 3.31c). Também foi representado o espectro de amplitudes com vista tridimensional, para aumentar a percepção espacial dos dados transformados (Figura 3.31d).



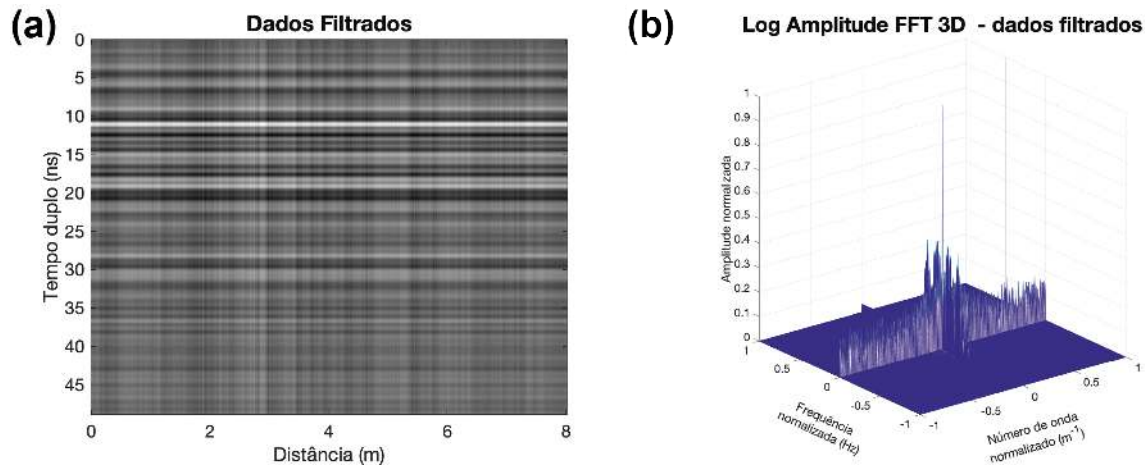
**Figura 3.31:** (a) Dados de entrada – perfil de GPR observado, desconvoluído o pulso de onda. (b) Espectro de amplitudes. (c) Espectro de fases. (d) Vista 3D do espectro de amplitudes.

Aplicando a técnica de SVD aos dados de entrada transformados obtém-se informação acerca das componentes principais destes dados (Figura 3.32). Tal como nos dados de laboratório, a primeira componente principal dos dados de campo tem um peso consideravelmente superior (cerca de 60 %) ao das restantes componentes.



**Figura 3.32:** Componentes principais do radargrama obtido em campo, obtidas por SVD dos dados transformados.

Em semelhança com o efetuado no caso laboratorial, foi realizado um teste, para comprovar que a primeira componente principal corresponde ao ruído de fundo, que consiste na reconstrução da matriz de dados inicial considerando apenas essa componente principal. O resultado obtido (Figura 3.33) permite associar a primeira componente principal dos dados ao ruído de fundo.



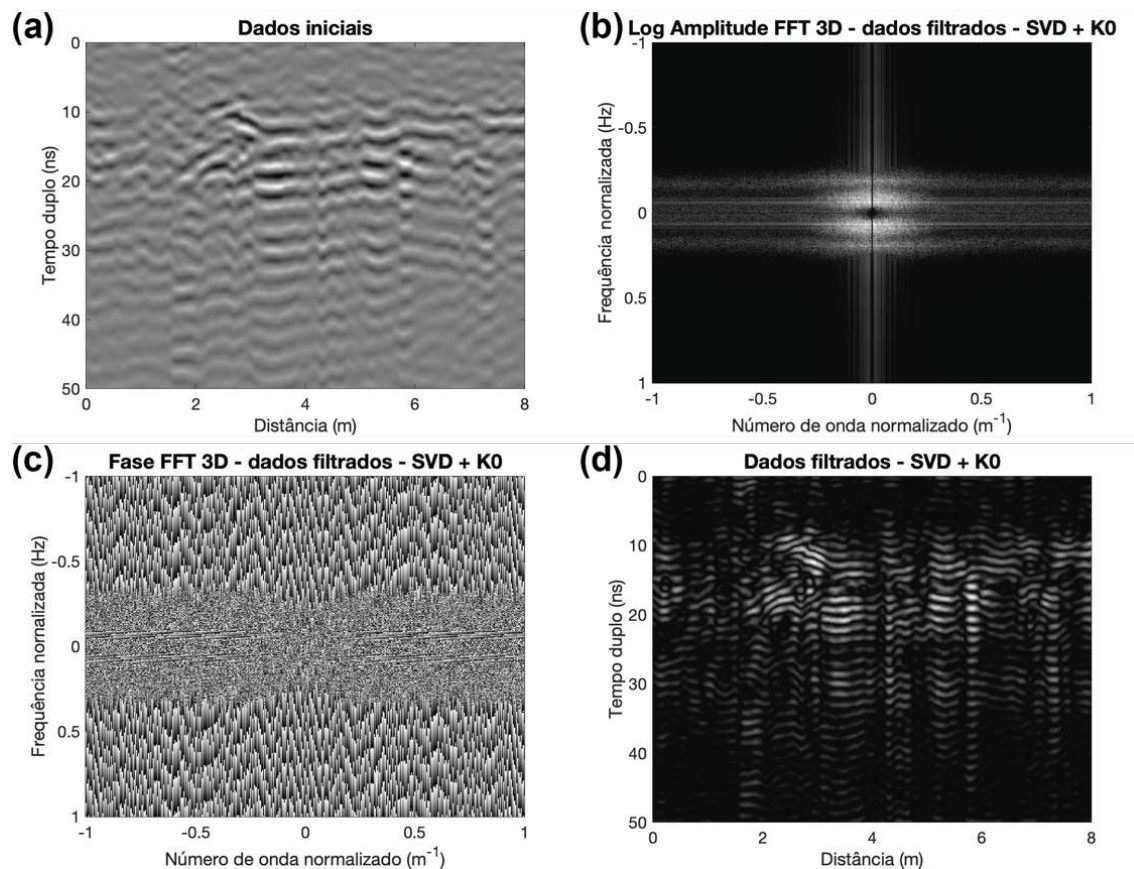
**Figura 3.33:** Resultado do teste efetuado para verificar o efeito do restauro dos dados iniciais considerando apenas a primeira componente principal. (a) Dados filtrados após aplicar a transformada inversa de *Fourier*. (b) Espetro de amplitudes da matriz obtida (vista 3D).

O passo seguinte será reconstruir a matriz de dados inicial considerando todas as componentes principais exceto a primeira, sendo também necessário eliminar as amplitudes em torno de  $k=0$ . O procedimento é o mesmo do caso laboratorial, apenas tendo que se ajustar a dimensão do filtro de modo

a eliminar a quantidade certa de amplitudes, sem comprometer a integridade estrutural do conjunto de dados.

Os dados finais, obtidos pela abordagem proposta (Figura 3.34), apresentam uma redução bastante significativa no que respeita à quantidade de reflexões presentes, por comparação com os dados de entrada (Figura 3.31a). É possível observar que na localização do muro e pavimento, existe um conjunto de reflexões que sugere a sua presença. A sua observação detalhada será efetuada pela observação dos cortes horizontais do modelo de GPR-3D (Secção 3.4.6.), depois de se aplicar a metodologia a todo o conjunto de dados 3D.

Face à eficácia da aplicação da metodologia de filtragem através da seleção da informação útil de um radargrama usando a técnica de SVD no domínio da frequência – número de onda, aplicada a dados de campo em ambiente não controlado, torna-se possível a sua validação. Apenas falta um último teste que consiste na aplicação da metodologia à totalidade dos dados de GPR-3D, no sentido de verificar se a perceção sobre a existência de estruturas enterradas aumenta através desta metodologia.



**Figura 3.34:** Resultado da aplicação do filtro no domínio espectral, usando SVD. (a) Dados de entrada no domínio do espaço – tempo. (b) Espectro de amplitudes dos dados filtrados. (c) Espectro de fases dos dados filtrados. (d) Dados filtrados no domínio do espaço – tempo.

### 3.4.6. Aplicação da metodologia SVD à totalidade dos dados (GPR-3D)

O último teste a realizar consiste na aplicação da metodologia a dados de GPR-3D, de modo verificar se de facto esta abordagem melhora a perceção sobre a existência de estruturas enterradas no local prospectado. O conjunto de dados a considerar neste teste são os perfis paralelos obtidos de modo a criar um modelo de refletividades 3D, adquiridos na Villa Romana de Horta da Torre.

Antes de se aplicar a abordagem a todos os perfis, estes foram parcialmente processados no programa GSSI RADAN. As operações aplicadas consistiram na remoção do conteúdo de baixa frequência (*dewow*), para remover o valor médio de amplitude de cada traço, e num ajuste de ganho, para amplificar os valores de amplitude que poderão ter baixado demasiado em consequência da operação anterior.

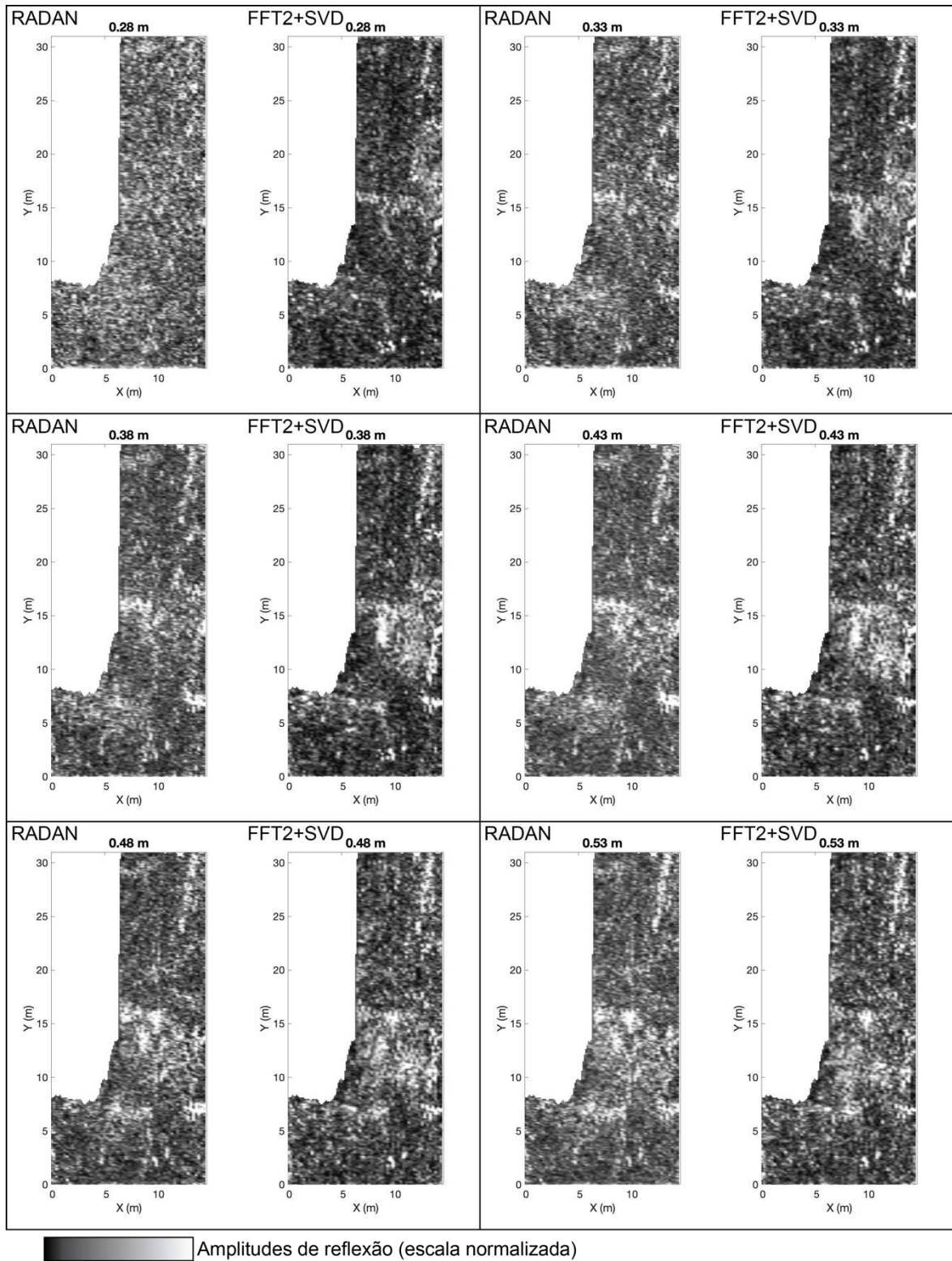
Depois de aplicadas as operações iniciais, os dados ficam prontos a serem processados segundo a abordagem proposta. O processamento é aplicado de forma iterativa a todos os perfis através de um algoritmo desenvolvido para MATLAB, que importa os dados em formato DZT, aplica o processamento segundo a abordagem proposta e exporta os ficheiros novamente para o formato DZT. Os dados processados são de seguida importados para o programa RADAN, para criação do modelo de refletividades 3D e posterior produção de cortes horizontais às mesmas profundidades consideradas para o conjunto de dados processado exclusivamente no RADAN.

A análise dos resultados obtidos pela aplicação da abordagem proposta em dados de GPR-3D deve ser avaliada por comparação com os resultados obtidos através de uma cadeia de processamento aplicada exclusivamente em programa comercial, de modo a que se tornem evidentes as principais diferenças (Figura 3.35).

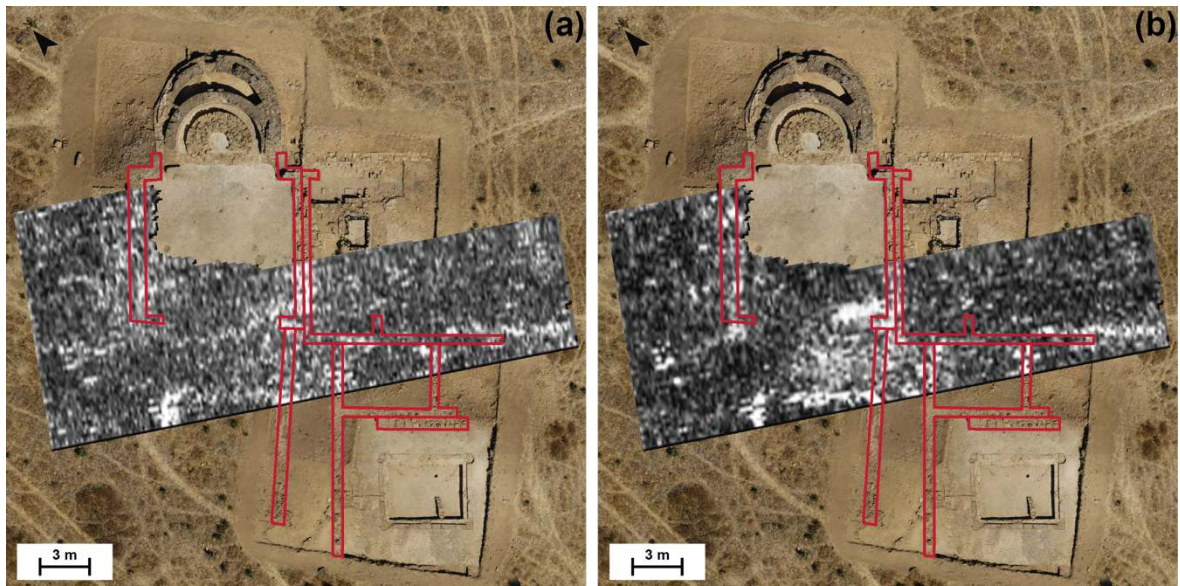
A análise dos cortes horizontais do modelo 3D dos dois conjuntos de dados permite constatar que a abordagem concebida coloca em evidência alinhamentos correspondentes a estruturas do tipo muro, em cortes horizontais que nos processados exclusivamente no programa comercial não se notavam. Relativamente aos alinhamentos visíveis nos dois conjuntos, também se verifica que possuem maior definição os provenientes de dados processados pela abordagem proposta. Estas observações permitem considerar que o processamento proposto permite aumentar a perceção sobre a existência de estruturas.

Para melhor se compreender de que forma esta metodologia influencia favoravelmente a interpretação dos resultados da prospeção geofísica de GPR em contexto arqueológico, foi selecionado um corte horizontal do modelo 3D de cada conjunto de dados à mesma profundidade ( $z=0.38\text{m}$ ) para se sobrepor a uma imagem aérea. A imagem aérea foi produzida posteriormente às escavações arqueológicas que puseram a descoberto as estruturas identificadas pelos resultados da prospeção geofísica,

o que permitiu que se adicionasse uma representação esquemática para assinalar as estruturas descobertas e assim auxiliar a interpretação dos resultados dos dois conjuntos de dados (Figura 3.36). Nas localizações dos alinhamentos que não possuem linhas sobrepostas não foram efetuadas escavações.



**Figura 3.35:** Comparação entre os resultados do processamento dos dados de GPR-3D de Horta da Torre usando o programa comercial (RADAN) e usando a abordagem com uso de SVD aplicada no domínio espectral (FFT2+SVD). Cortes horizontais, a diversas profundidades, extraídos do modelo 3D.



**Figura 3.36:** Sobreposição de um corte horizontal do modelo 3D de cada conjunto de dados, da mesma profundidade ( $z=0,38\text{m}$ ) a uma imagem aérea do local (cedida pela empresa Geodrone). (a) Corte horizontal proveniente dos resultados do processamento de dados usando exclusivamente programa comercial. (b) Corte horizontal proveniente dos resultados da abordagem que usa SVD aplicada no domínio da frequência – número de onda. As linhas vermelhas assinalam as estruturas atualmente escavadas.

### 3.5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos nos dois conjuntos de testes efetuados, com dados laboratoriais e dados de campo, mostraram que a abordagem proposta possibilitou a aplicação de filtragem de ruído de fundo com êxito em ambos os casos considerados. A identificação do sinal correspondente ao ruído de fundo, com recurso à técnica de SVD aplicada no domínio espectral permite a sua seleção e isolamento de forma personalizada em cada conjunto de dados. Posteriormente, a sua remoção, mantendo apenas o sinal útil, permite um aumento do contraste entre o sinal correspondente a estruturas enterradas e o valor de fundo que passa a ser tendencialmente nulo. Este aumento de contraste aumenta a perceptibilidade sobre estruturas enterradas.

No teste laboratorial foi considerado um perfil de GPR obtido com uma antena de 1.6 GHz sobre um modelo criado em laboratório, em que se sabe *a priori* que existem estruturas enterradas, assim como as suas localizações. A aplicação da metodologia de filtragem proposta permitiu isolar as reflexões correspondentes às estruturas enterradas, excluindo as restantes reflexões correspondentes ao ruído de fundo. A representação gráfica do radargrama filtrado mostra que o processamento aumentou consideravelmente o contraste entre as reflexões correspondentes a estruturas enterradas e as restantes reflexões, na medida em que as últimas ficaram com valores a tender para zero. O aumento do contraste que se verificou permite aumentar a perceptibilidade sobre a existência de estruturas enterradas na subsuperfície.



No teste realizado com dados de campo foi considerado um perfil obtido em campo com uma antena de 400 MHz, num sítio arqueológico que foi posteriormente escavado. A escavação proporcionou informações espaciais sobre as estruturas que estavam enterradas, que foram cruciais para se verificar que a abordagem de filtragem aplicada é eficaz na remoção do ruído de fundo mantendo apenas a informação correspondente a essas estruturas. Neste conjunto de dados também se observou um aumento de contraste entre as reflexões correspondentes a estruturas e o valor de fundo, em semelhança com o caso laboratorial. A abordagem foi também aplicada à totalidade dos dados de campo de GPR-3D. Os resultados obtidos após a produção de camadas horizontais extraídas a diferentes profundidades do modelo de refletividades 3D foram comparados com dados equivalentes obtidos por processamento realizado exclusivamente em programa comercial. A observação da representação gráfica dos dois conjuntos de dados permite observar que a abordagem proposta é capaz de proporcionar mais informação útil que a obtida pelo processamento clássico. Nos dados obtidos pela nova abordagem, as reflexões correspondentes a estruturas enterradas são visíveis a todas as profundidades consideradas, apresentam elevado contraste com o fundo e os alinhamentos das reflexões que correspondem às estruturas enterradas parecem ter melhor definição. Nos dados obtidos pelo processamento clássico é possível interpretar os alinhamentos de reflexões como estruturas enterradas, no entanto, o contraste e resolução gráfica não são tão claros como no caso da metodologia proposta.

### **3.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo, a principal problemática que se pretendeu ultrapassar foi a da eliminação do ruído de fundo em perfis de GPR, que geralmente impede que se distingam as reflexões correspondentes a objetos enterrados do ruído, prejudicando a avaliação sobre a existência de objetos enterrados na subsuperfície. Face à necessidade de ultrapassar este problema foi concebida a metodologia SVD apresentada neste capítulo, que foi testada com sucesso a partir de dados laboratoriais adquiridos em ambiente controlado e com dados de campo adquiridos em ambiente não controlado, também com sucesso. Finalmente, os dados assim processados foram utilizados para produzir soluções de GPR-3D cujo sucesso também ficou comprovado.

A metodologia apresentada foi motivada pelas dificuldades encontradas em extrair informação do sinal registado de um levantamento de GPR realizado num sítio arqueológico, a Villa Romana de Horta da Torre (Fronteira, Portugal). O levantamento efetuado tinha como objetivo guiar a escavação arqueológica que seria feita no local para uma localização onde existisse maior probabilidade de existirem estruturas enterradas. Os resultados obtidos permitiram que se escolhesse um local onde deveria existir uma estrutura do tipo muro, que a julgar pela extensão dos alinhamentos de refletores, seria de grande imponência. A escavação colocou a descoberto uma estrutura do tipo muro, bastante imponente e em elevado estado de conservação.

No entanto, apesar do sucesso do levantamento, foram identificados alguns aspectos que poderiam fragilizar a interpretação dos dados geofísicos. Os radargramas apresentam uma quantidade elevada de reflexões que não correspondem a estruturas enterradas, muito provavelmente produzidas por derrubes de materiais em torno das estruturas enterradas, e cuja existência foi comprovada durante o acompanhamento da escavação. Essas reflexões sem correspondência com estruturas foram classificadas como ruído de fundo.

Ainda antes do problema que se discutiu neste capítulo ter sido identificado e definido, houve necessidade de criar um modelo laboratorial que possibilitasse o estudo da aplicação do método de GPR em condições controladas, sem ter que existir deslocação ao campo e permitindo também que a superfície fosse modificada sem comprometer a integridade de eventuais estruturas arqueológicas. Para esse efeito, foi recolhido solo dessa escavação para ser usado na criação do modelo laboratorial. Este foi criado dentro de um recipiente de acrílico, onde se colocou o solo peneirado em duas granulometrias para que fossem definidas duas camadas de solo, e dentro do qual foram introduzidos objetos com localização e geometria bem definidos. Os parâmetros físicos que definem as suas propriedades eletromagnéticas foram determinados experimentalmente e, juntamente com a sua geometria, foram usados para parametrizar o modelo sintético, em ambiente numérico, e posterior cálculo dos radargramas sintéticos.

Ao tentar estabelecer-se a comparação entre os dados observados e os dados sintéticos, constatou-se a existência de uma grande diferença entre os dois conjuntos de dados, principalmente no que respeita à existência de ruído de fundo nos radargramas observados, que não está presente nos dados sintéticos. Surgiu assim a necessidade de se remover ou diminuir drasticamente o ruído que prejudica a interpretação dos dados e que pode impedir que se identifiquem estruturas enterradas. A existência desse ruído pode ter origens várias, nomeadamente, devido à existência de derrubes de estruturas que provocam refletores adicionais que mascaram o sinal proveniente de estruturas que possam existir e devido a condições de baixa perceptibilidade do local, conferidas pelo elevado conteúdo de argila na composição do solo, que provoca uma grande atenuação da onda emitida pelo GPR.

Numa primeira aproximação, foi equacionado que a ineficácia na remoção do ruído pudesse dever-se a uma má parametrização da operação de desconvolução dos dados, por não ser considerada a forma de onda emitida pela antena de GPR, apenas podendo variar a duração do pulso emitido, ainda que não permitindo um ajuste decimal (apenas números inteiros). Assim, foi determinada experimentalmente a forma de onda emitida pela antena de GPR, de modo a usar a informação obtida numa operação de desconvolução personalizada aos dados considerados. Constatou-se que para a antena de 1.6 GHz usada no caso laboratorial, existe um desvio na frequência central para 1.9 GHz, provocando nos dados uma modificação nas frequências amostradas, que associadas a uma parametrização

incorreta no controlador, adiciona erro aos dados. Para a antena de 400 MHz usada no caso de campo não se verifica nenhuma alteração no valor experimental da frequência central.

O passo seguinte consistiu em selecionar um método de desconvolução que permita que seja personalizado aos dados considerados, uma vez que nos programas comerciais a operação é limitada na sua parametrização. Foi escolhido um método iterativo no domínio do tempo, usado em Sismologia para a obtenção de funções recetoras. O teste efetuado com um traço convoluido com um pulso de onda foi capaz de restaurar o traço original, não se verificando diferenças consideráveis. Aplicado ao radargrama observado do caso laboratorial, a desconvolução efetuada originou um radargrama com mais definição dos refletores e diminuiu o desvio entre os dados observados desconvoluidos e os dados sintéticos. Todavia, apesar da melhoria introduzida pelo procedimento, o ruído de fundo ainda persiste, razão pela qual se optou por prosseguir o estudo em busca de o eliminar dos dados.

Para isso foi ponderada a aplicação de operações de filtragem no domínio da frequência – número de onda, com recurso à aplicação da transformada discreta de *Fourier* 2D, uma vez que a parametrização das operações de filtragem se tornam mais facilitadas devido ao caráter de simetria que os dados apresentam depois de se aplicar a transformada de *Fourier*.

Depois de se testar, por tentativa e erro, algumas formas de parametrizar a operação de filtragem, foi ponderado o uso de técnicas de configuração automática do filtro, de modo a evitar que a seleção da informação útil contida no radargrama seja dependente do utilizador. Para isso fez-se uso da técnica de Análise de Componentes Principais, cuja implementação numérica a dados matriciais definidos por números complexos é efetuada através da técnica de fatorização de Decomposição em Valores Singulares, que decompõe o conjunto de dados em valores singulares, cujos pesos são ordenados por ordem decrescente e estão associados a quantidades de informação. A análise do resultado em função das componentes principais consideradas permitiu concluir que o ruído de um radargrama corresponde à primeira componente principal dos dados transformados, possuindo um peso maior que a soma dos pesos das restantes componentes. O restauro da matriz inicial considerando todas as componentes exceto a primeira elimina a maior parte do ruído de fundo do radargrama. A seleção automática dos dados através do uso de SVD deve ser complementada com a remoção das amplitudes em torno de  $k=0$ , cujas amplitudes estão relacionadas com o conteúdo espectral de baixas frequências que não foi removido na primeira operação de processamento no programa RADAN (operação *dewow*).

A aplicação da abordagem a um radargrama obtido em laboratório, em condições controladas, foi efetuada com sucesso, tendo sido possível eliminar o ruído de fundo mantendo a informação útil, que neste caso corresponde às reflexões originadas pelos objetos enterrados no modelo laboratorial.

A aplicação a um radargrama obtido em campo, em ambiente não controlado, em que se sabia que existiam pelo menos dois tipos de estrutura, muro e pavimento (este conhecimento foi obtido após a

execução de escavação arqueológica no local), também foi efetuada com sucesso, eliminando o ruído de fundo e mantendo a informação útil.

Os testes à abordagem culminaram com um teste a um conjunto de dados de GPR-3D, aplicado iterativamente a cada perfil de GPR. O resultado obtido, analisado através da comparação dos cortes horizontais do modelo de refletividades 3D criado com os dados processados pelo método proposto com os correspondentes cortes produzidos com os mesmo dados, mas processados exclusivamente segundo um processo tradicional no programa RADAN, permitiu concluir sobre a validade do método. Ficou evidente que houve um aumento de contraste e definição entre as reflexões correspondentes a estruturas e o valor de fundo, aumentando a perceptibilidade sobre a existência de estruturas enterradas no local. Também foi possível verificar que a abordagem permitiu descobrir novos alinhamentos de reflexões do tipo muro nas imediações dos alinhamentos de reflexões inicialmente identificados.

## CAPÍTULO 4

### MELHORIA DA IMAGEM DE GPR-3D ATRAVÉS DE INTERPOLAÇÃO DE FOURIER

#### ALGORITMO INT-FFT

No Capítulo 3 foi resolvido o problema da estimativa e remoção do ruído de fundo de radargramas, uma das questões identificadas que perturbam a boa interpretação dos resultados do levantamento de GPR. Outro problema também identificado consiste na falta de qualidade gráfica dos cortes horizontais extraídos do modelo de refletividades 3D, provocada por uma distância entre perfis demasiado elevada que origina subamostragem na direção perpendicular aos perfis. Neste capítulo propõe-se uma metodologia de densificação lateral de dados de GPR-3D usando interpolação de *Fourier* para resolver o problema de subamostragem identificado.

Atualmente, mesmo com os mais recentes equipamentos de GPR que permitem o uso de conjuntos de antenas mono ou multicanal, um levantamento em modo tridimensional requer que a aquisição seja efetuada em perfis paralelos e equidistanciados. O valor da distância entre perfis deve ser escolhido considerando a dimensão das estruturas a prospectar, caso a informação esteja disponível antes do levantamento, de modo a evitar que aconteça subamostragem provocada pela elevada distância entre perfis. Em determinadas ocasiões, durante a aquisição de dados, é necessário estabelecer um compromisso entre a quantidade de dados e a sua qualidade, especialmente em áreas de estudo muito extensas, para que seja possível adquirir grandes quantidades de dados no tempo útil disponível para o levantamento. A principal consequência que se verifica quando se aumenta demasiado a distância entre perfis é uma diminuição da nitidez dos dados quando se está a analisar cortes horizontais extraídos no modelo de refletividades 3D, o que poderá prejudicar a avaliação do conteúdo da subsuperfície com a precisão necessária.

#### 4.1. ASPETOS SOBRE A GERAÇÃO DE TRAÇOS

Para superar o problema de subamostragem dos modelos de GPR-3D propõe-se uma abordagem de densificação lateral dos dados através da interpolação de perfis de GPR no domínio da frequência, com recurso à aplicação da transformada discreta de *Fourier*. Este método é amplamente usado na reconstrução de dados sísmicos 2D e 3D (Liu et al., 2015).

O primeiro aspeto a considerar, para se poder densificar um conjunto de dados de GPR-3D, é que o tipo de informação disponível corresponde a uma distribuição espacial de amplitudes  $A(x_i, y_j, z_k)$  resultante da deteção das OEMs refletidas. Este conjunto de dados não se encontra igualmente distribuído no espaço, uma vez que  $A(z_{k=1, Nk})$  representa um traço em que  $Nk$  corresponde ao número de amostras por traço; que geralmente possui valor de 512 ou de 1024 amostras, com um espaçamento  $\Delta z$  entre 0.05 e 0.5 ns. Por outro lado,  $A(x_{i=1, Ni})$  refere-se à amplitude do sinal recebido ao longo de cada ponto do perfil (2D), em que  $Ni$  corresponde ao número de traços desse perfil, cujo valor depende do seu comprimento e do espaçamento entre traços ( $\Delta x$ ); geralmente entre 1, 2 ou 5 cm. Por último, o conjunto  $A(y_{j=1, Nj})$  refere-se às amplitudes quando se fixa um plano  $(x, z)$ , em que  $Nj$  corresponde ao número total de perfis adquiridos durante o levantamento, com um determinado espaçamento entre perfis ( $\Delta y$ ); em Arqueologia, geralmente este espaçamento é de 15 cm para uma antena de 900 MHz, 25 cm para uma antena de 400 MHz e 50 cm para uma antena de 200 MHz.

Ao comparar os intervalos de amostragem anteriores torna-se evidente que o conjunto de dados apresenta subamostragem na direção Y, o que produz uma falta de informação nessa direção. Uma boa estratégia para aumentar a qualidade das imagens 3D consiste na densificação de todo o conjunto nessa direção, de forma a gerar novos traços entre os perfis paralelos existentes.

No processamento de dados sísmicos existem vários métodos de geração de traços. Um desses são os que se baseiam em transformações matemáticas, amplamente usados para reconstruir traços ausentes em dados sísmicos (Liu et al., 2015). Consistem no mapeamento do sinal num novo domínio permitindo que os dados sejam sintetizados em localizações espaciais onde não foram registados (Liu et al., 2015). Outros métodos baseiam-se na aplicação da transformada de *Fourier* (Duijndam et al., 1999; Hindriks & Duijndam, 2000; Sacchi & Ulrych, 1995; Trad et al., 2003; Xu et al., 2005), em que os coeficientes de *Fourier* são calculados a partir dos traços de entrada, para reconstruir os dados para qualquer dimensão de malha (Xu et al., 2010). Existem outros algoritmos propostos, como a transformada rápida de *Fourier* irregular (Hindriks & Duijndam, 2000) e inversão esparsa (Sacchi & Ulrych, 1995; Zwartjes & Sacchi, 2007), métodos eficientes no caso de dados amostrados de forma regular (Xu et al., 2010). Todos os métodos de reconstrução de *Fourier* requerem que se verifiquem duas condições: o sinal deve ser limitado num intervalo de frequências; e deve ser representado por uma distribuição de coeficientes de *Fourier*.

Spitz (1991) desenvolveu um método de interpolação para recuperar traços ausentes em dados sísmicos, baseado na aplicação de transformadas matemáticas, fazendo uso também de filtros preditivos (Andersson et al., 2015) no domínio f-x (Naghizadeh & Sacchi, 2009). Os dados são considerados como uma sobreposição de eventos lineares no domínio f-x e podem ser reconstruídos usando filtros preditivos como operadores autorregressivos. Este método pode ser também aplicado em fenômenos de atenuação de ruído aleatório f-x (Canales, 1984; Sacchi & Kuehl, 2000; Soubaras, 1994). Spitz (1991) demonstrou que os filtros preditivos estimados a partir da frequência  $f$  podem ser usados para interpolar dados com uma frequência  $2f$ . Os filtros preditivos estimados a partir das baixas frequências do sinal, isentos de *aliasing*, são usados para interpolar o conteúdo das altas frequências que sofrem de *aliasing*, podendo também ser usados para reconstruir dados com falhas (Abma & Kabir, 2005; Naghizadeh & Sacchi, 2007, 2009).

A identificação automática de eventos é também uma técnica que pode ser usada para recuperar parâmetros ou atributos e que permite a interpolação de traços (Chopra & Marfurt, 2005; Dossi et al., 2015). As amplitudes correspondentes às reflexões e os correspondentes tempos de chegada são usados para calcular contrastes na impedância do meio (Dossi et al., 2015). O algoritmo executa uma análise de atributos dos conjuntos de dados gravados (Barnes, 1996, 2007; Taner et al., 1979) e converte o sinal em amplitudes de reflexão e no cosseno da sua fase instantânea (Dossi et al., 2015). O algoritmo usa o cosseno da fase para identificar qualquer evento com continuidade lateral do valor da fase, conectando fases do sinal com as mesmas polaridades e tempos de chegada próximos (Dossi et al., 2015). A impedância da reflexão permite ao sistema identificar eventos em que existe variação lateral das amplitudes ou alterações da configuração da onda refletida. O algoritmo conecta automaticamente os eventos que possuem coerência lateral, definindo horizontes, que serão depois analisados através da sua sobreposição ao perfil inicial. A análise de cada horizonte tem por objetivo a procura de eventos subparalelos próximos que podem ser classificados como parte da mesma reflexão, agrupando-os e permitindo a reconstrução das amplitudes de reflexão através do cálculo da média do cosseno da fase de cada horizonte, preservando o sinal refletido e removendo os eventos que não estejam relacionados (Dossi et al., 2015).

A identificação automática de eventos pode ser executada a partir do cálculo de derivadas espaciais depois de aplicada a transformada discreta de *Fourier*. As derivadas espaciais, em analogia com as derivadas temporais, também convertem pontos de inflexão em zeros (em termos espaciais), permitindo realçar qualquer descontinuidade espacial nos dados sísmicos (Russell & Ribordy, 2014). A análise das frequências também pode ser aplicada a derivadas espaciais, o que denota que a diferenciação na direção horizontal aumenta o conteúdo de frequências e aplica um deslocamento de fase de  $\frac{\pi}{2}$ , o que significa que a derivada poderá ser usada para detetar mudanças subtis no sinal sísmico relacionadas com interfaces como falhas e fraturas (Russell & Ribordy, 2014).

#### 4.1.1. Método escolhido para a geração de traços

Neste estudo optou-se por usar o método de interpolação de *Fourier* para gerar traços e densificar o conjunto de dados no domínio da frequência. Para isso foi usado o algoritmo *Suinterp* (Andersen, 2011), disponível no pacote de utilitários de acesso livre *Seismic Unix* (SU) (*Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines, EUA*). Em traços gerais, esse algoritmo interpola traços sísmicos entre cada par de traços já existentes. Para isso, aplica a transformada discreta de *Fourier* em cada traço e calcula as derivadas espaciais para cada par de traços sísmicos adjacentes. Depois efetua uma interpolação linear entre os traços no domínio da frequência, após o qual é aplicada a inversa da transformada discreta de *Fourier*, repondo novamente os dados no domínio do tempo. É assumido que o conteúdo em baixas frequências do sinal de entrada não sofre de *aliasing* e que os picos de amplitude mais profundos são usados para interpolar os dados em toda a sua largura de banda nas altas frequências que se encontram subamostradas.

### 4.2. ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE DENSIFICAÇÃO DE DADOS

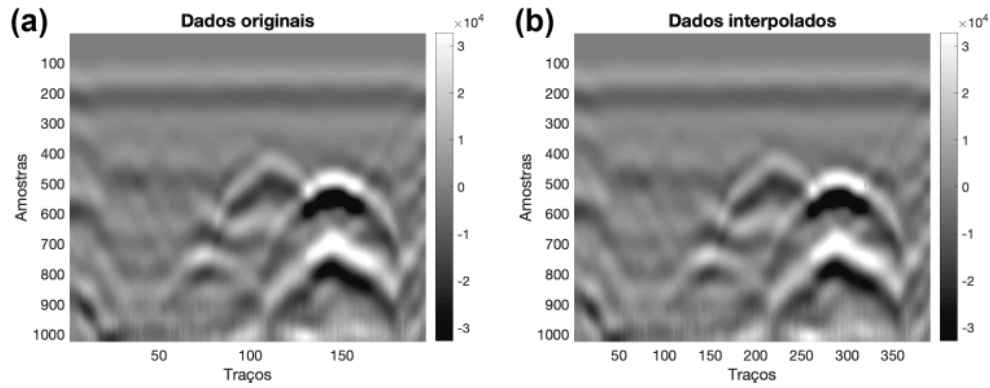
#### 4.2.1. Testes iniciais

Antes de se aplicar a metodologia a todo o conjunto de dados GPR-3D foi realizada uma etapa de teste usando um perfil de GPR-2D para se efetuar a comparação entre os dados de entrada e os de saída depois de interpolados a fim de avaliar o algoritmo *Suinterp* e verificar qual é a influência da parametrização do algoritmo nos resultados. Para a parametrização do algoritmo, além dos dados de entrada devem ser mencionados também quantos traços serão interpolados entre cada par de traços (*ninterp*), número total de traços do perfil (*nxmax*), e valores de frequências de esquina (*freq1* e *freq2*), que devem ser os valores dos limites do intervalo de frequências a considerar.

Para isso foi utilizado o perfil adquirido em ambiente laboratorial, com uma antena de 1.6 GHz e com os seguintes parâmetros de aquisição: 1024 amostras por traço, alcance temporal de 5 ns, intervalo de amostragem 0.004888 ns, e 196 traços, equidistanciados de 0.005 m. O perfil interpolado deverá possuir 391 traços, o dobro dos traços menos um. O alcance temporal mantém-se e a distância entre traços diminuirá para metade do valor inicial antes da interpolação (0.0025 m).

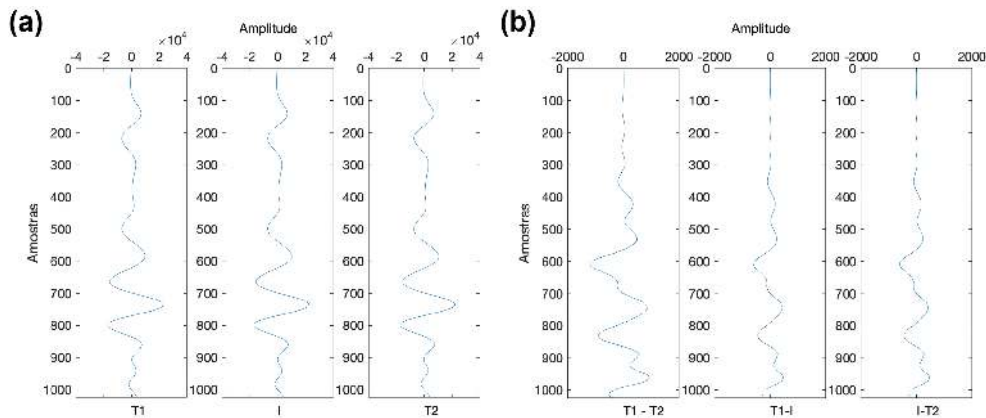
Na Figura 4.1 é mostrado o radargrama de entrada e o radargrama interpolado, em que se verifica um ligeiro aumento de nitidez após a implementação da interpolação de *Fourier* com o algoritmo *Suinterp*. Nota-se também que o intervalo de valores das amplitudes não foi modificado e a qualidade observada nos dados iniciais não diminuiu, podendo-se concluir que este método de interpolação funciona para dados de GPR.





**Figura 4.1:** a) Radargrama original. b) Radargrama interpolado através do algoritmo *Suinterp*.

Na Figura 4.2a estão representados dois traços adjacentes (T1 e T2) que deram origem ao traço interpolado (I), em que se observa que existe uma grande semelhança entre o traço interpolado e os traços originais que lhe deram origem. De forma a aumentar a percepção sobre a diferença entre os dados originais e interpolados, aplicou-se a operação de subtração entre pares de traços (T1-T2, T1-I e I-T2) e fez-se a sua representação gráfica (Figura 4.2b). (T1-T2) evidencia a diferença entre os dois traços originais e (T1-I) e (I-T2) mostram a diferença entre o traço interpolado e cada um dos traços originais. A amplitude do desvio entre os dados é maior nos dados originais, por comparação com o desvio entre os pares interpolado-original, o que poderá significar que o traço interpolado possui informação de cada um dos pares que lhe deu origem.



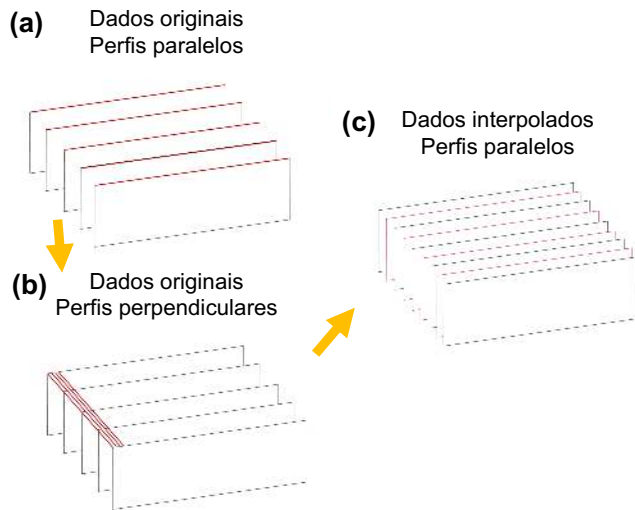
**Figura 4.2:** (a) Inspeção do traço interpolado: (T1) traço original 1; (I) traço interpolado a partir de T1 e T2; e (T2) traço original 2. (b) Subtração entre pares de traços para observar a diferença entre os conjuntos de dados: (T1-T2) diferença entre traços originais; e (T1-I) e (I-T2) diferença entre cada um dos traços originais com o traço interpolado.

#### 4.2.2. Programa de densificação 3D

Os testes anteriores e o programa definitivo foram desenvolvidos no programa MATLAB. Para se usar o algoritmo *Suinterp* houve necessidade de adaptar os dados para que possam ser admitidos como dados de entrada do algoritmo. A adaptação dos dados implica a manipulação de matrizes,

para que estes estejam espacialmente relacionados e assim se possa interpolar a informação pretendida, e a exportação das matrizes para o formato admissível para a importação no *Suinterp*.

Como os dados observados foram adquiridos em  $N$  linhas paralelas igualmente espaçadas, a importação de todos os perfis terá que ser armazenada na forma de uma matriz 3D,  $A(x_i, y_j, z_k)$ , correspondente à distribuição espacial dos traços (Figura 4.3a). A matriz 3D possui dimensão  $(x_i, y_j, z_k)$ , em que  $x_i$  e  $y_j$  são respetivamente cada linha e coluna de cada perfil e  $z_k$  define o número da amostra do traço correspondente ao par  $(x_i$  e  $y_j)$ .



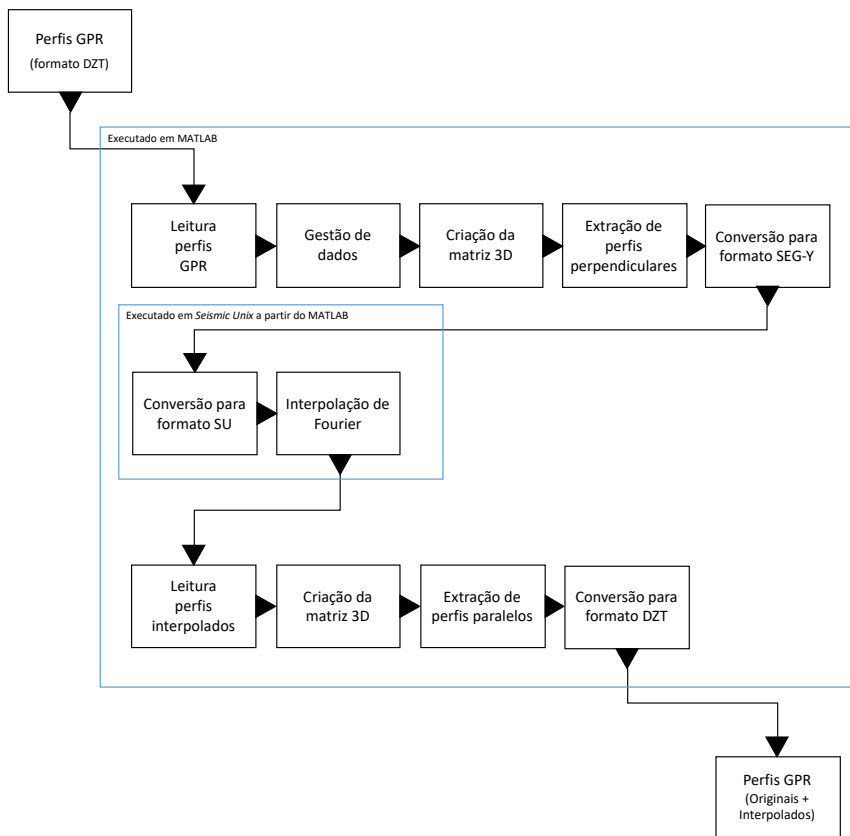
**Figura 4.3:** Esquema de organização da matriz de dados GPR 3D: (a) orientação paralela dos perfis originais, inseridos na matriz de dados 3D; (b) orientação perpendicular dos perfis, após rotação de 90°, estando os dados prontos a serem interpolados; e (c) orientação paralela dos perfis, após interpolação e após nova rotação de 90° para repor o referencial original.

Para que seja possível realizar a densificação entre os perfis é necessário redefinir perfis na direção  $y$ , significando isto que os perfis a considerar serão perpendiculares à direção inicial (Figura 4.3b). Cada um dos perfis redefinidos é composto por um traço de cada perfil original, ordenado sequencialmente de  $j=1$  até  $N_j$ . Este rearranjo dos dados é necessário devido a que o algoritmo *Suinterp* interpola um traço entre cada par de traços. A interpolação dos perfis perpendiculares será por isso aplicada tantas vezes quanto o número de traços que o perfil paralelo inicial possui. O passo seguinte consiste em repor a direção original do referencial do espaço, voltando a redefinir os perfis ao longo da direção  $x$ , como nos dados originais (Figura 4.3c). No total, o número de perfis final será  $2N-1$ .

O algoritmo de densificação segue a seguinte sequência de procedimentos, resumidos também no diagrama da Figura 4.4:

1. Parametrização preliminar: introdução do número total de perfis paralelos e do número do perfil inicial.
2. Importação dos perfis de GPR, no formato DZT: usando a rotina *readgssi*, um algoritmo MATLAB adaptado para ler ficheiros no formato DZT.
3. Determinação do comprimento máximo dos perfis, para que a matriz 3D a criar seja regular.

4. Importação de informações complementares sobre a geometria do conjunto de dados (posição inicial e final de cada perfil); todos os perfis deverão encontrar-se bem localizados no espaço; essas informações deverão ser coligidas durante o levantamento.
5. Determinação dos extremos das localizações de cada perfil.
6. Retirar efeito da aquisição em zig-zag, caso seja necessário.
7. Normalizar o comprimento dos perfis, acrescentando traços de zeros no início ou no fim do perfil, caso seja necessário, para tornar a matriz regular.
8. Posicionar os dados de cada perfil na matriz 3D (perfis paralelos).
9. Extração dos perfis perpendiculares e conversão de cada perfil perpendicular no formato SEG-Y, usando a rotina MATLAB *writesegy* (Biblioteca SegyMat).
10. Conversão para o formato SU, usando rotinas internas do programa Seismic Unix.
11. Interpolação de perfis, usando a rotina *suinterp* do Seismic Unix.
12. Importação dos perfis interpolados no formato SU, usando a rotina MATLAB *readSu* (Biblioteca SegyMat).
13. Posicionar os dados interpolados na matriz 3D.
14. Extração dos perfis paralelos (originais + interpolados).
15. Conversão dos dados para o formato DZT, usando a rotina MATLAB *writegssi*, desenvolvida para escrever ficheiros no formato DZT.



**Figura 4.4:** Fluxograma da abordagem para realizar interpolação de Fourier a dados de GPR 3D, usando o algoritmo *Suinterp*.

### 4.3. RESULTADOS

Para a produção dos resultados foram considerados vários conjuntos de dados: dados originais e dados interpolados (estes incluem a nova informação assim como a original). Os vários conjuntos considerados foram importados para o programa RADAN (GSSI Inc.) e foram processados com as mesmas operações de modo a criar o modelo de refletividades 3D para produção de cortes horizontais a várias profundidades (as mesmas consideradas no Capítulo 3).

A avaliação dos resultados deste procedimento será efetuada através do estabelecimento de comparações dos vários conjuntos de dados que se produziram para esse efeito, sendo realizada de modo qualitativo pela observação da representação gráfica dos conjuntos de dados e de modo quantitativo através da análise do Índice de Similitude Estrutural (Tabela 4.1) e do Índice de Nitidez (Tabela 4.2).

O Índice de Nitidez é um parâmetro que quantifica a nitidez de uma imagem, calculado a partir da seguinte equação (Birdal, 2019):

$$\text{Índice de Nitidez} = 100 * \sum \frac{\sum |\vec{\nabla}G|}{m \times n} \quad 4.1$$

Em que  $\vec{\nabla}G$  é o gradiente da imagem e  $m \times n$  corresponde à dimensão da matriz que define a imagem. Quanto maior for o valor obtido, maior será a nitidez dessa imagem.

O cálculo do gradiente de uma imagem é usado para selecionar os pixels mais nítidos de uma imagem (Yang et al., 2014), usado em fusão de imagens para seleção dos pixels mais nítidos (consultar Secção 5.3.3). A sua implementação numérica requer o cálculo dos coeficientes de gradiente horizontal  $\vec{\nabla}Gx$  e vertical  $\vec{\nabla}Gy$  (em que  $\vec{\nabla}$  corresponde ao vetor gradiente, e cada coeficiente que corresponde à derivada direcional na direção horizontal e vertical, respetivamente). Esses coeficientes são combinados através do cálculo do módulo do vetor gradiente (Equação 4.2). A implementação numérica para calcular os coeficientes de gradiente horizontal e vertical foi efetuada com recurso à função *getGradientH*, desenvolvida em MATLAB por Paul, Sevcenco and Agathoklis (2016).

$$|\vec{\nabla}G| = \sqrt{\vec{\nabla}Gx^2 + \vec{\nabla}Gy^2} \quad 4.2$$

Os pares de conjuntos de dados a considerar para análise do método são os seguintes:

1) Dados originais, C0 (d=0.250m) versus dados interpolados, C1 (d=0.125m): Para avaliar os efeitos da interpolação de *Fourier* na densificação lateral de perfis de GPR.

2) Dados originais, C0 (d=0.250m) versus dados decimados e interpolados, C2 (d=0.250m): Para avaliar o nível de recuperação de informação omissa através da interpolação de *Fourier*; para isso os dados originais foram decimados com a eliminação de perfis de forma intercalada (entre cada três

elimina-se um, o do meio), para tornar o espaçamento entre perfis em  $d=0.500\text{m}$ ; a interpolação irá repor o espaçamento original entre perfis ( $d=0.250\text{m}$ ).

3) Dados originais, C0 ( $d=0.250\text{m}$ ) versus dados decimados, C3 ( $d=0.500\text{m}$ ): Para avaliar que informação é perdida quando se opta por aumentar o espaçamento entre perfis de modo a tornar o levantamento mais rápido, o que poderá permitir aumentar a área prospectada.

#### 4.3.1. Dados originais ( $d=0.250\text{m}$ ) – conjunto de dados padrão – C0

O conjunto de dados originais de GPR-3D, provenientes do levantamento geofísico efetuado na Villa Romana de Horta da Torre, foram adquiridos em perfis paralelos, equidistanciados de  $0,250\text{ m}$  e foram exclusivamente processados no programa RADAN. O processamento aplicado consistiu na correção da posição, remoção do ruído de fundo, retificação de ganho, filtros espaciais, desconvolução, filtros temporais, retificação de ganho e transformada de *Hilbert*. Posteriormente foi obtido o modelo de refletividades 3D no qual foram extraídos cortes horizontais em diferentes profundidades ( $0.28$ ;  $0.33$ ;  $0.38$ ;  $0.43$ ;  $0.48$ ; e  $0.53\text{ m}$ ) e com a mesma espessura de integração ( $0.11\text{m}$ ).

Do conjunto de cortes horizontais obtidos pelo processamento dos dados originais, destacam-se os que se localizam entre as profundidades  $0.33\text{ m}$  e  $0.53\text{ m}$ , onde se observam alinhamentos compatíveis com estruturas do tipo muro cuja existência foi comprovada por escavação arqueológica. No entanto, apesar dos alinhamentos serem bastante evidentes na sua correspondência a estruturas enterradas, em algumas profundidades existe alguma dificuldade em individualizar esses alinhamentos. Esta pode dever-se aos derrubes dessas estruturas provocarem reflexões adicionais, e também ao espaçamento entre perfis, que apesar de ter um valor adequado, ainda assim poderá ser insuficiente para uma boa nitidez. Os resultados obtidos por estes dados serão considerados o padrão, a partir do qual se estabelecerão comparações com os resultados produzidos pelos outros conjuntos de dados.

De modo a compatibilizar comparações, procedeu-se à normalização das amplitudes. A comparação de resultados foi efetuada através de observação direta e pela análise dos valores do Índice de Similitude Estrutural (Tabela 4.1). Foi ainda calculado para cada conjunto de imagens o Índice de Nitidez médio, que nos dados originais apresenta o valor de  $11.44\%$  (Tabela 4.2).

#### 4.3.2. Dados interpolados ( $d=0.125\text{m}$ ) – C1

Os dados originais, espaçados de  $0.250\text{ m}$ , foram densificados com a interpolação de *Fourier* e passaram a estar espaçados de  $0.125\text{ m}$ , metade da distância inicial. A eficácia foi avaliada através da comparação gráfica entre os cortes horizontais do modelo padrão e os cortes produzidos com os novos dados interpolados (Figura 4.5). A interpolação de *Fourier* densificou a informação contida nos cortes horizontais considerados, tornando os alinhamentos de reflexões mais bem definidos e

nítidos. Não se observa produção de artefactos originados pelo processo de interpolação, como por vezes acontece quando esta é realizada no domínio do espaço.

A melhoria dos resultados da densificação é mais evidente nos alinhamentos de menor dimensão, que aparentavam menos nitidez que nos dados iniciais. Passaram a estar mais individualizados e mais perceptíveis. Nos restantes alinhamentos, que inicialmente já se apresentavam bastante claros, nota-se que houve um aumento da sua definição.

A quantificação da semelhança entre os conjuntos de dados comparados, expressa pelo Índice de Similitude Estrutural (Tabela 4.1) apresenta um valor médio de 82.34 %, o que significa que os dois conjuntos de dados são altamente semelhantes e que a interpolação não modificou negativamente os dados originais, contribuindo assim para a validação do método de interpolação no domínio da frequência. Quanto ao Índice de Nitidez médio, o seu valor é de 15.30 % (Tabela 4.2), o que significa que houve um aumento de nitidez entre os dados interpolados e os dados originais (+ 3.86 %).

#### **4.3.3. Dados decimados e interpolados ( $d=0.250m$ ) – C2**

De seguida, no sentido de avaliar o nível de recuperação dos dados através deste esquema de interpolação, foi efetuada a decimação dos dados originais, em que se eliminou um perfil entre cada três (o do meio), de modo a que a distância entre perfis passasse de  $d=0.250m$  para  $d=0.500m$ . A interpolação aplicada aos dados decimados densificou os dados de modo a que a distância entre perfis voltasse a ser igual à inicial ( $d=0.250m$ ). De seguida foi efetuada a comparação gráfica entre o conjunto de resultados obtidos com o conjunto padrão (Figura 4.6).

Tal como no caso anterior, não foram produzidos artefactos e a interpolação permitiu recuperar informação ausente. No entanto, esta não é recuperada na sua totalidade, facto evidenciado pela diminuição da definição dos alinhamentos de reflexões inicialmente presentes, observada graficamente, e pela diminuição do valor médio do Índice de Similitude Estrutural (Tabela 4.1), que diminuiu para 64.15 % (-18,19 %). O Índice de Nitidez médio diminuiu (-0,76 %) para 10.68 % (Tabela 4.2).

#### **4.3.4. Dados decimados ( $d=0.500m$ ) – C3**

Por fim, foi estabelecida a comparação entre os dados originais e os dados decimados (Figura 4.7), para avaliar o nível de informação perdida quando se aumenta o espaçamento entre perfis. Foram comparados resultados do conjunto padrão ( $d=0.250m$ ) com os produzidos com dados decimados do caso anterior ( $d=0.500m$ ). A análise gráfica dos cortes horizontais produzidos com dados decimados permite verificar que a definição dos alinhamentos de reflexões presentes nos dados originais diminuiu consideravelmente, apesar de ainda ser possível distinguir os alinhamentos mais robustos. O valor médio do Índice de Similitude Estrutural (Tabela 4.1) diminuiu para 64.74 % (-17.60 %).

Importa salientar um pormenor verificado após a análise conjunta relativa a dados decimados face a dados decimados e depois interpolados (Figura 4.8). A interpolação realizada no domínio da frequência foi capaz de reconstruir corretamente alguma informação que não estava presente nos dados decimados, observando-se que os alinhamentos de reflexões que não apresentam muita definição nos cortes feitos a partir de dados decimados, passam a estar consideravelmente melhor definidos nos correspondentes cortes produzidos a partir dos dados interpolados. O Índice de Nitidez médio deste conjunto é de 8.63 % (Tabela 4.2), bastante inferior ao valor observado no modelo padrão (-2.81 %).

**Tabela 4.1:** Índice de Similitude Estrutural entre os diversos conjuntos de dados considerados a diferentes profundidades.

Profundidade das camadas horizontais (m)	SSI (%)		
	C0 versus C1	C0 versus C2	C0 versus C3
0.28	81.17	62.49	62.78
0.33	82.50	63.02	62.62
0.38	82.44	64.98	65.49
0.43	82.65	64.16	65.23
0.48	82.66	65.10	65.47
0.53	82.62	65.17	66.87
<b>Média</b>	<b>82.34</b>	<b>64.15</b>	<b>64.74</b>

**Tabela 4.2:** Índice de Nitidez dos conjuntos de dados considerados a diferentes profundidades.

Profundidade das camadas horizontais (m)	Índice de Nitidez (%)			
	C0	C1	C2	C3
0.28	13.14	17.80	12.30	9.88
0.33	12.13	15.79	11.09	8.99
0.38	11.22	14.96	10.47	8.51
0.43	10.64	14.23	9.83	7.99
0.48	10.93	14.43	10.08	8.18
0.53	10.60	14.60	10.28	8.25
<b>Média</b>	<b>11.44</b>	<b>15.30</b>	<b>10.68</b>	<b>8.63</b>

Dados originais (C0) vs dados interpolados (C1)

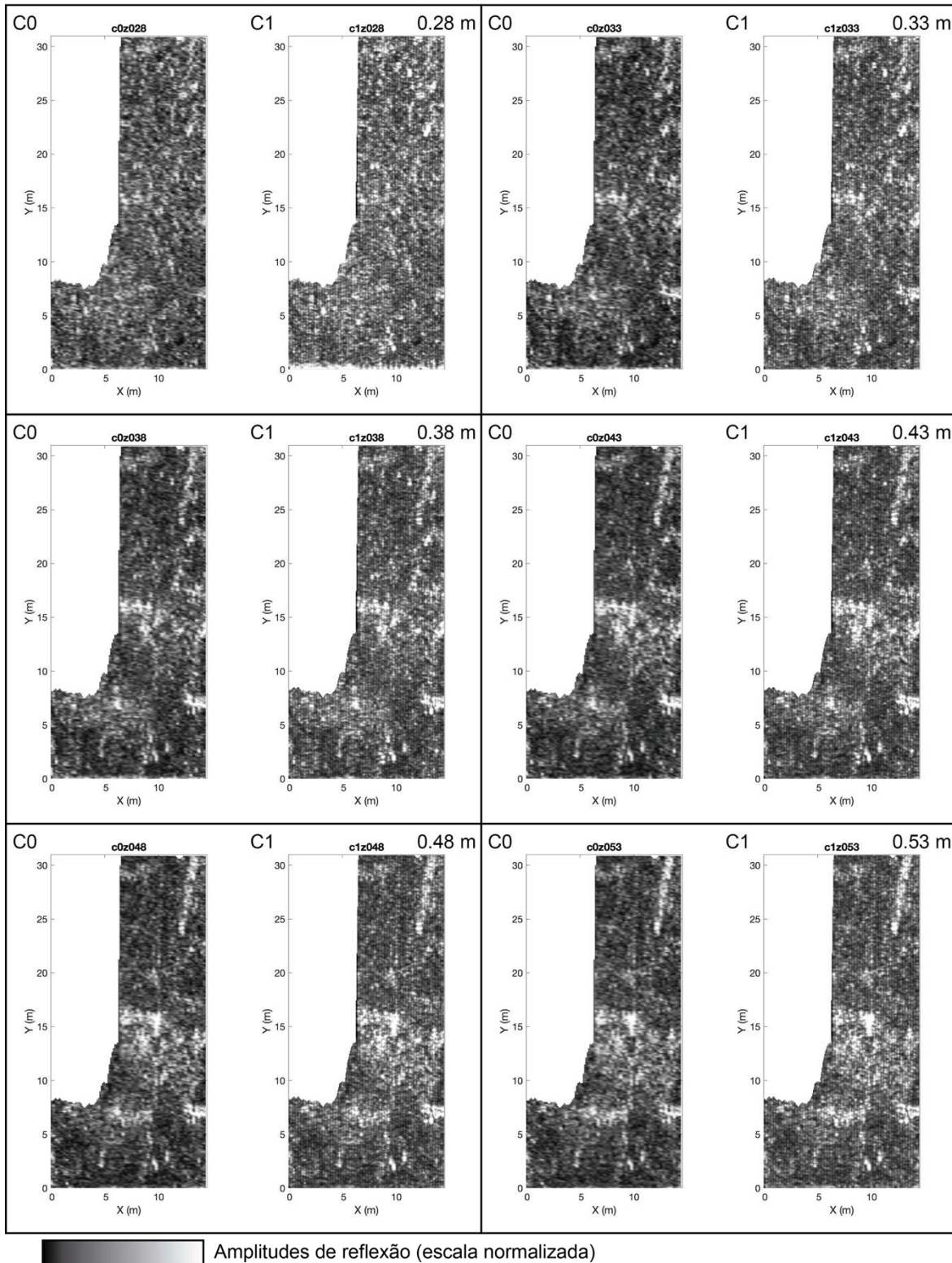


Figura 4.5: Comparação entre os dados originais (C0 –  $d=0.250\text{m}$ ) e os dados densificados através da interpolação de Fourier (C1 –  $d=0.125\text{m}$ ).



Dados originais (C0) vs dados decimados e interpolados (C2)

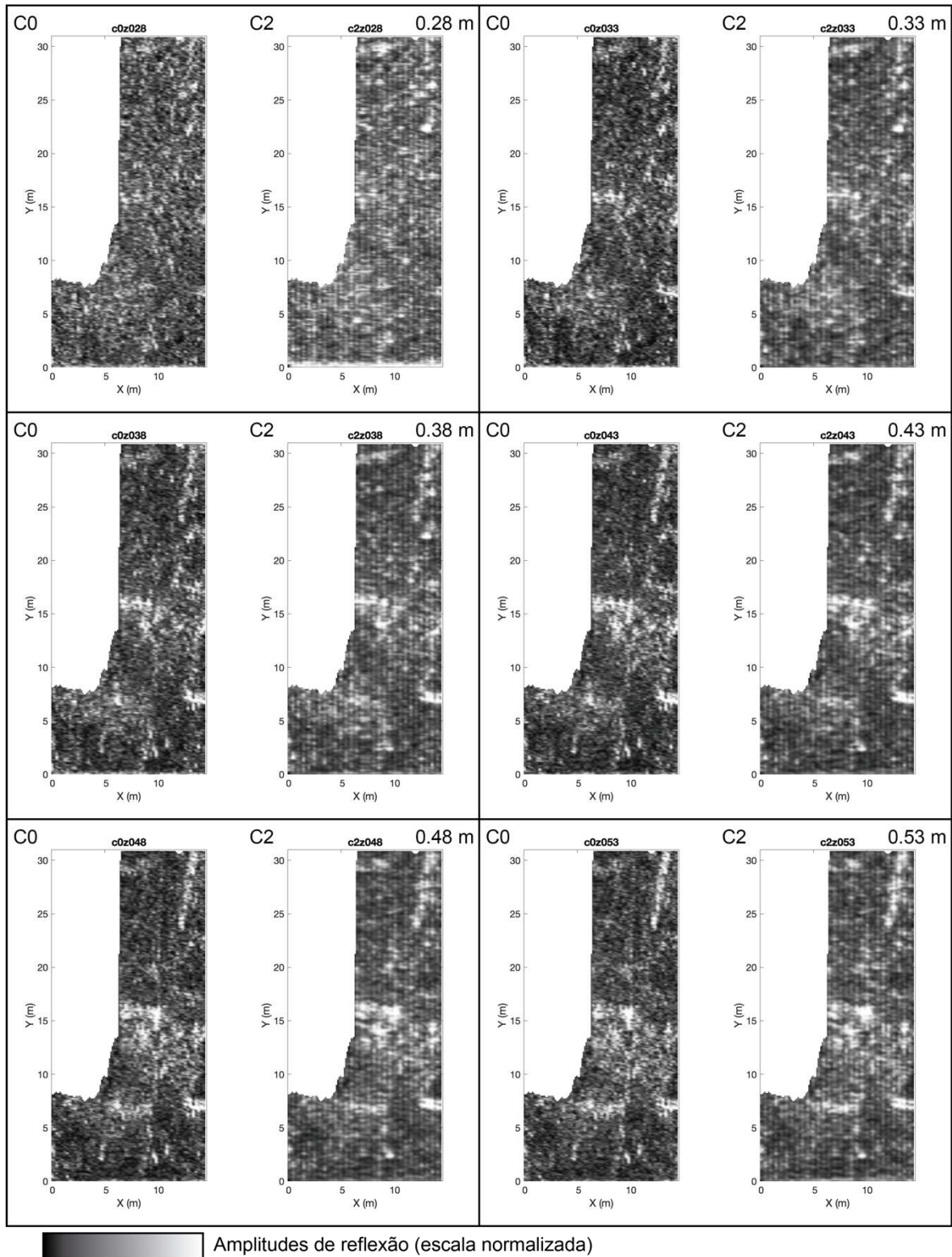


Figura 4.6: Comparação entre os dados originais (C0 –  $d=0.250\text{m}$ ) e os dados decimados e interpolados (C2 –  $d=0.250\text{m}$ ).

Dados originais (C0) vs dados decimados (C3)

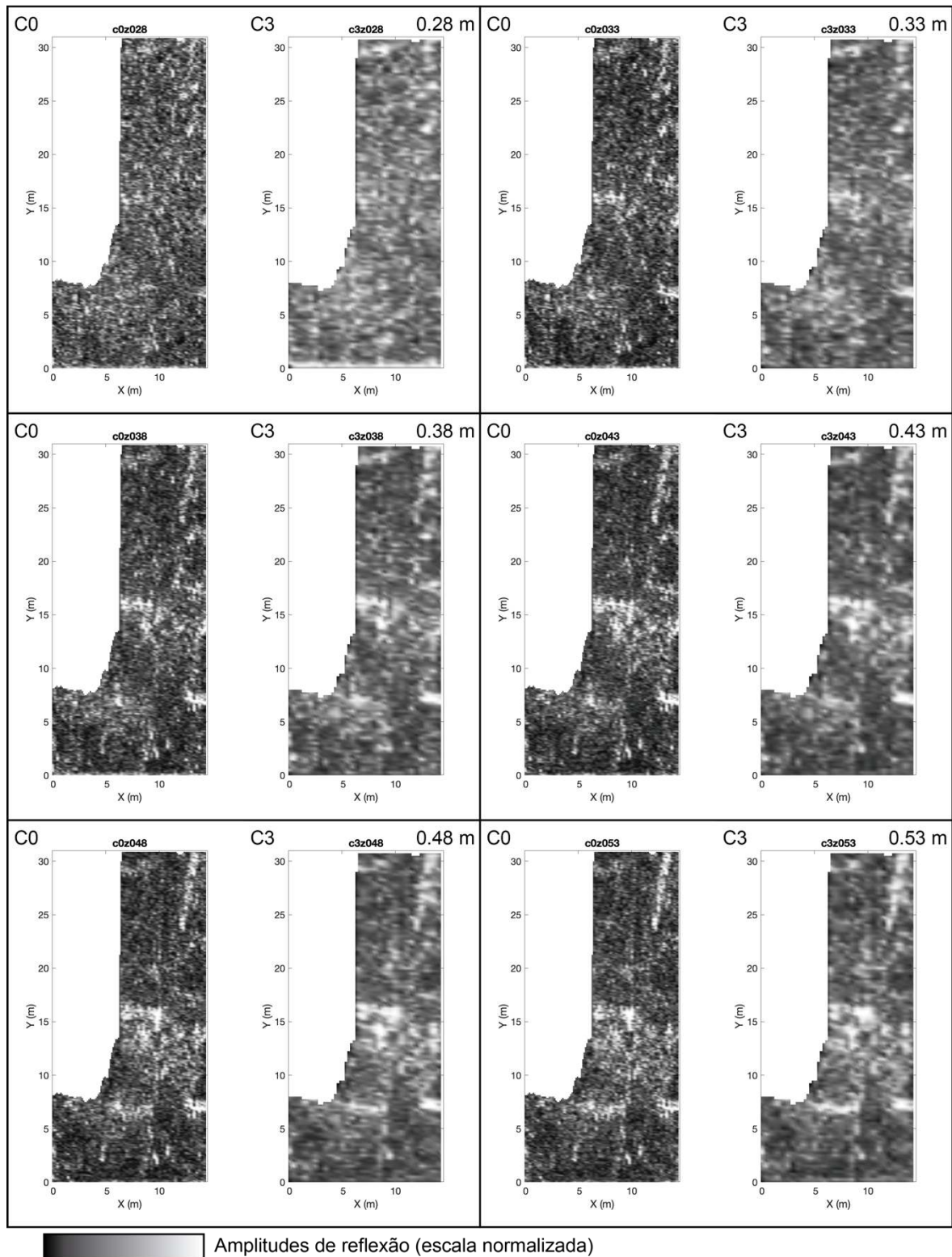
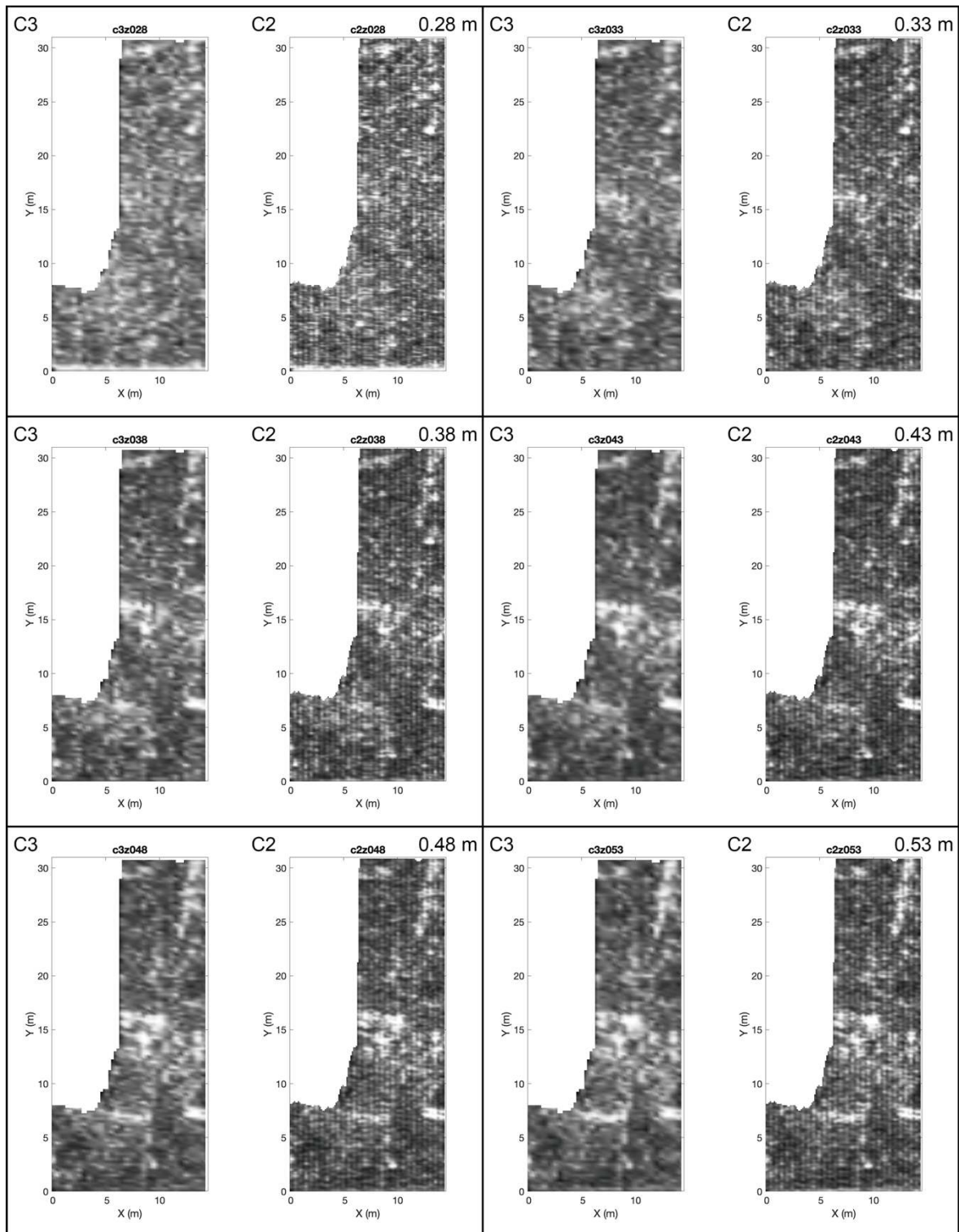


Figura 4.7: Comparação entre os dados originais (C0 – d=0.250m) e os dados decimados (C3 – d=0.500m).

Dados decimados (C3) vs dados decimados e interpolados (C2)



**Figura 4.8:** Comparação entre os dados decimados (C3 –  $d=0.500\text{m}$ ) e os dados decimados e interpolados (C2 –  $d=0.250\text{m}$ ).

#### 4.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na secção anterior foi estabelecida a comparação entre o conjunto de dados originais e os conjuntos de dados resultantes da aplicação da metodologia de interpolação de perfis de GPR realizada no domínio da frequência. A observação das representações gráficas dos resultados permitiu verificar as semelhanças e diferenças entre os conjuntos de dados considerados. A comparação foi também quantificada através do cálculo dos parâmetros Índice de Similitude Estrutural e Índice de Nitidez.

A eficiência da interpolação no domínio da frequência foi avaliada através da comparação entre os dados originais (C0) e os dados interpolados (C1). A interpolação permitiu densificar a informação contida nos cortes horizontais analisados, tornando os alinhamentos de refletores mais bem definidos e não se observando a produção de artefactos devido ao processo de interpolação, como por vezes é observado quando esta é realizada no domínio do espaço. O valor médio do Índice de Similitude Estrutural deste par de resultados é de 82.34 %, o que significa que os dois conjuntos de dados têm características muito próximas, corroborado pela comparação gráfica estabelecida. Quanto ao Índice de Nitidez, observou-se um aumento médio de 11.44 %, com os dados originais, para 15.30 %, com os dados interpolados.

O nível de recuperação de informação em falta depois de aplicada a decimação dos dados foi avaliado através da comparação entre os dados originais (C0) e os dados decimados e interpolados (C2). A interpolação no domínio da frequência permite recuperar dados, no entanto, não os recupera na totalidade conforme se pode observar graficamente pela diminuição da definição de alguns alinhamentos de refletores e sendo também confirmado pela diminuição dos valores do Índice de Similitude Estrutural, cujo valor médio passou a ser de 64.15 %. Os dois conjuntos de dados são semelhantes, mas a interpolação não consegue recuperar a parte da informação ausente que estava nos perfis originais decimados, sem expressão significativa nos perfis adjacentes que foram mantidos. A eficiência da recuperação depende muito da dimensão dos objetos a recuperar. Os que possuem dimensões inferiores ao espaçamento entre perfis dificilmente poderão ser recuperados. O Índice de Nitidez médio dos dados decimados e interpolados também diminuiu, para 10.68 %.

O nível de informação perdida quando se opta por aumentar o espaçamento entre perfis, para tornar o levantamento mais extenso, foi avaliado através da comparação entre os resultados produzidos com dados originais (C0) e os produzidos com dados decimados (C3), tendo-se verificado que o Índice de Similitude Estrutural possui valor médio de 64.74 %, valor semelhante à comparação C0 vs C2, o que poderá ser interpretado que a densificação de dados muito espaçados não é capaz de reconstruir dados sobre a qual não existe informação nos dados adjacentes. A quantidade de informação contida no conjunto de dados decimados, quando comparado com conjunto original, diminuiu consideravelmente, verificando-se sobretudo pelo decréscimo da definição de alinhamentos de reflexões que estão presentes nos dados originais e pela diminuição do Índice de Nitidez para um valor médio de

8.65 %. No entanto, para o caso apresentado, a distribuição espacial dos alinhamentos de refletores permite ainda avaliar a subsuperfície sobre a existência de estruturas enterradas no local.

Ao analisar graficamente os dados decimados (C3) e os dados decimados e interpolados (C2), verifica-se que o método de interpolação proposto é capaz de reconstruir alguma informação que se encontra ausente a partir da informação contida nos perfis existentes, sem no entanto ser capaz de reconstituir dados quando os traços adjacentes não contiverem indícios desses dados. Esta metodologia poderá permitir que se sacrifique a densidade de dados adquiridos no campo, podendo, em parte, ser recuperada na etapa de processamento usando a presente técnica de interpolação aplicada no domínio da frequência, mas apenas em condições em que os objetos a detetar possuam dimensões que permitam ser detetados pelos perfis adjacentes. O aumento do espaçamento entre perfis poderá provocar subamostragem que não poderá ser resolvida através desta técnica, uma vez que é necessário que não se verifique este fenómeno para que possa ser aplicada.

Para dados à partida densos, a metodologia de interpolação irá promover o aumento de contraste e nitidez nos contornos de refletores com correspondência com estruturas enterradas e o meio envolvente. Esta metodologia não provoca deterioração dos dados nem provoca artefactos.

#### 4.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Constata-se que, por vezes, em levantamentos de GPR-3D, a subamostragem de perfis implementada impede que se possa avaliar o conteúdo da subsuperfície em termos de estruturas arqueológicas, com o detalhe que seria possível se a separação entre perfis fosse menor. Outras vezes, os dados apresentam secções com lacunas, ou em que a informação está praticamente ausente, devido a interrupções que é preciso fazer ou à aquisição dos dados ter sido feita em condições de baixa percetibilidade (por exemplo devido a falta de contraste entre possíveis estruturas e o meio envolvente ou ao próprio meio, que no caso de ser composto por argila atenua drasticamente a onda eletromagnética emitida pela antena de GPR). Mesmo que os dados se apresentem bem amostrados, pode ser útil que estes possam estar mais densos, para que se possa verificar um aumento da resolução gráfica dos mesmos, permitindo refinar a avaliação sobre o conteúdo da subsuperfície. A necessidade de densificar dados de GPR motivou a conceção da metodologia proposta, através do uso de técnicas de interpolação aplicadas no domínio da frequência, metodologia usada com sucesso na reconstrução de dados sísmicos.

A metodologia de interpolação apresentada para densificar os dados de GPR (INT-FFT, Anexo 2) consiste numa abordagem de reconstrução de dados em falta a partir do uso combinado de transformadas matemáticas (transformada discreta de *Fourier*) e de filtros preditivos. Esta técnica possibilita que se calcule o sinal em falta, bastando para isso que sejam cumpridos dois requisitos: os dados no

domínio da frequência devem ser limitados num intervalo de valores; e devem poder ser representados por uma distribuição de coeficientes de *Fourier* (condições verificadas). O algoritmo de interpolação de traços sísmicos que se usou para interpolar os perfis de GPR, *Suinterp*, faz uso de rotinas de identificação automática de eventos, através do cálculo das derivadas espaciais, com o objetivo de identificar descontinuidades no espaço a partir da deteção de mudanças muito subtis no sinal, permitindo assim que se efetue uma interpolação mais eficaz, sem ocorrência de artefactos nem deterioração do sinal. Aplicando o algoritmo a dados de GPR, a cada dois traços de um radargrama será interpolado um novo traço entre os dois existentes, contendo informação referente aos dois que lhe deram origem.

Concebida a abordagem e realizados com sucesso alguns testes para avaliar a compatibilidade dos algoritmos de dados sísmicos com dados de GPR, foi criado um algoritmo capaz de lidar com dados de GPR a três dimensões, de modo a que sejam interpolados novos perfis entre cada dois existentes, usando o algoritmo *Suinterp*. De uma forma muito resumida, o algoritmo reorganiza os dados de entrada, permitindo que se aplique a interpolação no domínio da frequência e voltando a repor a sua forma original, cujos dados de saída são os dados já densificados. Todas as operações desta abordagem foram realizadas a partir de um único algoritmo escrito em MATLAB.

Os testes realizados à aplicação da metodologia a dados de GPR-3D permitiram avaliar a eficácia da interpolação, o nível de recuperação de dados omissos e o nível de informação perdida quando se opta por aumentar a distância entre perfis na etapa de aquisição dos dados.

O uso da metodologia de interpolação de perfis de GPR no domínio da frequência evidenciou ser vantajosa na densificação de dados de GPR-3D para aumento da nitidez dos dados. Deve ser referido, no entanto, que a metodologia é eficaz quando os dados são à partida suficientemente densos para permitirem detetar a presença de objetos enterrados na subsuperfície. A técnica não é capaz de gerar informação que não esteja contida nos dados de entrada do algoritmo, logo se estes estiverem subamostrados, a técnica não será capaz de produzir a informação em falta.

## CAPÍTULO 5

### FUSÃO DE DADOS GEOFÍSICOS DE GPR E GRADIENTE VERTICAL MAGNÉTICO

#### ALGORITMO FUSÃO-GPR-MAG

Neste capítulo é explorada uma abordagem que permite a combinação de dados de GPR e de gradiente vertical do campo magnético através de algoritmos avançados de fusão de dados. O objetivo deste método é criar imagens melhoradas a partir da combinação de dados, que individualmente produzem imagens de qualidade inferior à da imagem que resulta da combinação dos dois conjuntos de dados. A abordagem foi baseada em metodologias de processamento de imagens médicas para a detecção de tumores cerebrais, em situações onde as várias imagens usadas possuem baixa perceptibilidade, tal como se verifica com frequência em situações geofísicas. Os algoritmos de fusão permitem a obtenção de uma imagem de qualidade objetivamente superior à dos dados de entrada.

O método de fusão utilizado e testado neste trabalho associa algoritmos de decomposição de dados com recurso à transformada discreta de *Wavelet* 2D, com técnicas de fatorização, com recurso à Decomposição em Valores Singulares Multi-resolução. Este esquema de fusão de dados permite selecionar informação útil quer nas baixas frequências do sinal como também nas altas frequências. É um tratamento que além de possibilitar a obtenção de uma imagem final composta pelas melhores informações de duas imagens de diferentes naturezas, logo, em princípio, com maior qualidade e mais definida do que as que lhe deram origem.

A abordagem proposta foi testada em três pares de dados de GPR e gradiente vertical magnético, cujo nível de perceptibilidade varia de ordem decrescente, começando por dados de perceptibilidade elevada, passando para dados de perceptibilidade intermédia e depois para dados de perceptibilidade baixa.

## **5.1. BAIXA PERCETIBILIDADE EM DADOS GEOFÍSICOS**

Quando se implementam levantamentos geofísicos em ambiente arqueológico pretende-se efetuar a inspeção da subsuperfície para avaliar a existência de estruturas enterradas. No Capítulo 2 foram identificadas algumas situações que impossibilitam a boa detecção dessas estruturas, nomeadamente: a presença excessiva de ruído em dados de GPR, que impede a distinção entre ruído e informação útil (explorada no Capítulo 3); e a subamostragem na direção perpendicular aos perfis que se verifica frequentemente nos cortes horizontais do modelo de GPR-3D, provocada por uma excessiva distância entre perfis (explorada no Capítulo 4).

Em vários trabalhos realizados, apesar dos fortes vestígios visíveis à superfície, a verdade é que quer os resultados das prospeções de GPR quer de gradiente vertical do campo magnético não permitem perceber claramente as estruturas espectáveis. Essa falta de percetibilidade, certamente devida às condições físicas e químicas do substrato e das próprias estruturas arqueológicas, manifesta-se nos dados através de uma diminuição da razão entre o sinal e o ruído. Os resultados obtidos com este tipo de dados carecem do contraste que permite uma boa interpretação sobre o conteúdo de estruturas enterradas na subsuperfície analisada. Nessas situações, embora a quantidade de ruído seja elevada, crê-se que o sinal registado pelas duas técnicas, ainda que ténue, contém informação útil sobre as propriedades físicas das estruturas. Também se crê que embora a interpretação dos resultados produzidos por cada uma das técnicas isoladamente não permita interpretações conclusivas, se analisados conjuntamente, as estruturas que só debilmente eram percebidas podem ganhar robustez a ponto de poderem ser claramente avaliadas.

Em semelhança à abordagem usada em Imagiologia Médica foram usadas duas imagens que resultam do processamento de dois conjuntos de dados de natureza diferente adquiridos sobre a mesma superfície de estudo. Uma é o corte horizontal extraído de um modelo GPR-3D, a outra é um mapa amplitudes do gradiente vertical do campo magnético. São duas imagens digitais que apesar de terem a mesma configuração geométrica (cobrem a mesma área e têm o mesmo número de pixéis), evidenciam propriedades físicas diferentes (constante dielétrica e suscetibilidade magnética, respetivamente), e por isso, nas mesmas posições podem revelar feições um pouco diferentes que resultam nas diferenças dos alinhamentos espaciais revelados por ambas as técnicas.

## **5.2. PRIMEIRA APROXIMAÇÃO**

É frequente sermos confrontados com situações em que os resultados, apesar de provirem de locais prospetados onde se sabe que existem estruturas enterradas e onde os dados foram registados segundo as melhores e mais cuidadas práticas e processados mediante metodologias adequadas, não deixam perceber as estruturas com a nitidez que se esperava. Mesmo depois de desenvolvidos esforços para os tentar aprimorar através de um processamento mais cuidado, personalizando filtros que separam



o ruído de fundo da informação útil correspondente às estruturas enterradas que se pretende evidenciar, os resultados não são satisfatórios. Parte dessa problemática foi estudada e apresentada no Capítulo 3, através do uso da técnica de SVD aplicada no domínio de *Fourier*, em dados de GPR. No entanto, em determinados conjuntos de dados, por mais processamento que seja efetuado, não é possível extrair informação inequívoca sobre o conteúdo da subsuperfície, ou seja, a perceptibilidade sobre a existência de estruturas enterradas é baixa. Esta incapacidade originou a procura por uma solução que ajudasse a interpretar dois conjuntos de maus resultados de natureza diferente, aproveitando o que de melhor existisse em cada um para produzir um terceiro resultado capaz de reconstruir a geometria das estruturas. Uma vez que os métodos de GPR e de gradiente vertical do campo magnético são bastante usados em prospeção geofísica para Arqueologia, sendo também dos métodos que proporcionam melhores resultados em termos de detetabilidade de estruturas enterradas, pensou-se usar dados provenientes desses dois métodos para ensaiar uma abordagem de processamento que permitisse a concretização do objetivo. Para isso, foram usados pares de dados de GPR e gradiente vertical magnético, adquiridos exatamente sobre a mesma superfície. Cada um desses pares de dados foi processado para produzir uma imagem da subsuperfície. Com os dados GPR foi produzido um modelo 3D de onde se extraiu uma camada horizontal. Os dados de magnética foram processados para produzir uma imagem do gradiente vertical do campo magnético. Tanto uns como outros, foram dados cedidos pelo Instituto Andaluz de Geofísica, da Universidad de Granada, provenientes de um levantamento geofísico de GPR e de gradiente vertical do campo magnético, realizado nas imediações do aeroporto de Córdoba, Espanha, no sítio arqueológico Romano de *Cortijo de Quintos*, para planeamento da escavação arqueológica a efetuar após a interpretação desses dados geofísicos (Peña et al., 2008). De entre um conjunto de várias áreas estudadas nesse local foram selecionados três conjuntos com diferentes níveis de perceptibilidade, cuja descrição será efetuada na secção de resultados: perceptibilidade elevada; perceptibilidade intermédia; e perceptibilidade baixa.

A abordagem inicial teve como objetivo a determinação de padrões espaciais que sugerissem alinhamentos de refletores que pudessem ter correspondência com a existência de estruturas enterradas. A procura de alinhamentos e padrões foi efetuada através do uso de funções desenvolvidas para análise de imagem digital e contidas na *Toolbox* Análise e Segmentação de Imagens do programa MATLAB. As funções dessa *toolbox* permitem segmentar imagens (Smith et al., 1979), detetar limites e formas (Canny, 1986; Gonzalez & Woods, 2002), propriedades das imagens, análise textural (El-Sayed & Hafeez, 2012; Gonzalez & Woods, 2002), estudo da qualidade e aplicação de transformadas matemáticas. Das diversas funções disponíveis destacam-se as funções de segmentação de imagem, que analisam a informação contida nos píxeis que a definem e os organizam em grupos em função das semelhanças encontradas. Para isso, o utilizador necessita de decidir a quantidade de grupos que devem ser procurados. Porque a qualidade dos resultados produzidos por estes algoritmos é forte-

mente dependente da informação *a priori* e porque em condições de baixa perceptibilidade não conseguem efetuar a distinção entre informação útil e ruído, só em condições particulares podem constituir uma ferramenta eficaz para analisar conjuntos de dados. Além disso, estando em condições de baixa perceptibilidade, as funções de segmentação de imagens não conseguem efetuar a distinção entre informação útil e ruído. Pela mesma razão as funções de análise de possíveis objetos contidos na imagem (limites, bordos e formas geométricas) também não são úteis para aplicar ao caso de estudo. Já as funções de análise de textura, nomeadamente as que permitem calcular a entropia local de uma imagem considerando os pixels vizinhos, foram bastante úteis, uma vez que num conjunto de dados de perceptibilidade elevada, o mapa de entropia local revela alguns alinhamentos de reflexões que não são evidentes na imagem original. A função MATLAB que calcula a entropia local de uma imagem (*entropyfilt*) devolve uma interpretação numérica da própria imagem sem depender da parametrização do utilizador.

Em Teoria da Informação existe o conceito de Entropia de *Shannon*, que assenta em alguns pressupostos de Inferência *Bayesiana* (Mackay, 2005). A funcionalidade desta grandeza sugeriu que pudesse ser útil na obtenção de mapas de probabilidade ou de verosimilhança aplicáveis ao problema em questão. As primeiras tentativas de conceção de um algoritmo que combinasse os conjuntos de dados para obtenção de um mapa final de probabilidade de existência de estruturas enterradas não produziram resultados promissores. Verificou-se que a abordagem falhava no cumprimento dos pressupostos matemáticos que regulam a estimativa do mapa de probabilidade. Houve necessidade de continuar a estudar o problema no sentido de combinar os conjuntos de dados geofísicos.

A evolução deste estudo remeteu para uma solução inspirada nas abordagens usadas em Imagiologia Médica para deteção de tumores cerebrais (Du et al., 2016; N. Mittal & Gupta, 2015; Udhaya Suriya & Rangarajan, 2017; Xu et al., 2016), em que dados provenientes de métodos distintos e também com problemas semelhantes de baixa perceptibilidade, são combinados através do uso de algoritmos de fusão de imagens, cuja implementação numérica pode ser efetuada de diversas formas consoante o objetivo que se pretenda concretizar.

### 5.3. ALGUNS CONCEITOS SOBRE FUSÃO DE IMAGENS

A fusão de imagens tem sido uma temática bastante investigada nos últimos anos com diversos campos de aplicação, como por exemplo, em análise e melhoramento de imagens, visão computacional (Gautam & Kumar, 2015) e, com mais relevância, em Imagiologia Médica. Nesta última área a fusão utiliza-se para melhorar imagens provenientes de exames complementares de diagnóstico que podem, por si só, não ser suficientemente detalhadas para que seja elaborado o diagnóstico de uma patologia com o devido rigor e exatidão necessários. O exemplo da fusão de imagens em Medicina facilita o entendimento do seu principal objetivo. A integração de toda a informação significativa

contida em duas representações do mesmo objeto de estudo, feitas a partir de dados captados por métodos de exame diferentes, para ser criada uma imagem fundida do objeto, mais informativa que as duas que lhe deram origem e, conseqüentemente, com um aspeto gráfico de qualidade superior. No final, o objetivo fica cumprido porque essa terceira imagem é capaz de conferir uma melhor interpretação sobre o objeto de estudo que as duas que lhe deram origem. No caso prático da aplicação em imagens médicas, o uso desta técnica poderá marcar a diferença na identificação e diagnóstico de um tumor, uma vez que poderá apenas ser possível a sua identificação na imagem obtida por fusão, impossível de ser detetado nas imagens iniciais provenientes dos métodos diferentes.

No exemplo mencionado (Gautam & Kumar, 2015), as imagens usadas como dados de entrada nos algoritmos de fusão são obtidas por diferentes sensores, nomeadamente pelo método de Tomografia Computacional (CT) e pelo método de Imagiologia de Ressonância Magnética (MRI). Os dados de CT são usados para evidenciar informação sobre ossos, vasos sanguíneos e tecidos moles, enquanto que os dados de MRI evidenciam com maior detalhe tecidos moles. Individualmente, os resultados de cada um dos exames podem não fornecer informação suficiente sobre a parte do corpo analisado que contém ossos e tecidos. Deste modo, a combinação dos dados de CT e MRI através de algoritmos de fusão de dados permitem a criação de uma imagem fundida com toda a informação relevante proveniente das duas imagens iniciais. Este tipo de fusão de dados é designado por fusão de imagens multisensor.

Os algoritmos de fusão de imagens podem ser classificados em três categorias (Gautam & Kumar, 2015): (a) fusão ao nível do pixel; (b) fusão ao nível do aspetos/caraterísticas; e (c) fusão ao nível de decisão.

A fusão ao nível do pixel é definida pelo processo em que se combina informação relevante de cada uma das imagens utilizadas como dados de entrada, pixel a pixel, para gerar uma imagem composta que contém informação mais detalhada que as imagens de entrada individualmente. Este tipo de fusão é de fácil implementação numérica, consumindo poucos recursos computacionais e temporais, sendo por isso o tipo mais utilizado em fusão de imagens (Mitianoudis & Stathaki, 2007).

A fusão baseada em aspetos/caraterísticas usa atributos das imagens de entrada como a cor, limites e texturas, para seleccionar as partes das duas imagens que irão contribuir para a criação da imagem fundida (Sasikala & Kumaravel, 2007).

A fusão ao nível de decisão é um tipo de fusão de alto nível, que combina resultados de diversos algoritmos para criar uma decisão final sobre o processo de fusão das imagens de entrada (Tao & Veldhuis, 2009).

Sobre a implementação numérica dos algoritmos de fusão, estes podem ser aplicados no domínio espacial e no domínio transformado. No domínio espacial, a fusão pixel a pixel é realizada em todas

as imagens de entrada para se obter uma única imagem fundida. Destacam-se as seguintes técnicas de fusão com implementação no domínio espacial: cálculo da média (Pajares & de la Cruz, 2004; Pu, 2000), Análise de Componentes Principais (Naidu & Raol, 2008; Sadhasivam et al., 2011), Intensidade-Matiz-Saturação (Koutsias et al., 2000; Wang et al., 2005) e Filtro Passa-Alto (Chavez et al., 1991). Os métodos espaciais por vezes provocam efeitos negativos nas imagens fundidas, nomeadamente deformação e contraste reduzido. Para superar esse tipo de problemas foram concebidas abordagens de fusão aplicadas no domínio transformado. São processos que envolvem a decomposição das imagens, por forma a que essa decomposição forneça informações direcionais em todo o domínio informativo da imagem. Assim, os elementos dessa decomposição contêm informações exclusivas e com diferentes resoluções. As transformadas matemáticas mais usadas neste tipo de fusão são a transformada discreta de *Wavelet* (Li & Manjunath, 1994), transformada de *Wavelet* estacionária (Li et al., 2012), transformada de *Curvetet* (Ali et al., 2010) e transformada *Contourlet* não-subamostrada (Wang et al., 2004).

A abordagem que foi usada para implementar a fusão de dados deste trabalho foi baseada no trabalho de Gautam and Kumar (2015), que, ao longo das várias etapas combina várias técnicas para a análise das imagens, nomeadamente a transformada de *Wavelet* 2D e a Análise de Componentes Principais (Naidu & Raol, 2008). As imagens de entrada são separadamente decompostas, através do cálculo da transformada discreta de *Wavelet* 2D, em sub-bandas de frequências baixas e altas; depois é selecionada a informação relevante de cada uma delas através de Análise de Componentes Principais e por fim é feita a fusão. Nesta abordagem, a implementação numérica que permite analisar as componentes principais da seleção de dados, é efetuada através do uso da técnica de Decomposição em Valores Singulares Multi-resolução (Naidu, 2011), aplicada à sub-banda de baixa frequência, obtida através da aplicação da transformada discreta de *Wavelet* 2D aos dados de entrada, que sendo a parte de aproximação, possui detalhes como bordos, texturas e limites e mudanças na nitidez da imagem (Gautam & Kumar, 2015; Naidu, 2011).

De seguida serão introduzidos alguns dos conceitos usados na abordagem de fusão de dados geofísicos apresentada, nomeadamente: a transformada discreta de *Wavelet*, a Decomposição em Valores Singulares Multi-resolução; o gradiente de uma imagem; e regras de fusão.

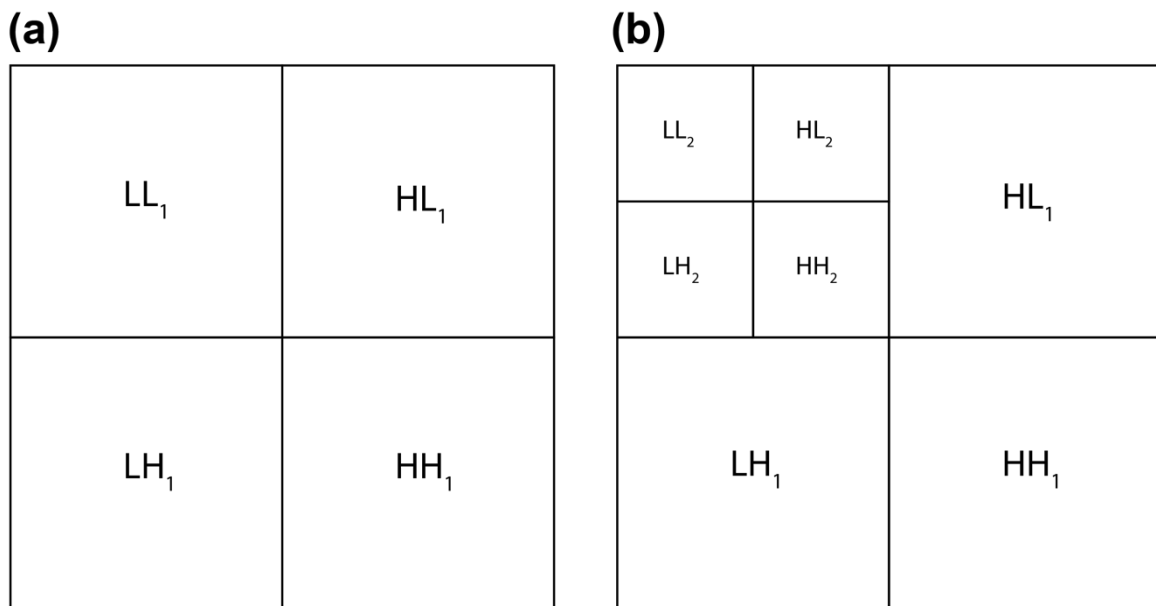
### 5.3.1. Transformada discreta de *Wavelet*

O uso das transformadas de *Wavelet* surgiu na década de 1980 como uma alternativa ao uso da transformada de *Fourier* de curta duração (Mallat, 1989; Naidu & Raol, 2008). Na teoria de *Fourier* um sinal é decomposto numa soma de senos e cossenos, conferindo uma boa resolução no domínio da frequência, enquanto que na teoria de *Wavelet* o sinal é representado por um conjunto de funções de *Wavelet*, o que confere boa resolução quer no domínio do tempo quer da frequência. A transformada

de *Wavelet* é uma operação amplamente usada em processamento de imagem uma vez que permite a decomposição multi-resolução de uma imagem numa base biortogonal, resultando numa representação de imagens não redundantes (Naidu & Raol, 2008).

De acordo com Gautam and Kumar (2015), a aplicação da transformada discreta de *Wavelet* a uma imagem  $I(x,y)$ , consiste na aplicação, na direção horizontal, de um filtro passa-baixo L e de um filtro passa-alto H, criando as matrizes de coeficientes  $I_L(x,y)$  e  $I_H(x,y)$ , e na direção vertical, de um filtro passa-baixo e de um filtro passa-alto, para criar as sub-bandas (sub-imagens)  $I_{LL}(x,y)$ ,  $I_{LH}(x,y)$ ,  $I_{HL}(x,y)$  e  $I_{HH}(x,y)$  (Figura 5.1). A sub-banda  $I_{LL}(x,y)$  representa a parte de aproximação da imagem, que contém a informação média da imagem correspondente às frequências baixas, podendo ser considerada uma imagem suavizada e subamostrada da imagem inicial. As sub-bandas  $I_{LH}(x,y)$ ,  $I_{HL}(x,y)$  e  $I_{HH}(x,y)$  representam a parte detalhada da imagem de entrada, contendo a informação direcional nas direções horizontal, vertical e diagonal, correspondente às frequências altas. A multi-resolução é obtida se for aplicada a transformada de *Wavelet* sucessivamente à sub-banda das frequências baixas. A imagem decomposta pode ser reconstruída através da aplicação da transformada inversa de *Wavelet*.

A função do MATLAB que implementa a transformada discreta de *Wavelet* 2D é a função *dwt2* e a inversa é aplicada através da função *idwt2*.



**Figura 5.1:** Esquema representativo da aplicação da transformada de *Wavelet* a uma imagem (Gautam and Kumar, 2015), em que são exibidos: (a) Um nível de decomposição; (b) Dois níveis de decomposição.

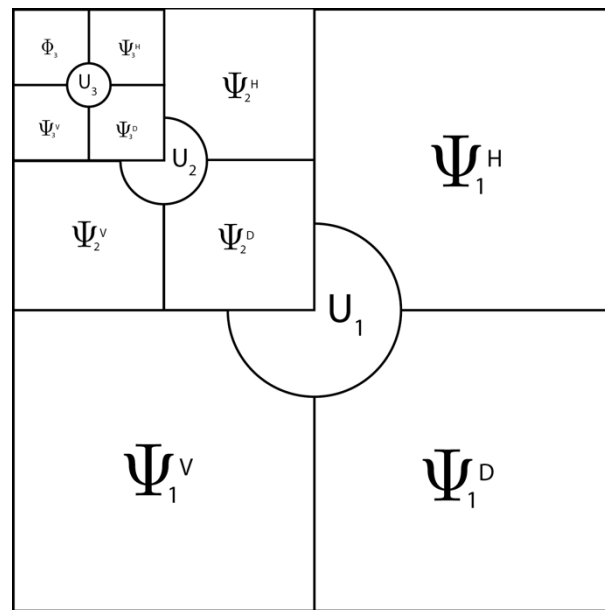
### 5.3.2. Decomposição em Valores Singulares Multi-resolução

A Decomposição em Valores Singulares Multi-resolução (MSVD) é um caso de implementação da técnica de SVD (descrita no Capítulo 3, Secção 3.3.4) a dados em que foi aplicada a transformada

discreta de *Wavelet* 2D. Nas transformadas de *Wavelet*, o sinal das sub-bandas de decomposição é filtrado separadamente com filtros passa-baixo e passa-alto. No caso da aplicação de MSVD, em vez de se aplicar filtros às sub-bandas, aplica-se a técnica de SVD (Naidu, 2011) de modo a selecionar a informação útil de cada sub-banda.

Ao aplicar-se MSVD a uma sub-banda são obtidas duas matrizes: uma matriz  $U$ , que contém os vetores singulares da sub-banda; e outra matriz, em que cada linha define, respetivamente e por ordem, a parte de aproximação  $\Phi$  da sub-banda (primeira linha), correspondente aos valores singulares mais altos, e as partes detalhadas  $\Psi$  (seguintes três linhas), correspondentes aos restantes valores singulares (Figura 5.2). A imagem decomposta por esta técnica pode ser reconstruída através da aplicação da inversa de MSVD.

A implementação numérica que permite efetuar a Decomposição em Valores Singulares Multi-resolução é a função *MSVD* e a inversa é aplicada com a função *IMSVD*, ambas criadas em MATLAB por Naidu (2011).



**Figura 5.2:** Estrutura da decomposição MSVD de uma imagem, em que são exibidos três níveis de decomposição (Naidu, 2011).

### 5.3.3. Gradiente de uma imagem

O cálculo do gradiente foi concebido com o objetivo de fundir imagens cuja regra de fusão é a seleção dos pixéis mais nítidos do conjuntos das imagens a fundir, de modo a construir uma nova imagem de qualidade superior, com todos os pixéis melhor focados (Yang et al., 2014). Os autores conceberam uma medida de foco de nitidez que permite selecionar os coeficientes pretendidos nas matrizes que definem as sub-bandas obtidas pela aplicação da transformada discreta de *Wavelet*. A medida de nitidez é uma função de *Tenengrad* baseada num operador de *Sobel* que combina informação dos

pixéis vizinhos através do uso de uma janela fixa que percorre toda a matriz de dados (Yang et al., 2014). O operador de *Sobel* em que se baseia a função de *Tenengrad* remete para o operador de *Prewitt*, que é usado em processamento de sinal para detecção de bordos e contornos numa imagem (Chaple et al., 2015). Tecnicamente é um operador de diferenciação discreta que calcula uma aproximação do gradiente da função de intensidade da imagem na direção horizontal e vertical, permitindo determinar a direção do maior aumento possível da cor clara para a cor escura e a respetiva taxa de mudança. Esta medida de nitidez pode ser usada para selecionar os pixéis de uma imagem que lhe conferem maior nitidez.

O método de fusão através do cálculo do gradiente, proposto por Yang *et al.* (2014), é usado para fundir as sub-bandas correspondentes às altas frequências obtidas pela aplicação da transformada discreta de *Wavelet* a duas imagens (sub-bandas LH, HL e HH). A sua implementação numérica requer o cálculo, para cada sub-banda das duas imagens, dos coeficientes de gradiente horizontal  $\vec{V}G_x$  e vertical  $\vec{V}G_y$  (em que  $\vec{V}$  corresponde ao vetor gradiente, e cada coeficiente que corresponde à derivada direcional na direção horizontal e vertical, respetivamente) através do uso da função *getGradientH* (Paul, Sevcenco and Agathoklis, 2016). Esses coeficientes são combinados através do cálculo do módulo do vetor gradiente (Equação 4.2, Capítulo 4).

#### 5.3.4. Regras de fusão

As regras de fusão consistem na aplicação de operações matemáticas cujo resultado será a matriz que possui os dados fundidos. Estas consistem em operações simples, como o cálculo da matriz média ou matriz máximo, pixel a pixel. A diferença no resultado varia com a abordagem aplicada, no que respeita à técnica de seleção da informação que depois será alvo de fusão.

### 5.4. FUSÃO DE DADOS DE GPR E DE GRADIENTE VERTICAL MAGNÉTICO

A abordagem que se propõe para efetuar a fusão de dados de GPR e de gradiente vertical do campo magnético foi baseada no trabalho desenvolvido por Gautam and Kumar (2015), que descreve uma metodologia de fusão de imagens obtidas por equipamentos diferentes, combinando: (a) transformada discreta de *Wavelet* 2D; (b) Decomposição em Valores Singulares Multi-resolução; e (c) o cálculo do gradiente.

O esquema numérico proposto é constituído por duas etapas: pré-processamento dos dados; e fusão dos dados. A necessidade de incorporar uma etapa de pré-processamento deve-se ao facto de os conjuntos de dados de entrada, mesmo na situação de perçetibilidade elevada, por si só não são capazes de proporcionar resultados que possam mostrar a eficácia da abordagem proposta. Para isso, depois de várias tentativas para melhorar os dados, chegou-se à seguinte sequência de operações a que devem ser inicialmente submetidos.

### 5.4.1. Pré-processamento

A sequência de operações que constituem a operação de pré-processamento, aplicada a cada conjunto de dados, é composta pelas seguintes operações:

1. Aplicação de um filtro mediano para suavização dos conjuntos de dados.
2. Alinhamento automático dos dois conjuntos de dados, para garantir que se encontram exatamente sobrepostos.
3. Aplicação da técnica de SVD aos dados no domínio de Fourier, para selecionar apenas a informação útil, excluindo o ruído de fundo (em semelhança com a abordagem usada no Capítulo 3 para remoção de ruído de dados de GPR).
4. Cálculo da entropia local dos dados, para que fiquem realçadas apenas as amplitudes correspondentes a estruturas enterradas.

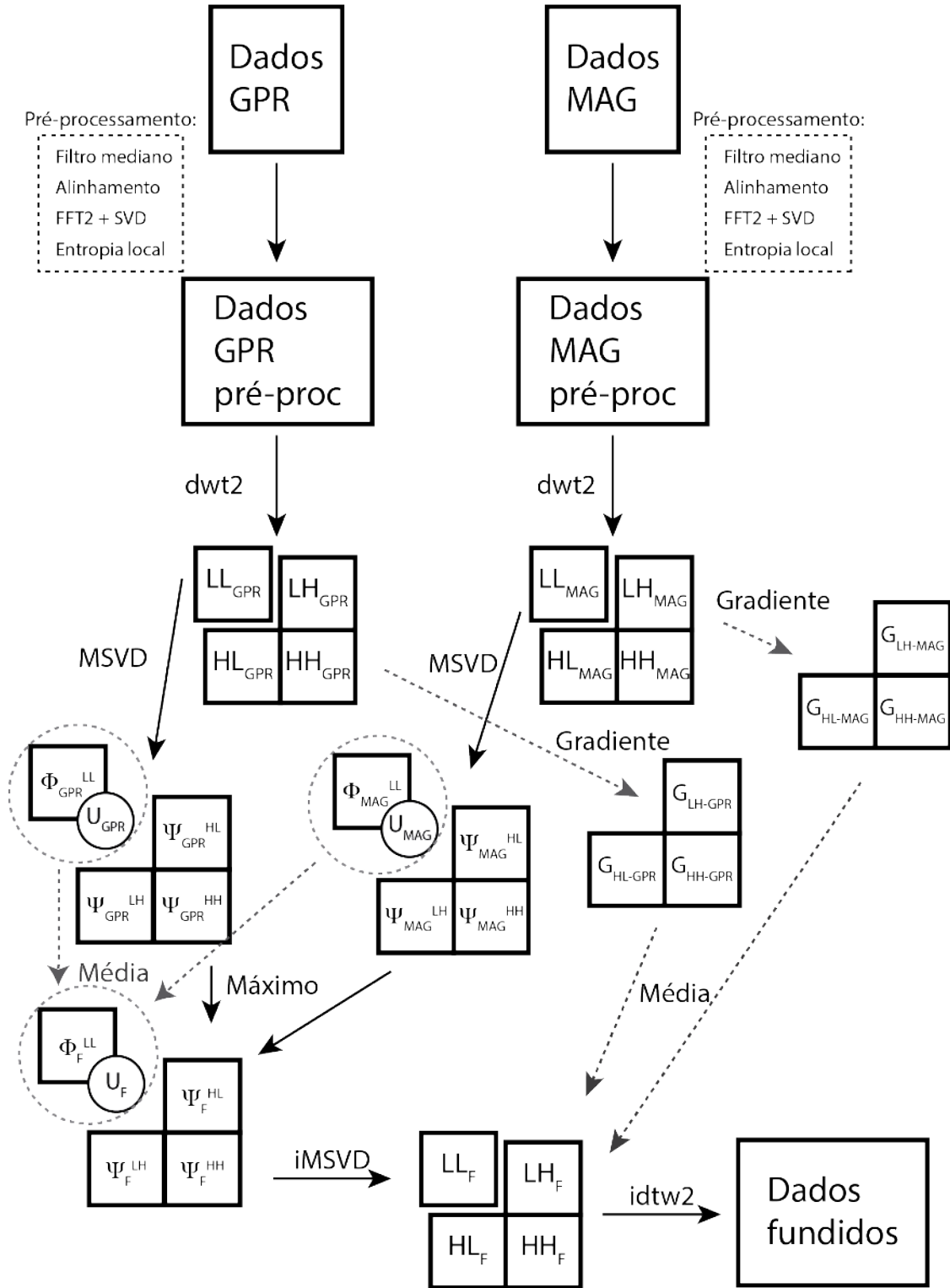
### 5.4.2. Fusão de dados

A sequência de operações que permite a fusão dos conjuntos de dados geofísicos encontra-se a seguir resumida (a aplicar a cada conjunto de dados de entrada) e está esquematizada na Figura 5.3:

1. Aplicação da transformada discreta de *Wavelet 2D*, obtendo-se as sub-bandas: LL, HL, LH e HH.
2. À sub-banda LL é aplicado o algoritmo *MSVD*, obtendo-se as seguintes matrizes:  $U$ ,  $\Phi$ ,  $\Psi_1$ ,  $\Psi_2$ , e  $\Psi_3$ .
3. As operações de fusão *sensu lato* (regras de fusão) são efetuadas da seguinte forma:
  - a. As matrizes  $U$  e  $\Phi$ , de cada conjunto de dados, são fundidas através do cálculo da matriz média, pixel a pixel, obtendo-se matrizes fundidas  $U_F$  e  $\Phi_F$  com as mesmas dimensões que as matrizes não fundidas.
  - b. As matrizes  $\Psi_1$ ,  $\Psi_2$ , e  $\Psi_3$ , de cada conjunto de dados, são fundidas através do cálculo da matriz máximo, pixel a pixel, obtendo-se as matrizes fundidas  $\Psi_{1F}$ ,  $\Psi_{2F}$ , e  $\Psi_{3F}$ , com as mesmas dimensões que as matrizes não fundidas.
  - c. As matrizes fundidas  $U_F$ ,  $\Phi_F$ ,  $\Psi_{1F}$ ,  $\Psi_{2F}$ , e  $\Psi_{3F}$  são usadas pelo algoritmo que aplica a inversa da função *MSVD*, para calcular a matriz  $LL_F$ , com as mesmas dimensões que as matrizes não fundidas.
  - d. As sub-bandas LH, HL e HH, de cada conjunto de dados, são fundidas através do cálculo do gradiente de cada sub-banda, de cada conjunto de dados, sendo a operação de fusão efetuada através do cálculo da matriz média, pixel a pixel, obtendo-se as matrizes fundidas  $LH_F$ ,  $HL_F$  e  $HH_F$ , com as mesmas dimensões que as matrizes não fundidas.



- e. As matrizes fundidas  $LL_F$ ,  $LH_F$ ,  $HL_F$  e  $HH_F$  são usadas pela função que aplica a inversa da transformada de *Wavelet*, obtendo-se a matriz final dos dados fundidos, com as mesmas dimensões que as matrizes não fundidas.



**Figura 5.3:** Esquema de implementação da fusão dos dados geofísicos de GPR e gradiente vertical do campo magnético. Adaptado de Gautam and Kumar (2015) para esta fusão.

## 5.5. RESULTADOS

A abordagem proposta, cujo objetivo é a fusão de conjuntos de dados geofísicos provenientes de métodos diferentes, neste caso GPR e gradiente vertical do campo magnético, será avaliada, quanto à sua eficácia, com a apresentação de resultados obtidos com três conjuntos de dados, que diferem no nível de perceptibilidade: elevada, intermédia e baixa.

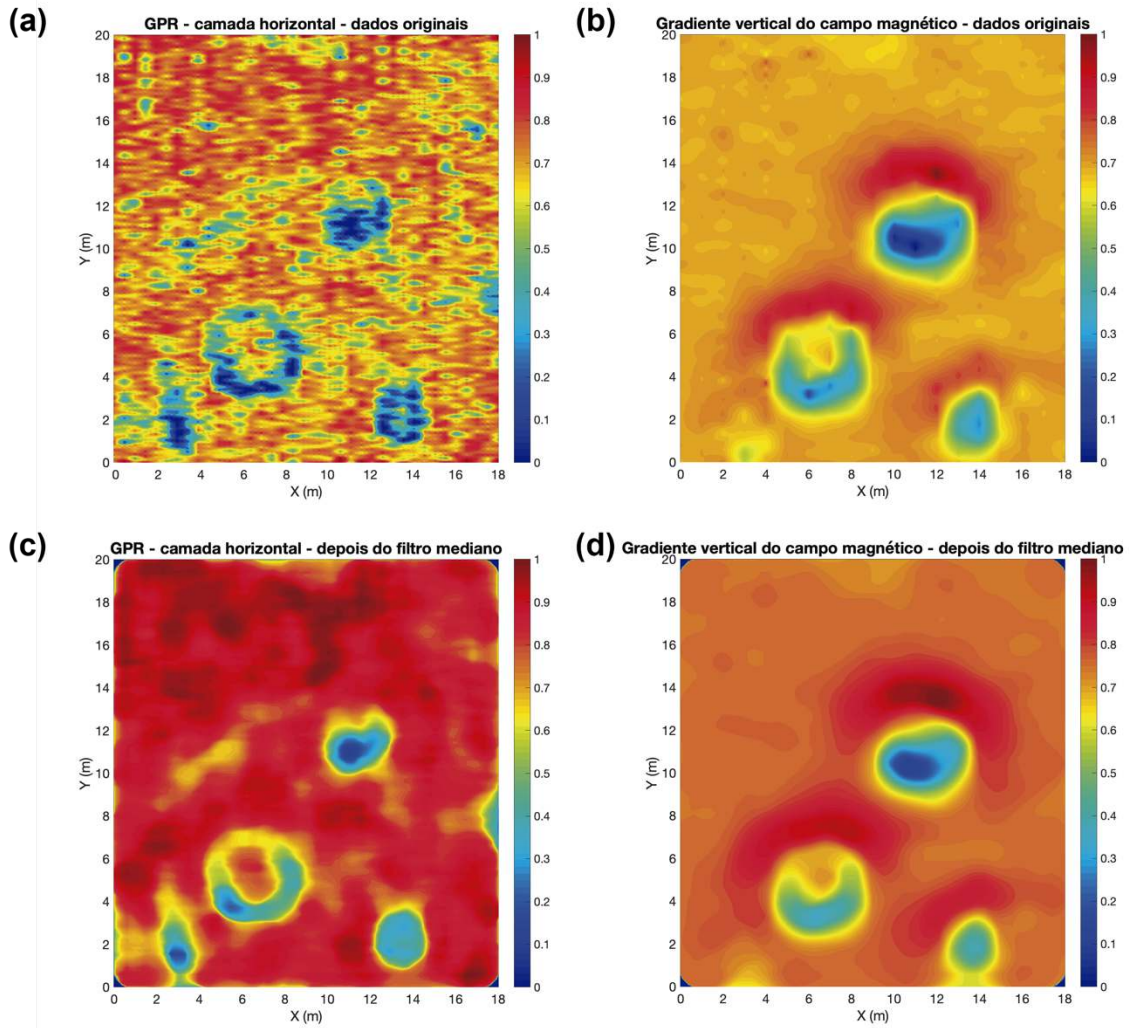
Os três conjuntos de dados geofísicos usados como entrada no algoritmo encontravam-se já processados segundo as cadeias de processamento habituais para aquelas classes de dados. Cada um desses conjuntos foi adquirido numa área distinta do local arqueológico estudado e há garantia que a área prospectada por cada foi realizada exatamente na mesma área. Este é um cuidado fundamental de modo a que se possa fundir conjuntos de dados provenientes de métodos diferentes, mas referentes à mesma localização.

### 5.5.1. Dados de perceptibilidade elevada (DPE)

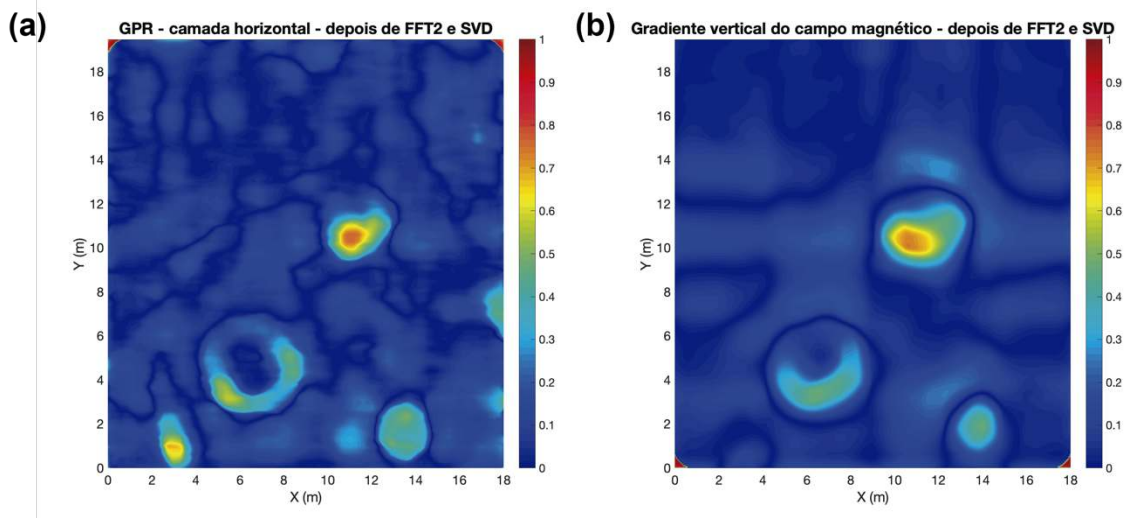
Os dados de perceptibilidade elevada são assim classificados uma vez é possível avaliar o conteúdo da subsuperfície a partir dos resultados de cada um dos métodos, sendo bastante evidente, nos resultados de ambos, que no local existem enterradas estruturas cuja distribuição espacial define formas circulares. Os dados magnéticos sugerem que essas estruturas de forma circular possam corresponder a estruturas do tipo forno, uma vez que os valores de anomalia magnética sobre essa localização ( $> \sim |25|$  nT) remetem para magnetismo remanescente produzido por exemplo por antigas fogueiras. O tipo de estrutura, forno com formato circular, é uma tipologia comum em Arqueologia Romana. Esta estrutura identificada pelos resultados geofísicos foi comprovada por escavação arqueológica realizada numa etapa posterior à prospeção geofísica, existindo por isso a certeza que nesta área de estudo, os dados geofísicos correspondem a estruturas existentes no local, o que explica por que razão se usa o termo perceptibilidade elevada. O facto de existirem conjuntos de dados geofísicos com estas características e validados por escavação arqueológica significa que eles podem ser usados para avaliar a eficácia da abordagem de fusão de dados que se propõe para os dados geofísicos.

Considerando estes conjuntos de dados e usando-os como dados de entrada no algoritmo, primeiro foi aplicada a sequência de operações de pré-processamento. Aos dados de entrada (Figura 5.4a-b) foi aplicado um filtro mediano (considerando uma vizinhança de 25 pixéis), para suavizar algum ruído de fundo que se encontra visível principalmente nos dados de GPR (Figura 5.4c-d).

O passo seguinte foi aplicar a técnica de SVD aos dados, depois de aplicada à transformada discreta de *Fourier 2D*, cujo resultado (Figura 5.5) constitui a informação considerada útil extraída desses conjuntos de dados.

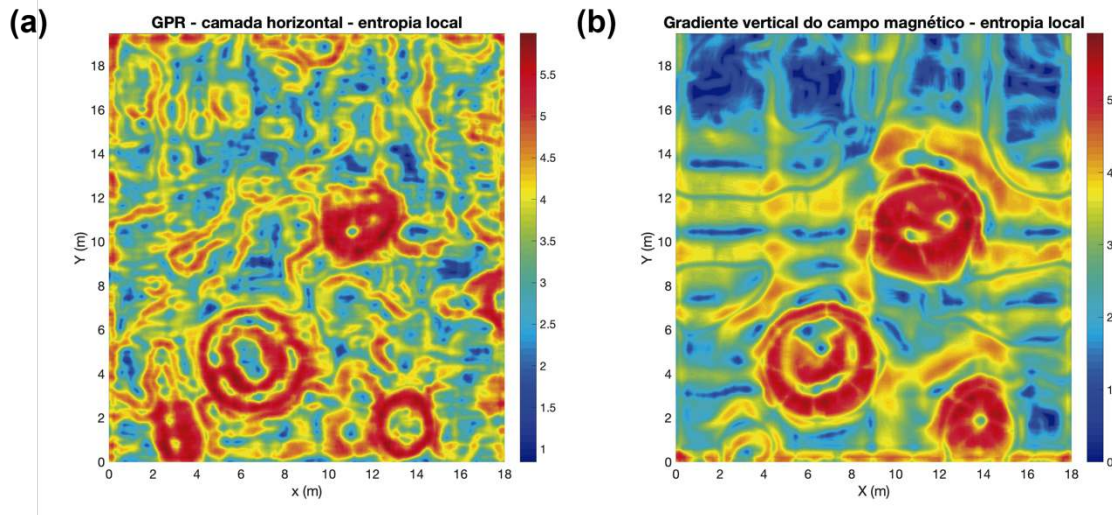


**Figura 5.4:** Dados de entrada de GPR (a) e gradiente vertical magnético (b). (c-d) Efeito do filtro mediano a cada conjunto.



**Figura 5.5:** Efeito da aplicação do algoritmo para remoção do ruído de fundo (FFT2+SVD) aos dados de GPR (a) e de gradiente vertical magnético (b).

De seguida foi calculada a entropia local dos dados, cujo resultado (Figura 5.6) evidencia a presença de alinhamentos onde se sabe que se encontram estruturas enterradas com formato circular. As estruturas enterradas correspondem aos valores mais elevados de entropia. Como a entropia local de uma imagem mede a sua desordem é de esperar que no meio das amplitudes de fundo (ordem) fiquem evidenciadas as estruturas enterradas (desordem).

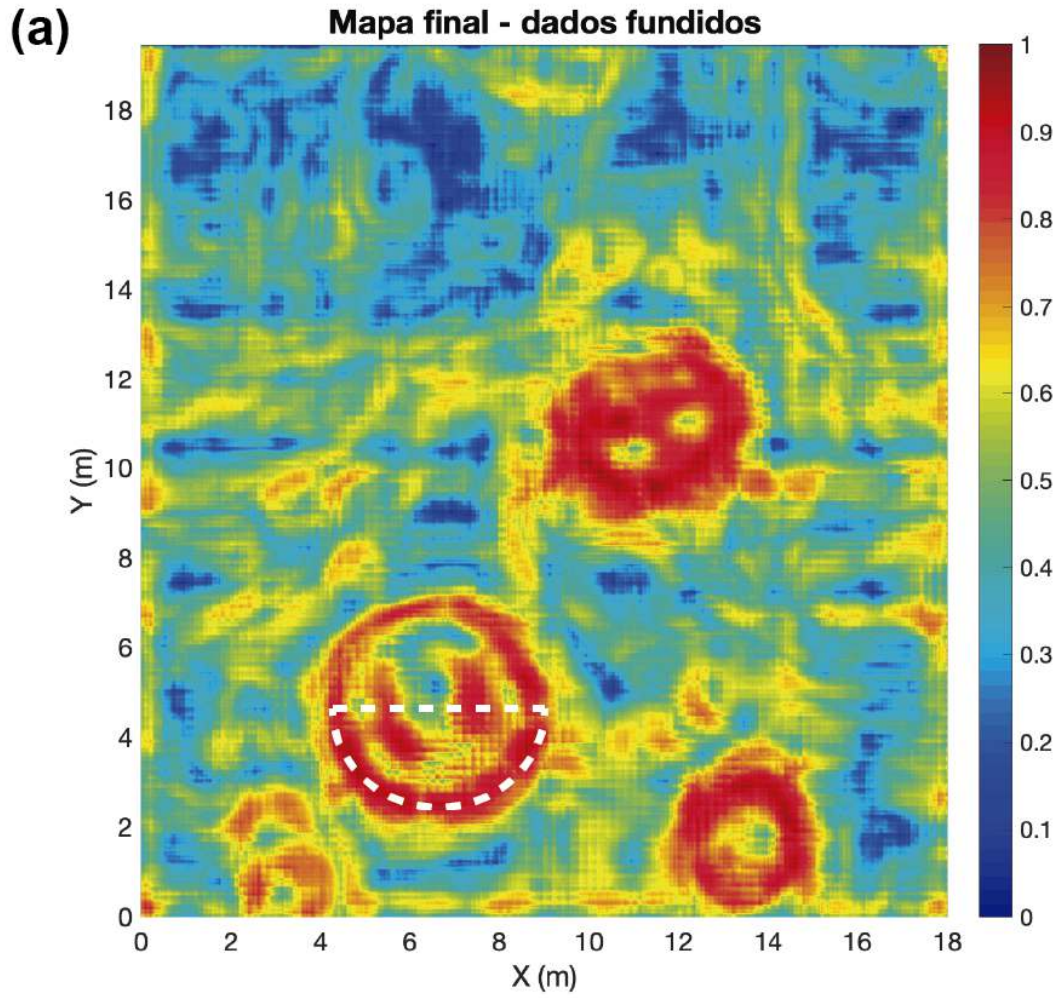


**Figura 5.6:** Entropia local dos dados de GPR (a) e de gradiente vertical magnético (b).

Os mapas de entropia local calculados foram usados como dados de entrada na etapa de fusão de dados usando a abordagem proposta. O resultado da fusão deste conjunto de dados (Figura 5.7a) apresenta uma imagem final consideravelmente melhor que as imagens iniciais obtidas pelos métodos geofísicos usados, em que os alinhamentos que correspondem a estruturas enterradas correspondem aos valores mais altos obtidos.

Fica assim bastante evidente a presença das estruturas anteriormente identificadas, sugerindo que a abordagem de fusão de dados geofísicos, fazendo uso combinado das técnicas mais usadas para este fim e de técnicas matemáticas de seleção de dados, é vantajosa para a obtenção de resultados mais detalhados.

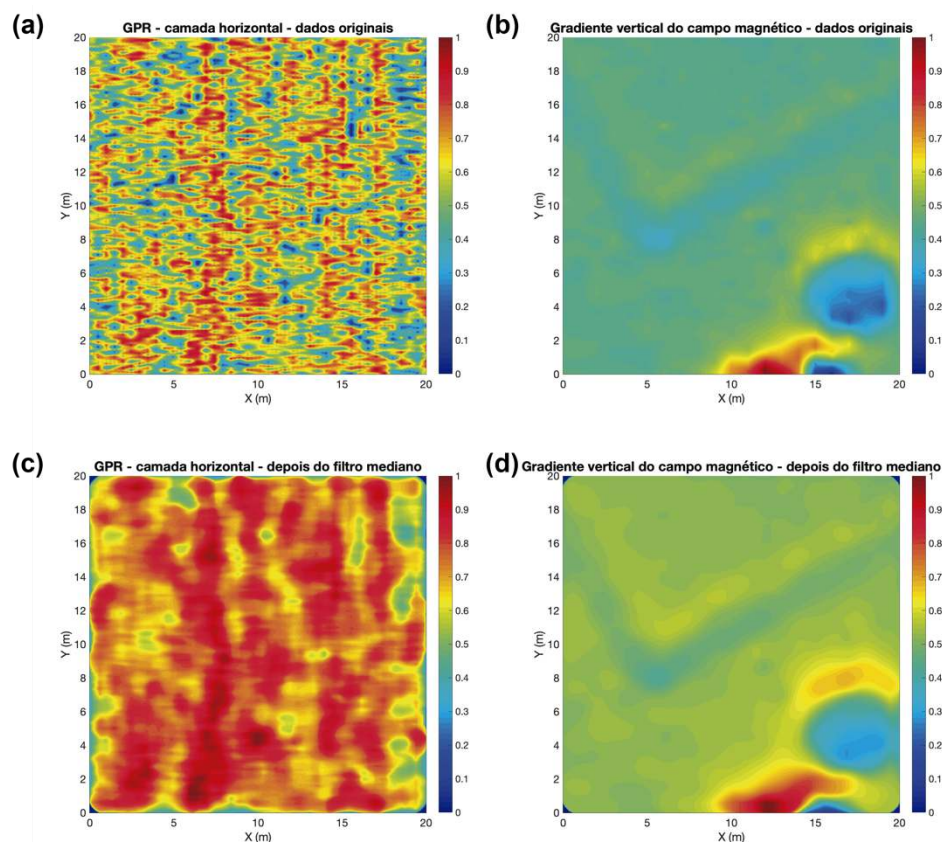
Neste local foi realizada uma escavação arqueológica em que foi descoberta uma das estruturas identificadas nos dados geofísicos (Figura 5.7b), o que permitiu comprovar que a sua existência assim como a eficácia da abordagem proposta.



**Figura 5.7:** (a) Resultado final do processamento de fusão de dados geofísicos usando dados de perceptibilidade elevada. (b) Imagem da escavação arqueológica efetuada no local, assinalada com linha tracejada em (a).

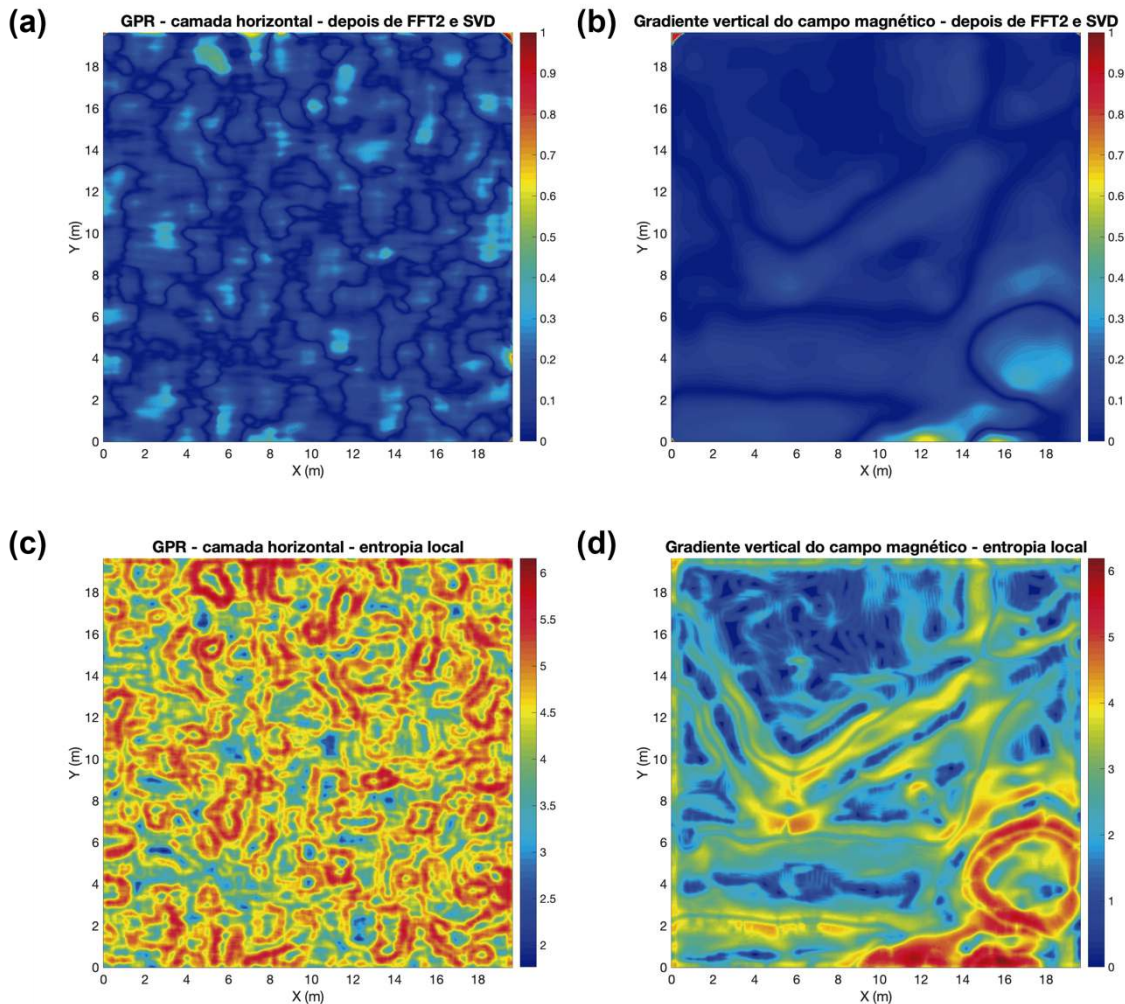
### 5.5.2. Dados de perceptibilidade intermédia (DPI)

O passo seguinte, no sentido de validar a abordagem, é o seu teste com outros conjuntos de dados. Assim, o conjunto que se segue é referente aos dados de perceptibilidade intermédia (Figura 5.8a-b). Estes dados, adquiridos no mesmo local arqueológico, pertencem a outra área também estudada. Neste local não foi realizada escavação arqueológica devido ao facto de os resultados geofísicos dos dois métodos aplicados não serem completamente esclarecedores quanto à existência de estruturas como são os dados de perceptibilidade elevada. Os dados de GPR não evidenciam reflexões que possam ser interpretadas como estruturas enterradas. Os dados magnéticos apresentam alinhamentos espaciais que sugerem a presença de uma estrutura do tipo forno com forma circular, idêntica à do local anterior, e do tipo muro que apresenta duas direções perpendiculares, no entanto, ambas as estruturas apresentam baixo contraste. Apesar de os dados de GPR não serem esclarecedores quanto à presença de estruturas enterradas, crê-se que existe informação sobre estas contida nos dados, encontrando-se camufladas pelo excesso de ruído que existe no conjunto de dados, razão pela qual se decidiu aplicar a abordagem proposta para averiguar a possibilidade de se poder melhorar informação de dados que à partida parecem não ser esclarecedores. O filtro mediano (Figura 5.8c-d) diminui o ruído de ambos os conjuntos; nos dados de GPR parece tornar visíveis alguns alinhamentos que se observam nos dados magnéticos (muros).



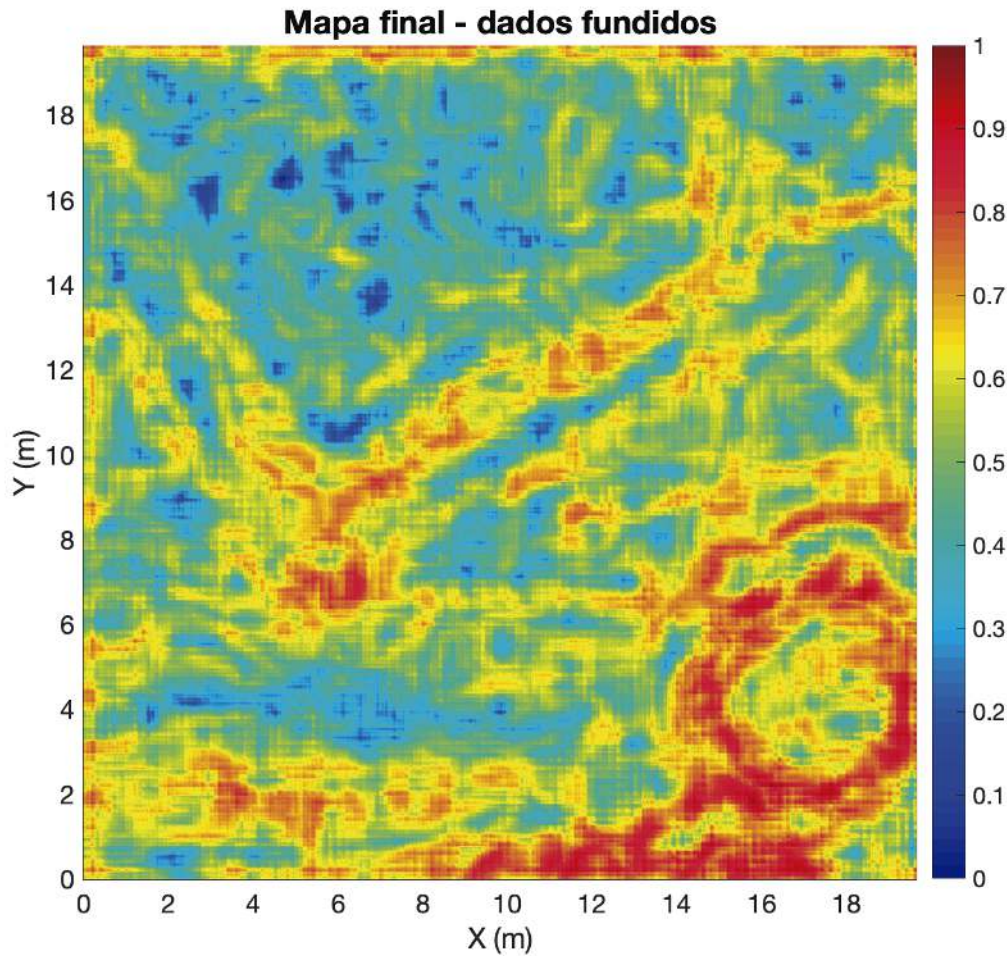
**Figura 5.8:** Dados de entrada de GPR (a) e gradiente vertical magnético (b). (c-d) Efeito do filtro mediano a cada conjunto.

A remoção do ruído de fundo com recurso a SVD aplicada no domínio espectral reduz o ruído dos dados (Figura 5.9a-b). Nos dados de GPR, os alinhamentos deixaram de ser perceptíveis e nos dados magnéticos observam-se alinhamentos subtis. Já o cálculo da entropia local dos dados filtrados (Figura 5.9c-d) volta a aumentar a perceptibilidade dos alinhamentos de estruturas nos dados magnéticos, enquanto que os dados de GPR mantêm o aspeto anterior.



**Figura 5.9:** Efeito da aplicação do algoritmo para remoção do ruído de fundo (FFT2+SVD) aos dados de GPR (a) e de gradiente vertical magnético (b) e respetiva entropia local (c-d).

O resultado final da fusão de dados de perceptibilidade intermédia encontra-se disponível na Figura 5.10, em que é possível observar que os alinhamentos correspondentes a estruturas enterradas, que já eram visíveis nos dados magnéticos iniciais, adquiriram não só maior contraste como também maior nitidez. Em semelhança com o caso anterior, a imagem final obtida é melhor que as duas imagens iniciais, verificando-se assim mais uma contribuição positiva para a validação da abordagem proposta.



**Figura 5.10:** Resultado final do processamento de fusão de dados geofísicos usando dados de percetibilidade intermédia.

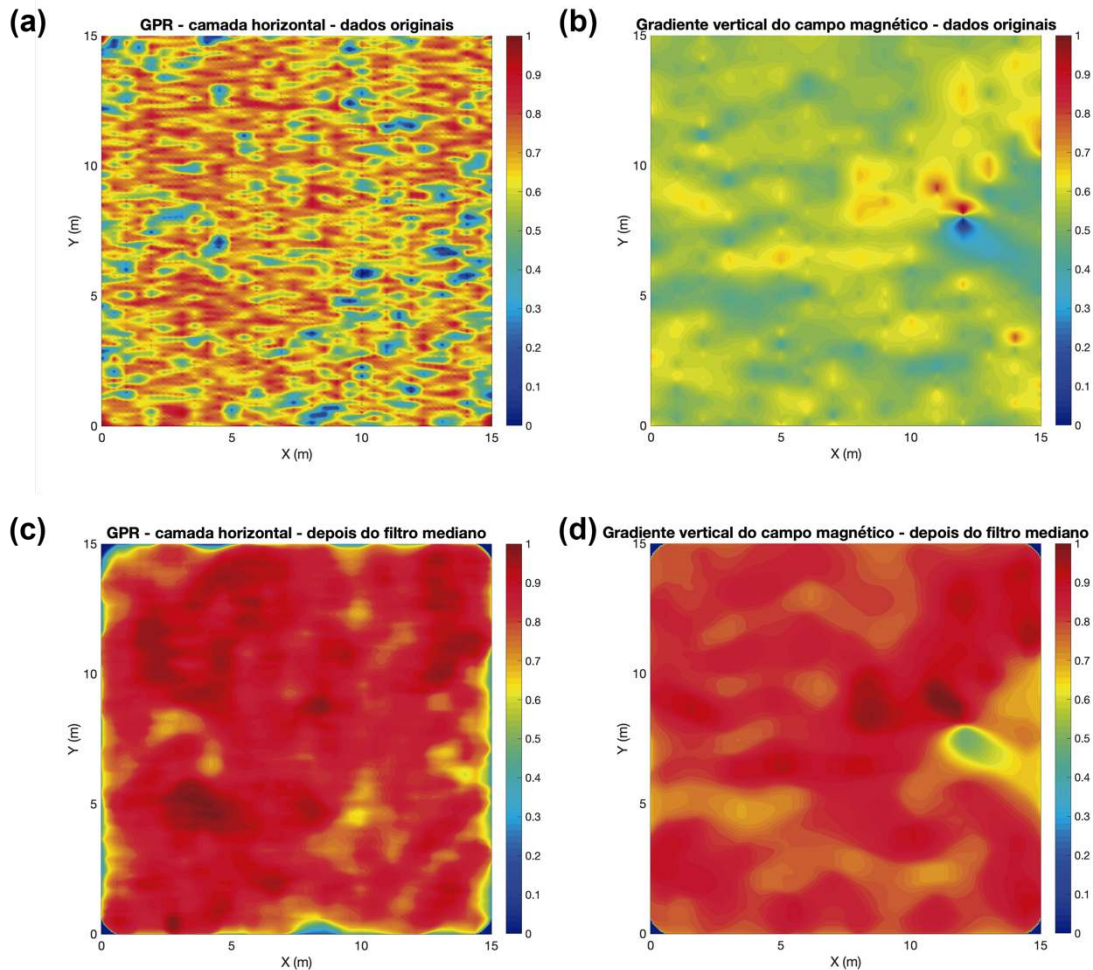
### 5.5.3. Dados de percetibilidade baixa (DPB)

Face à eficácia até agora verificada nos dados de percetibilidade elevada e intermédia, resta por fim aplicar a metodologia a dados de percetibilidade baixa (Figura 5.11 a-b). Estes dados, também adquiridos no mesmo sítio arqueológico, pertencem a uma área de estudo que não foi escavada e cujos resultados geofísicos não evidenciam a presença de qualquer estrutura enterrada. Apenas existe uma ténue sugestão, de baixo contraste, que parece indicar a presença de um muro enterrado se for considerada a totalidade da área coberta pelo levantamento magnético. Face à desconfiança gerada pela ausência dos resultados dos dois métodos aplicados e havendo possibilidade de neste local existir uma estrutura enterrada do tipo muro, caso se verificasse esta possibilidade, poder-se-ia estar a efetuar uma má interpretação sobre o conteúdo de estruturas desta área de estudo. Mais uma vez crê-se que os dados poderão conter informações úteis sobre a existência de estruturas, ainda que não se possa interpretar desse modo ao considerar-se os dados individualmente. A fusão de dados poderá



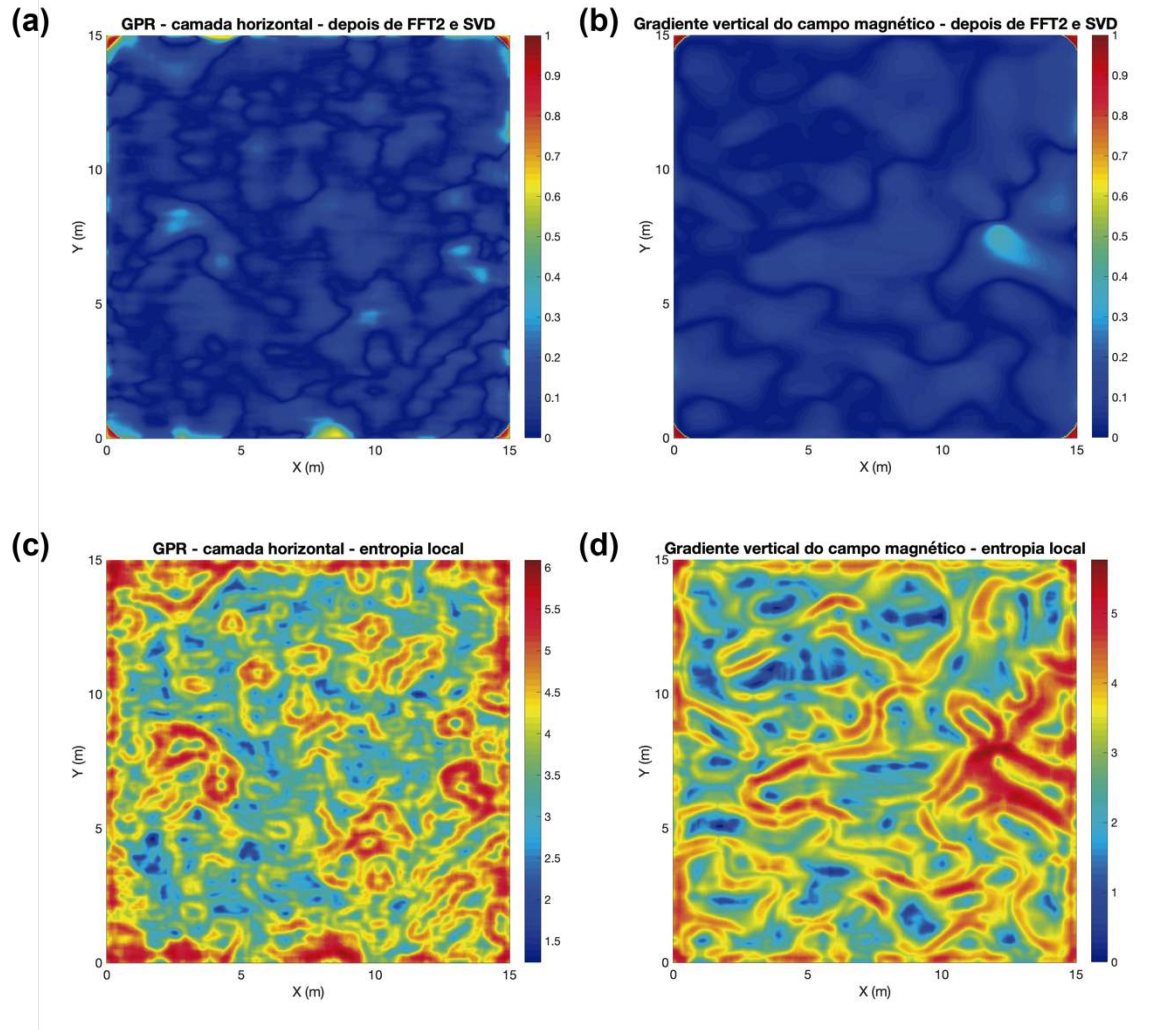
proporcionar uma melhor interpretação sobre o local como já foi verificado nos dados considerados anteriormente, fazendo por isso todo o sentido o teste com este conjunto de dados.

A aplicação do filtro mediano diminui o ruído de fundo dos dois conjuntos (Figura 5.11c-d). Nos dados magnéticos, os alinhamentos subtis que se observavam antes ficaram mais perceptíveis.



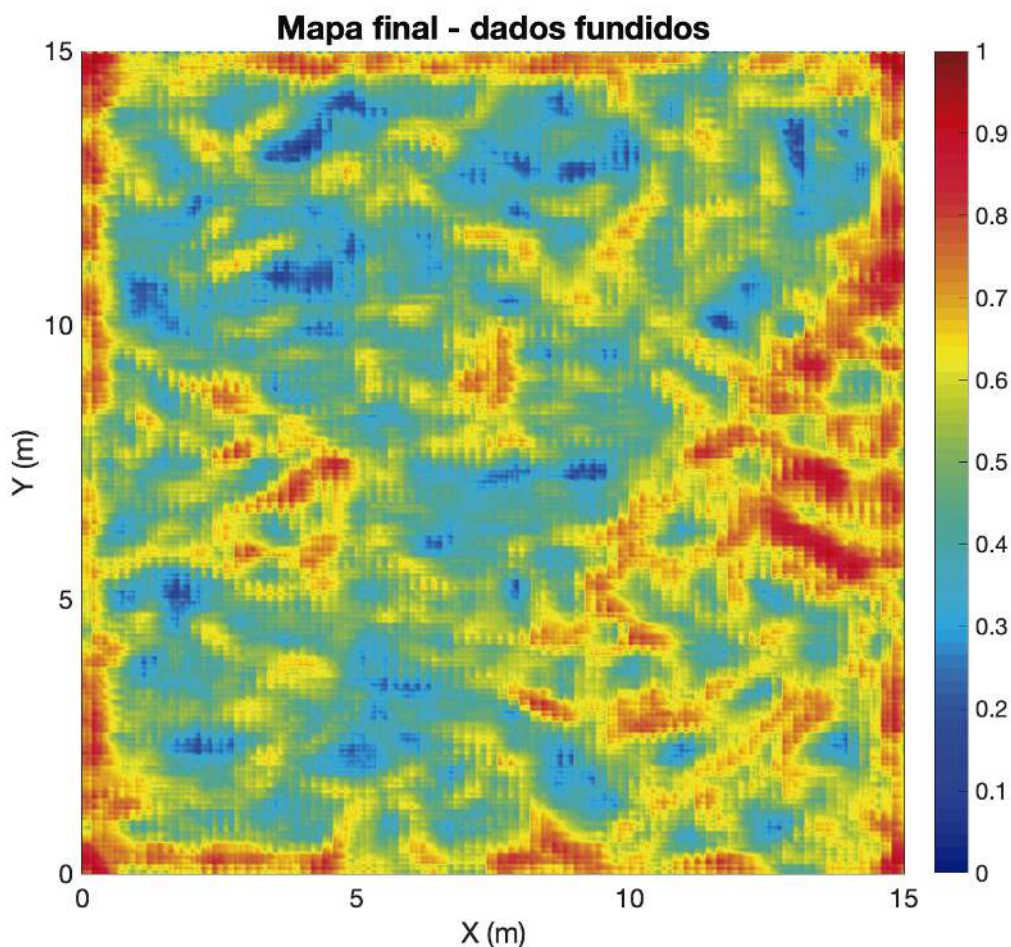
**Figura 5.11:** Dados de entrada de GPR (a) e gradiente vertical magnético (b). (c-d) Efeito do filtro mediano a cada conjunto.

A remoção do ruído com recurso a SVD no domínio espectral provoca a diminuição do ruído, no entanto perde-se a perceptibilidade dos alinhamentos que se observavam nos dados magnéticos (Figura 5.12a-b). O cálculo da entropia local dos dados filtrados (Figura 5.12c-d) volta a tornar visíveis os alinhamentos anteriormente detetados nos dados magnéticos, ficando estes mais individualizados que inicialmente. Nos dados de GPR não houve melhoria aparente, continuando a não se detetar alinhamentos de reflexões.



**Figura 5.12:** Efeito da aplicação do algoritmo para remoção do ruído de fundo (FFT2+SVD) aos dados de GPR (a) e de gradiente vertical magnético (b) e respectiva entropia local (c-d).

Aplicada a fusão a estes dados, obtiveram-se os resultados representados na Figura 5.13. Os alinhamentos que se observavam de forma muito subtil nos dados magnéticos antes da aplicação do processamento de fusão adquiriram nitidez e tornam-se mais fáceis de identificar. Após a fusão, conseguem-se observar alinhamentos cuja distribuição espacial parece indicar que se poderá estar perante estruturas enterradas do tipo muro com duas orientações perpendiculares. A imagem obtida é de qualidade muito superior às imagens que lhe deram origem, o que permite assim validar a eficácia da abordagem proposta em dados com diferentes níveis de percetibilidade.



**Figura 5.13:** Resultado final do processamento de fusão de dados geofísicos usando dados de perceptibilidade baixa.

#### 5.5.4. Parâmetros de nitidez e de qualidade dos resultados

A avaliação da eficácia dos resultados obtidos nos três conjuntos considerados foi efetuada através do cálculo do Índice de Nitidez e do Índice de Qualidade (BRISQUE).

O Índice de Nitidez, calculado pela Equação 4.1 (Capítulo 4), devolve um valor em percentagem. A imagem é tanto mais nítida quanto maior for esse valor. Os valores do Índice de Nitidez foram calculados para os três conjuntos de dados em várias etapas do processamento (Tabela 5.1). A evolução dos valores encontra-se representada graficamente na Figura 5.14 (a,c,e). Os valores calculados aumentaram com a aplicação desta metodologia de processamento.

O Índice de Qualidade (BRISQUE) permite calcular uma estimativa de valor de qualidade de uma imagem em absoluto sem qualquer referência, de uma forma cega, usando um avaliador de qualidade espacial que compara a imagem a cenas naturais com distorções semelhantes, como artefactos de

compactação, desfocagem e ruído (Mittal et al., 2011, 2012). O valor que se obtém varia entre 0 e 100, em que uma melhor qualidade percetual é expressa quanto mais baixo for o valor obtido. Este parâmetro é calculado através da função *brisque* do MATLAB.

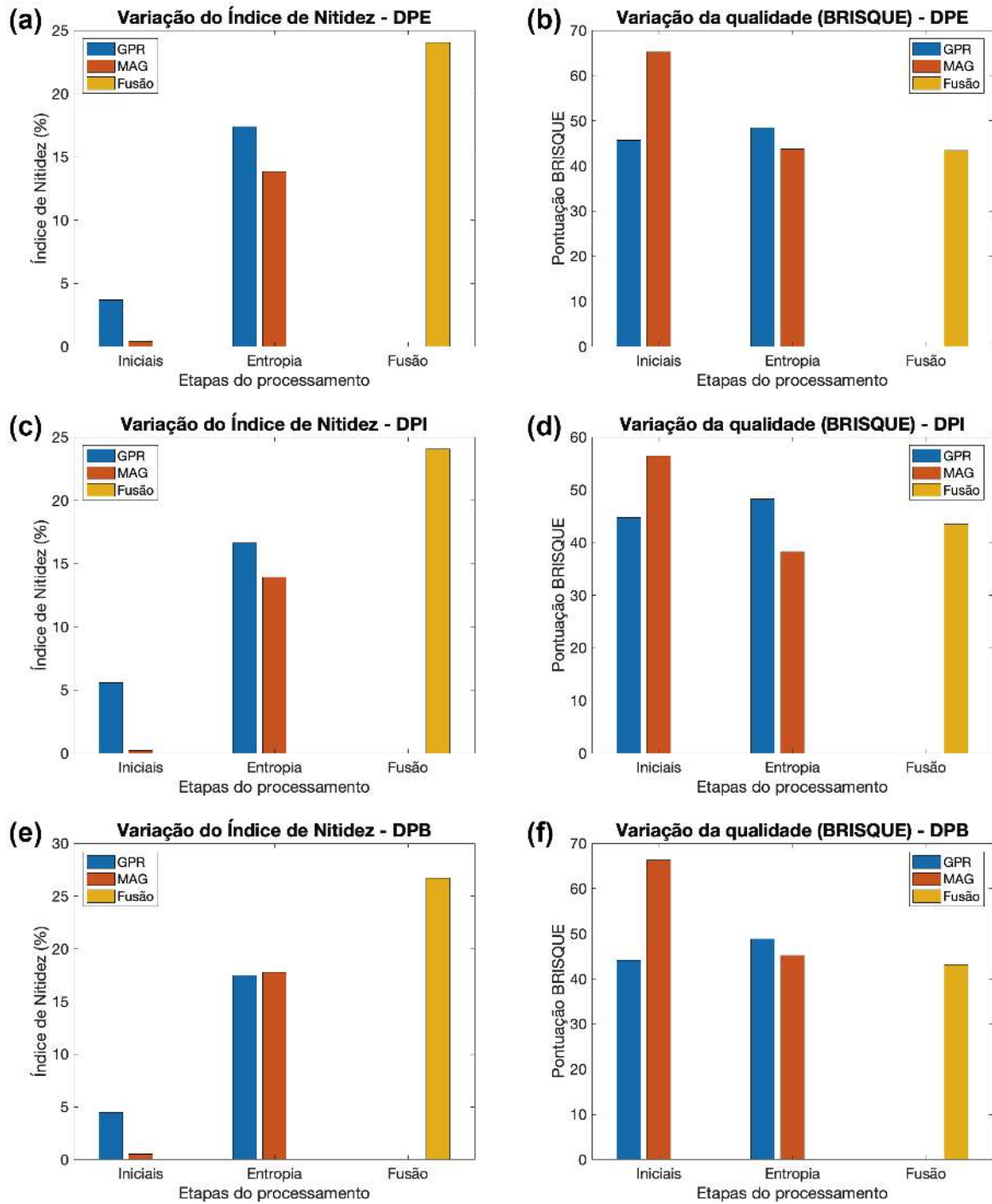
Nas situações de geofísica em análise, os valores do Índice de Qualidade (BRISQUE) foram calculados para os três conjuntos de dados em várias etapas do processamento (Tabela 5.2). A evolução dos valores encontra-se representada graficamente na Figura 5.14 (b,d,f). Os valores calculados diminuíram com a aplicação desta metodologia de processamento.

**Tabela 5.1:** Valores do Índice de Nitidez para os três conjuntos de dados considerados.

Dados	Índice de Nitidez (%)		
	Percetibilidade alta	Percetibilidade intermédia	Percetibilidade baixa
GPR iniciais	3.69	5.61	4.49
MAG iniciais	0.40	0.23	0.53
GPR Entropia	17.39	16.63	17.47
MAG Entropia	13.84	13.95	17.76
Fundidos	24.02	24.08	26.71

**Tabela 5.2:** Valores do Índice de Qualidade (BRISQUE) para os três conjuntos de dados considerados.

Dados	Índice de Qualidade (BRISQUE)		
	Percetibilidade alta	Percetibilidade intermédia	Percetibilidade baixa
GPR iniciais	45.72	44.74	44.16
MAG iniciais	65.24	56.46	66.27
GPR Entropia	48.43	48.28	48.85
MAG Entropia	43.78	38.25	45.18
Fundidos	43.40	43.45	43.17



**Figura 5.14:** Representação gráfica da evolução dos parâmetros Índice de Nitidez e Índice de Qualidade (BRISQUE) dos três conjuntos de dados considerados. (a-b) Dados de perceptibilidade elevada. (c-d) Dados de perceptibilidade intermédia. (e-f) Dados de perceptibilidade baixa.

## 5.6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na secção anterior foram mostrados os resultados da fusão de dados geofísicos de GPR e de gradiente vertical do campo magnético através da abordagem baseada no uso combinado de técnicas de decomposição de imagens (transformada discreta de *Wavelet*) e de fatorização de dados no domínio espectral (transformada discreta de *Fourier 2D* + SVD). A abordagem concebida foi aplicada a três conjuntos de dados obtidos em três setores diferentes de um sítio arqueológico. Em cada setor foram aplicados os dois métodos, ou seja, para cada conjunto de dados considerados em cada setor existe sobreposição espacial, uma condição necessária à aplicação da presente abordagem de fusão. Os conjuntos considerados possuem níveis de perceptibilidade diferentes que foram avaliados em diferentes etapas do processamento através da análise visual da representação gráfica e pelo cálculo de parâmetros que contribuem para a sua avaliação, como o Índice de Nitidez (que quantifica a nitidez de uma imagem; que aumenta com o aumento do valor do parâmetro) e o Índice de Qualidade – BRISQUE (que quantifica as distorções presentes numa imagem atribuindo uma pontuação; que diminui com o aumento da qualidade).

No conjunto de dados de perceptibilidade elevada é possível observar, nos resultados de ambos os métodos considerados, alinhamentos espaciais que sugerem a existência de estruturas enterradas. Em especial, formas circulares com valor de anomalia magnética elevada, sugerindo que se trate de vestígios de fornos de origem Romana com formato circular. Sobre o local prospetado foi realizada uma escavação arqueológica, que comprovou os resultados geofísicos obtidos. Uma vez que os dados de ambos os métodos mostram alinhamentos espaciais correspondentes a estruturas enterradas cuja existência foi confirmada por escavação, estes foram classificados de “perceptibilidade elevada” e foram usados para avaliar a eficácia do algoritmo de fusão de dados geofísicos proposto. A avaliação da sua eficácia foi efetuada por uma análise baseada na comparação dos resultados em várias etapas da cadeia de processamento. A primeira inspeção de resultados foi feita depois de aplicado o pré-processamento, a segunda incidiu sobre os mapas de entropia local e finalmente a terceira, sobre a imagem final correspondente ao resultado obtido depois de aplicado o algoritmo de fusão.

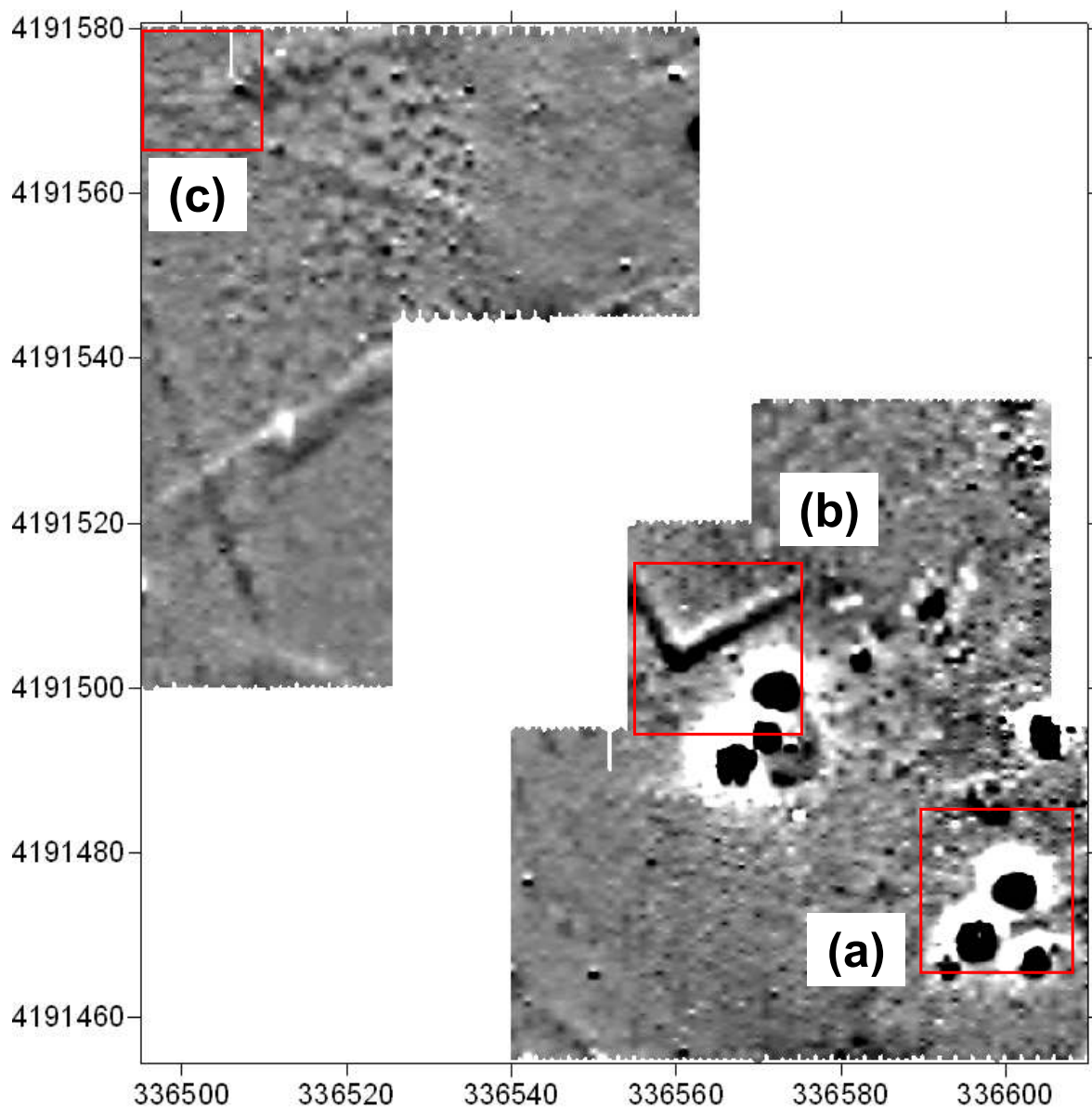
Uma vez aplicado o processamento às duas coleções de dados pré-processados, é possível observar em ambas as imagens dos mapas de entropia produzidos, alinhamentos espaciais que definem formas circulares que sugerem a existência de estruturas enterradas. Os alinhamentos possuem melhor definição que os resultados obtidos do pré-processamento dos dados registados, pelos processos tradicionais. Depois de se aplicar o algoritmo de fusão de dados obteve-se uma imagem final bastante detalhada e com elevada nitidez, possuindo melhor qualidade que as obtidas nas anteriores etapas da cadeia de processamento. Os alinhamentos espaciais que se observam possuem valores de amplitude que tendem para a unidade e coincidem com a localização dos alinhamentos que se observam quer nas imagens originais quer nas de entropia, assim como também correspondem à localização das

estruturas evidenciadas pela escavação arqueológica. O aumento da nitidez que se observa graficamente é revelado pelos valores do Índice de Nitidez calculado em várias etapas da metodologia, que aumentou de 3,69 % (GPR – dados iniciais) e 0,40 % (MAG – dados iniciais) para 24,02 % (Dados fundidos). O aumento da qualidade também observado graficamente é confirmado pelos valores do Índice de Qualidade (BRISQUE), que diminuíram de 45,72 (GPR – dados iniciais) e 65,24 (MAG – dados iniciais) para 43,40 (Dados fundidos). A avaliar a eficácia desta abordagem considerando o conjunto de dados de perceptibilidade elevada, esta parece funcionar muito bem, na medida em que a percepção sobre a existência de estruturas aumentou, facilitando a interpretação dos resultados geofísicos.

No conjunto de dados de perceptibilidade intermédia apenas é possível avaliar a existência de estruturas enterradas a partir dos dados magnéticos. Nos dados de GPR não é evidente qualquer alinhamento espacial que permita elaborar uma interpretação. Os alinhamentos que se observam permitem classificar as possíveis estruturas como vestígios de muros, possuindo duas direções perpendiculares, e vestígios de um forno com formato circular. Os vestígios dos muros apresentam valores de amplitude de anomalia magnética baixos, conferindo baixo contraste entre estes e o meio envolvente, o mesmo acontecendo nos dados depois de aplicar o processamento que calcula a entropia local. A fusão de dados permitiu obter-se uma imagem final que mostra os mesmos alinhamentos identificados, tendo aumentado o contraste entre os possíveis vestígios do muro e o meio envolvente e aumentando a definição dos alinhamentos que correspondentes aos possíveis vestígios do forno com formato circular, conferindo maior nitidez. O aumento da nitidez observado graficamente é corroborado pelos valores do Índice de Nitidez calculado em várias etapas da metodologia, que aumentou de 5,61 % (GPR – dados iniciais) e 0,23 % (MAG – dados iniciais) para 24,08 % (Dados fundidos). O aumento da qualidade observado graficamente é confirmado pelos valores do Índice de Qualidade (BRISQUE), que diminuíram de 44,74 (GPR – dados iniciais) e 56,46 (MAG – dados iniciais) para 43,45 (Dados fundidos). Nestes resultados obtidos a partir de dados de perceptibilidade intermédia a abordagem foi também eficaz uma vez que a perceptibilidade aumentou com a aplicação do processamento de fusão, em semelhança com os resultados obtidos a partir de dados de perceptibilidade elevada.

O último teste efetuado foi realizado no conjunto de dados de perceptibilidade baixa, em que não é evidente qualquer alinhamento espacial em nenhuma das imagens saídas do pré-processamento dos dados originais. Após a aplicação das operações de processamento, torna-se visível nos resultados de magnética, ainda que de forma muito subtil, alinhamentos que definem duas direções perpendiculares, que sugerem que existirão vestígios de um muro. Caso se avaliasse a totalidade da área de prospeção magnética, que contém os setores que definem os conjuntos considerados (Figura 5.15, setor c), estes alinhamentos seriam já visíveis, no entanto, apresentando contraste muito baixo, não sendo possível a sua distinção quando apenas se tem acesso à área considerada neste processamento.

A imagem obtida por fusão é inequivocamente de maior qualidade que as que lhe deram origem, sendo possível observar os alinhamentos espaciais que deverão corresponder a vestígios de muros. Os valores do Índice de Nitidez calculado em várias etapas da metodologia aumentaram de 4,49 % (GPR – dados iniciais) e 0,53 % (MAG – dados iniciais) para 26,71% (Dados fundidos). O aumento da qualidade observado graficamente é confirmado pelos valores do Índice de Qualidade (BRISQUE), que diminuíram de 44,16 (GPR – dados iniciais) e 66,27 (MAG – dados iniciais) para 43,17 (Dados fundidos). O bom resultado que se obteve pela aplicação da metodologia aos dados de perceptibilidade baixa permitiu recuperar informação que se encontrava camuflada nos dados de entrada, mostrando novamente que a abordagem considerada é eficaz e contribuindo novamente para a sua validação.



**Figura 5.15:** Vista geral da totalidade da área de prospeção magnética. Estão assinaladas as áreas correspondentes aos dados de perceptibilidade elevada (a), perceptibilidade intermédia (b) e perceptibilidade baixa (c).



## **5.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo foi abordada a problemática da falta de perceptibilidade que os dados geofísicos podem possuir, conferida por um baixo contraste entre o sinal e o ruído devido às condições físicas e químicas dos meios analisados. A hipótese de partida desta abordagem é que a informação útil nesses dados, que existe camuflada pelo ruído de fundo, se combinada com informação de outro conjunto de dados poderá proporcionar uma fonte de informação melhorada e capaz de fornecer informações sobre a existência de estruturas enterradas no local analisado.

Depois de serem testadas diversas metodologias de fusão de dados, foi testada uma abordagem que consiste na aplicação de duas etapas de processamento, usando dados de GPR e de gradiente vertical do campo magnético, obtidos sobre a mesma área (especialmente sobrepostos). Essa abordagem foi testada com dados de três localizações diferentes de uma área de estudo próxima do aeroporto de Córdoba (Espanha). Para o efeito foram selecionados pares de dados com três níveis de perceptibilidade.

O primeiro par produz resultados com perceptibilidade elevada, uma vez que é possível observar alinhamentos espaciais que corresponderão a estruturas enterradas, observáveis nas figuras geradas a partir do processamento tradicional dos dois conjuntos de dados considerados. No local prospectado, depois de interpretado o levantamento geofísico, foi realizada uma escavação arqueológica que colocou à vista uma das estruturas identificada nos resultados geofísicos: vestígios de um forno de origem Romana, com formato circular. Este conjunto foi usado para testar e refinar a abordagem concebida. O segundo conjunto de dados que se usou possui perceptibilidade intermédia, pois o processamento tradicional dos dados magnéticos produz resultados onde é possível identificar alinhamentos, que não são visíveis de forma perceptível nos resultados do GPR. O terceiro conjunto de dados usado possui perceptibilidade baixa, não sendo possível observar nos resultados do processamento convencional qualquer alinhamento espacial que sugira a existência de estruturas enterradas no local, sendo apenas visível nos mapas magnéticos se for considerada a totalidade da área prospectada, que sugerem de uma forma muito subtil, a existência de alinhamentos espaciais nos valores de anomalia magnética com muito baixo contraste. Estes resultados catalisaram a procura de uma forma eficaz para combinar dados geofísicos no sentido de extrair informação útil destes, mesmo que aparentemente esta esteja oculta pelo ruído de fundo.

A abordagem usada foi baseada nas operações de processamento que permitem a fusão de imagens obtidas por equipamentos diferentes, amplamente usada em processamento de imagens médicas para detecção de tumores. A ideia fundamental é a criação de uma imagem melhorada a partir de algoritmos de fusão de dados, que possua maior qualidade que as imagens que lhe deram origem, permitindo uma melhor compreensão sobre o objeto de estudo.

De entre as várias abordagens disponíveis para concretizar o objetivo, a que parece mais promissora para o uso em dados geofísicos são as que usam transformadas matemáticas, o que permite selecionar a informação útil que possa existir nos pares de conjuntos de dados num domínio transformado, em semelhança com as abordagens aplicadas nos Capítulos 3 e 4 deste trabalho.

A abordagem proposta é assim composta por duas etapas: pré-processamento; e fusão de dados. O pré-processamento é aplicado para melhorar os dados de entrada no algoritmo de fusão, consistindo fundamentalmente na remoção do ruído de fundo através do uso da técnica de SVD aplicada no domínio espectral e posterior cálculo da entropia local dos dados, de modo a que fiquem realçadas apenas as diferenças que correspondem aos alinhamentos espaciais e conseqüentemente a estruturas enterradas. Os mapas de entropia local obtidos do pré-processamento dos dois conjuntos de dados são fundidos na segunda etapa de processamento, para produzirem a imagem final. Esta etapa consiste na aplicação da transformada discreta de *Wavelet* 2D a cada um dos mapas de entropia, decompondo-os em sub-bandas, às quais são aplicados algoritmos para cálculo da MSVD e do gradiente. As sub-bandas obtidas são depois fundidas através do uso de regras de fusão específicas para cada par. A imagem final fundida é obtida através da aplicação da inversa da transformada discreta de *Wavelet*.

A fusão de dados com o algoritmo FUSÃO-GPR-MAG permite a obtenção de uma imagem final bastante detalhada, com maior nitidez e possuindo melhor qualidade que os dados originais e os dados pré-processados. O aumento da nitidez e da qualidade foi quantificado através do cálculo do Índice de Nitidez e do Índice de Qualidade (BRISQUE) em várias etapas da metodologia testada. Os valores obtidos corroboram os resultados gráficos.

As imagens resultantes da aplicação desta abordagem de fusão de dados, nas três condições experimentais ensaiadas, parecem revelar maior perceptibilidade que as obtidas pelos dados que lhes deram origem, sendo mais evidente nos dados de perceptibilidade baixa, em que se passou de dados aparentemente sem alinhamentos de reflexões, para dados que contêm alinhamentos que deverão corresponder a estruturas enterradas do tipo muro.

A proposta de fusão de dados geofísicos no domínio espectral associada ao uso de técnicas de seleção automática de dados poderá ser uma ferramenta útil para deteção de alinhamentos de estruturas enterradas em dados cuja perceptibilidade é reduzida.

## CAPÍTULO 6

### ESTUDO GEOFÍSICO DA VILLA ROMANA DE PISÕES

Neste capítulo é apresentado o estudo geofísico realizado na Villa Romana de Pisões como caso de exemplo do processamento de dados em condições desfavoráveis devido às características físicas deste local que dificultam a detecção das estruturas enterradas.

A fim de demonstrar a potencialidade dos algoritmos propostos nesta tese, foram aplicadas as metodologias concebidas nos capítulos anteriores: densificação de dados de GPR com recurso à Interpolação de *Fourier*, remoção do ruído de fundo no domínio espectral com recurso à técnica de SVD e fusão de dados de GPR-2D com mapas de anomalias magnéticas com recurso a DWT2 e MSVD.

## 6.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DA VILLA ROMANA DE PISÕES

A Villa Romana de Pisões (Figura 6.1), localizada nas imediações da localidade de Penedo Gordo (a cerca de 10 km a oeste de Beja), é um sítio arqueológico classificado de Imóvel de Interesse Público desde 1970. O local onde se situa o monumento, sob tutela da Universidade de Évora desde 2017, está integrado na Herdade Experimental de Almocreva. Uma das propostas de missão para este local consiste no compromisso de tornar a Villa de Pisões num Campo Experimental para as Arqueociências, para realização de investigação científica multidisciplinar, em que a Geofísica Aplicada é uma das áreas de estudo contempladas (Caldeira & Borges, 2017). Desde 2017 foram realizados diversos levantamentos geofísicos experimentais com diferentes métodos para prospetar a subsuperfície e avaliar o estado de conservação de algumas estruturas.

A Villa de Pisões foi descoberta acidentalmente em 1967 durante a execução de trabalhos agrícolas. A partir de 1970 foram efetuadas diversas escavações que revelaram a *pars urbana* da villa. Esta é composta por mais de 40 compartimentos que se encontram distribuídos à volta de um pequeno peristilo colunado, com a fachada virada para sul, com largos pórticos colunados que abrem para um extenso espelho de água com cerca de 40 m de comprimento, um dos maiores observados em residências Romanas privadas na Península Ibérica (Alarcão, 1988).



**Figura 6.1:** Localização geográfica e vista geral da Villa Romana de Pisões (imagem obtida por drone). As estruturas visíveis na imagem correspondem aos vestígios *pars urbana* da villa (parte central), à zona envolvente (área prospetada) e os vestígios da barragem Romana (parte superior, lado direito).

Os vestígios encontrados foram datados do século I A.C. e os dados arquitetónicos permitem determinar que a villa teve ocupação até ao século V D.C. (Alarcão, 1988). Todo o espólio desenterrado mostra a grande imponência e luxuosidade que a residência Romana possuiu (Pereira et al., 2013), reveladas através dos pavimentos de mármore e mosaicos (Costa, 1983; Fallis, 1998), com grande detalhe decorativo e em elevado estado de conservação, dada a longevidade da sua construção.

Foram também descobertos vestígios de estruturas termais e banhos privados (Reis, 2004), compostas por diversas piscinas de pequenas dimensões, e por compartimentos que seriam aquecidos, uma vez que num nível inferior a estes existe o que resta do hipocausto das termas, que ainda possui a totalidade das paredes e do teto suportado por colunas e abóbodas (Couto, 2007). Na Figura 6.2 encontram-se ilustradas algumas das estruturas mais imponentes que se encontram expostas *in situ* em Pisões.

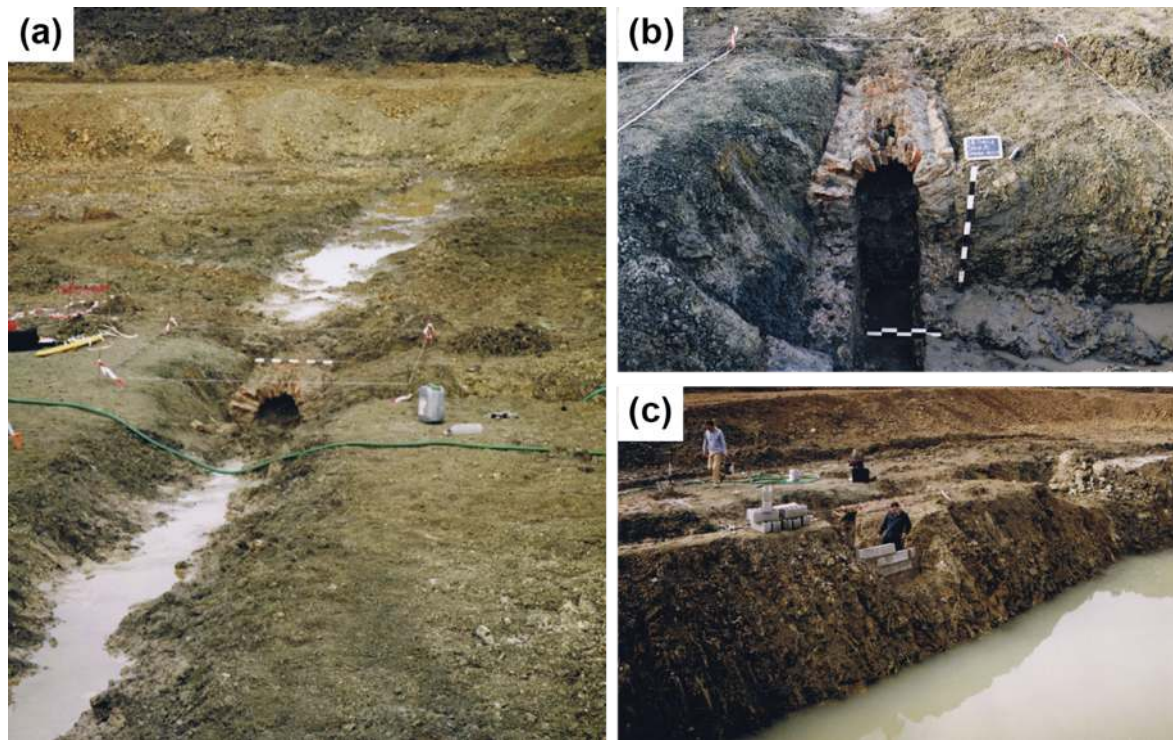


**Figura 6.2:** Diversos elementos constituintes da *pars urbana* da Villa Romana de Pisões. (a) Piscina de grandes dimensões (*natatio*). (b) Compartimentos e piscina de pequenas dimensões. (c) Hipocausto das termas. (d) Compartimentos, corredor colunado, escadas em mármore e pavimento de mosaicos. (e) Pavimento de mosaicos mostrando grande detalhe no seu design e nas suas cores. (f) Escadas em mármore e peristilo colunado.

A grandiosidade e extensão de toda a *pars urbana* descoberta implica que tenham existido estruturas de apoio como a *pars rustica* (as residências dos trabalhadores) e a *pars fructuaria* (as zonas de ferraria, olaria, silos). Estas ainda se encontram por descobrir e o conhecimento sobre os vestígios

desenterrados é muito escasso uma vez que as escavações realizadas foram conduzidas por Arqueólogos amadores, mediante métodos de escavação mal documentados e sem registo estratigráfico, pelo que nos chegaram poucas informações sobre o assunto.

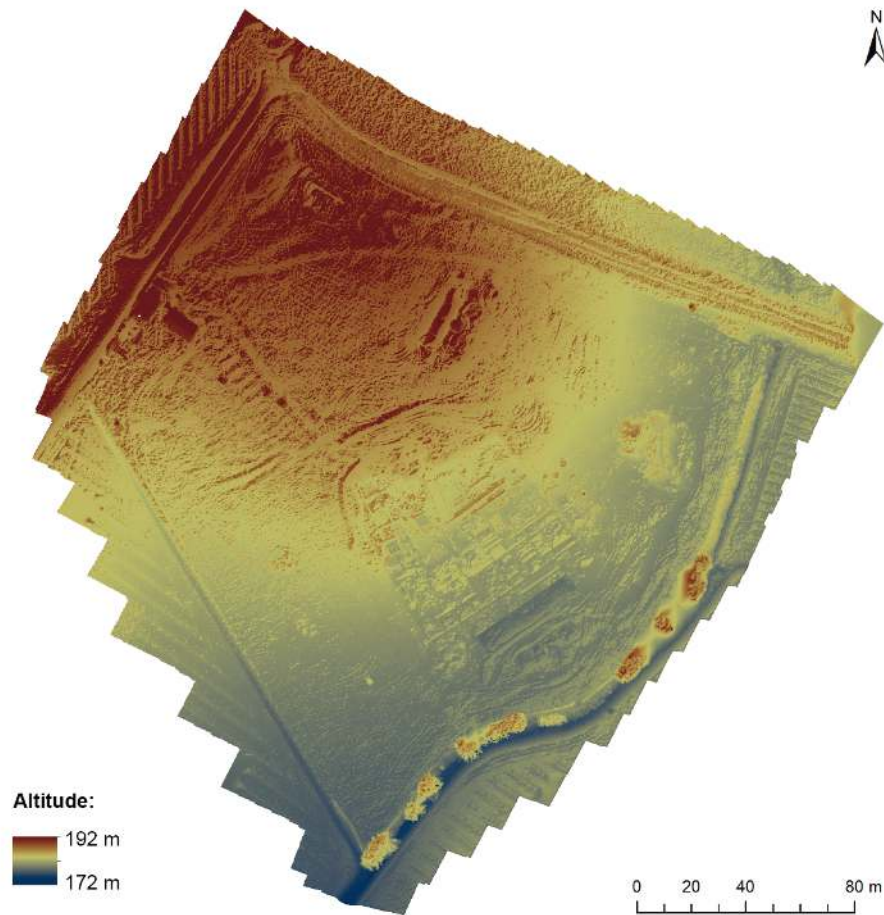
A descoberta no interior da villa de estruturas como poços, coletores, condutas, lagos com repuxo, orifícios de escoamento, piscinas de pequena dimensão, piscina de grande dimensão (*natatio*), termas e canos de chumbo usados em canalizações (Ribeiro, 1972), revelam que a Villa de Pisões possuía grandes necessidades de água, o que implica que houvesse todo um sistema hidráulico que permitisse o transporte de água até ao interior da villa. A poucos metros do recinto de Pisões existe uma barragem Romana e nas imediações da villa foi descoberta uma conduta de abastecimento de água do tipo aqueduto subterrâneo (Figura 6.3). A secção de conduta escavada está localizada junto a um curso de água atual que possui água em permanência, mesmo na estação seca, e possui direção perpendicular à direção do curso de água que passa na barragem, o que sugere que a água usada em Pisões não era proveniente exclusivamente da barragem.



**Figura 6.3:** Escavação de vestígios de uma conduta abobadada subterrânea, um aqueduto para transporte de água para o interior da Villa de Pisões. A estrutura localiza-se junto de uma linha de água a poucos metros do recinto protegido da villa. (a) Início da escavação, numa linha de água. (b) Aqueduto depois de escavado, exibindo grandes dimensões. (c) Obras de proteção da estrutura escavada; observa-se grande quantidade de água junto da escavação. Retirado de Serra (2007).

No que respeita às cotas do recinto protegido da Villa de Pisões, estas variam, entre 192 m no limite noroeste e 172 m no limite sudeste, possuindo inclinação para sudoeste (Figura 6.4). A topografia do terreno envolvente da villa limita as possibilidades de localização da rede de transporte de água para

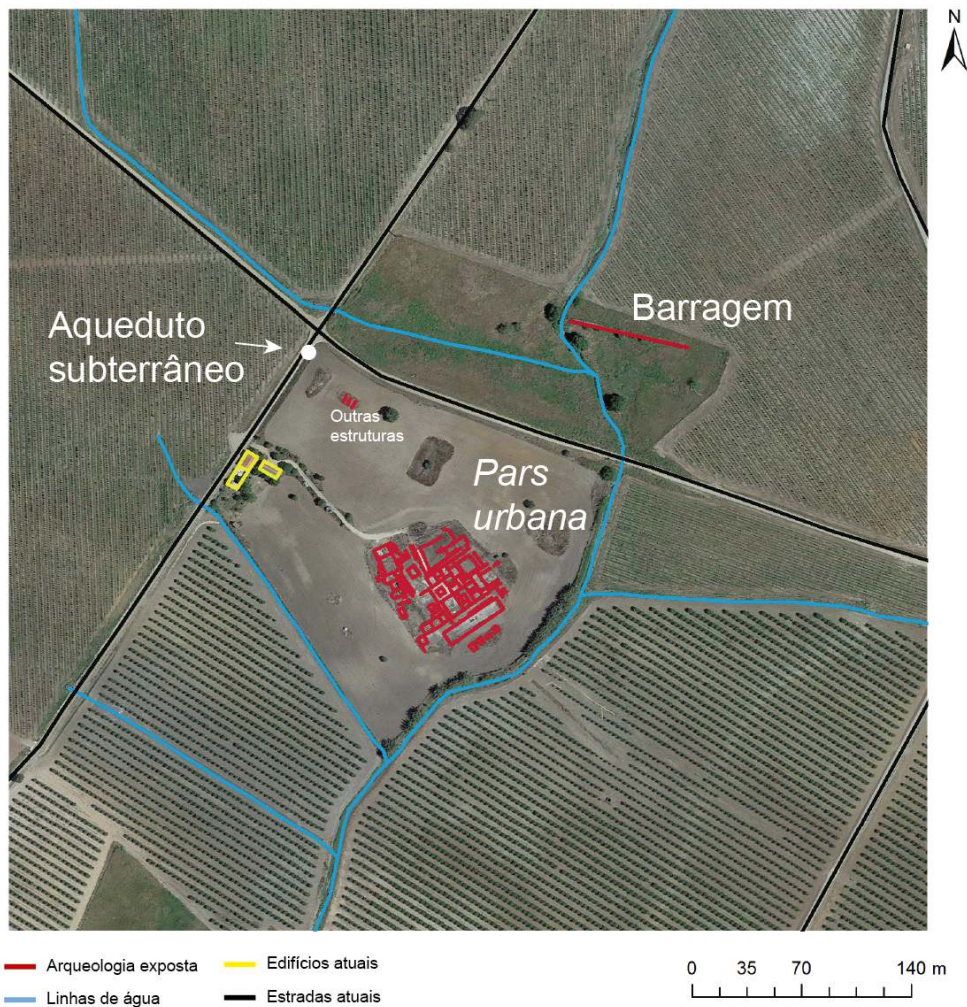
o seu interior, nomeadamente para o setor das termas. Neste caso a água virá de norte ou noroeste da área de implantação da villa. A *pars urbana* está localizada entre 180 e 175 m de altitude. A área envolvente às ruínas é praticamente plana e não possui grandes obstáculos, exceto alguma vegetação e restos das escavações anteriores, o que facilita a aquisição de dados geofísicos.



**Figura 6.4:** Modelo digital de elevação (MDE) de Pisões obtido por Fotogrametria com recurso a drone.

O solo existente na Villa de Pisões é argiloso e com baixo conteúdo em matéria orgânica, apresentando cor escura, classificado como aluviossolo pertencente à designação Barros Negros de Beja (Soares, 2012). Estes solos, originados por meteorização química de rochas básicas em locais com fraca drenagem, apresentam elevada expansibilidade e baixa permeabilidade, sendo observados fenómenos de retração e expansão que provoca o seu fendilhamento (Soares, 2012).

Os recursos hídricos presentes na área envolvente a Pisões apresentam-se na forma de pequenos cursos de água, que não deixam de correr nos verões quentes que caracterizam esta região do país. Destacam-se quatro ribeiros, um com direção e sentido norte-sul, que atravessa os vestígios da antiga barragem Romana, dois com direção e sentido oeste-este e um com direção e sentido este-oeste, que desaguam no curso de água de direção norte-sul (Figura 6.5).



**Figura 6.5:** Localização de algumas estruturas na área de estudo: vestígios arqueológicos (vermelho), edifícios atuais (amarelo), estradas (preto) e linhas de água (azul). Está assinalada a localização de uma sondagem onde foi descoberto o aqueduto subterrâneo.

Ainda sobre as características de algumas das estruturas escavadas destacam-se alguns pormenores mencionados em bibliografia, que comprovam alguns aspetos que deverão ser tidos em consideração na interpretação dos resultados do estudo geofísico realizado neste local. Destaca-se a localização da conduta de escoamento da piscina, no setor sudoeste da estrutura, e das termas, no setor sul do complexo termal, ambas em cota inferior à das próprias estruturas (Ribeiro, 1972).

Sobre a estrutura típica das villas Romanas, de acordo com os vestígios encontrados em diversas escavações arqueológicas e descrições encontradas na bibliografia sobre a sua constituição arquitetónica, como o Tratado de Arquitetura de Vitruvius (Maciel, 2006), geralmente possuíram o mesmo tipo de estrutura tripartida (Carneiro, 2010), dividida em *pars urbana*, *pars fructuaria* e *pars rustica*. A *pars urbana* corresponderia à habitação do proprietário, com grande luxuosidade decorativa, cujas divisões se dispõem à volta de um peristilo. A *pars fructuaria*, geralmente possui planta ortogonal,



corresponde às divisões de apoio à *pars urbana*, armazéns, lagar, celeiro, arruamentos, pátios, oficinas e termas. A *pars rustica* corresponde às divisões usadas pelos escravos (celas e divisões de trabalho) e pelos animais (estábulos, pombal). Os três conjuntos de estruturas não se encontram todos construídos segundo a mesma orientação no espaço, existindo um desalinhamento nítido, uma rotação axial entre esses elementos, possivelmente para a sua distinção funcional entre as estruturas de apoio e a *pars urbana* (Cardoso, 2018). Esta informação é de grande utilidade na interpretação e classificação dos vestígios de estruturas arqueológicas.

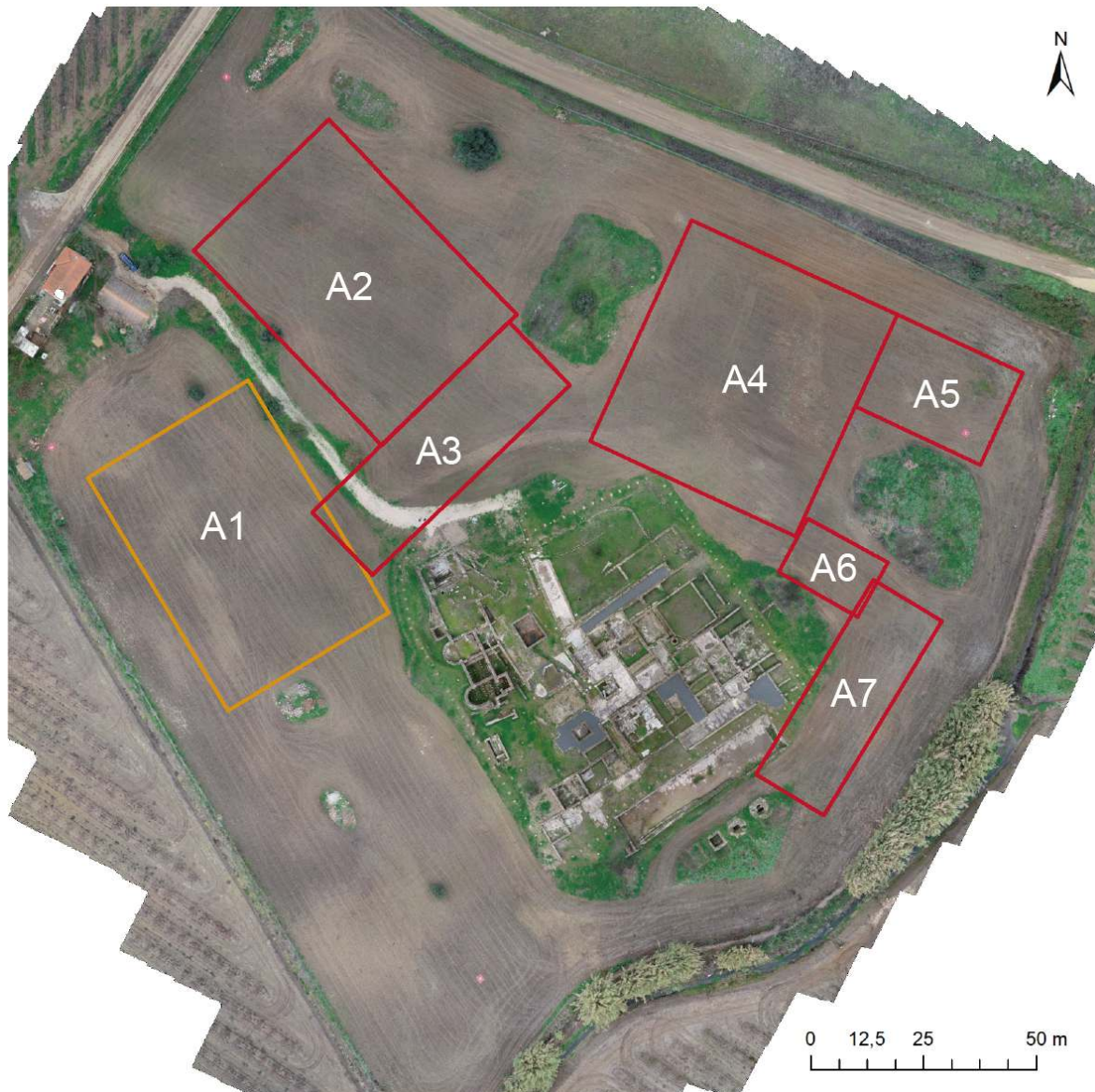
Na Villa Romana de Pisões são visíveis três conjuntos de orientações de estruturas (Figura 6.6), uma predominante, Direção 1, observada no conjunto de estruturas que compõem a *pars urbana*, com orientações preferenciais de  $55.15^\circ$  e  $146.31^\circ$ , nas termas observa-se outro grupo de orientações, Direção 2, com orientações preferenciais de  $67.41^\circ$  e  $155.26^\circ$ , e nos vestígios de estruturas na parte norte da villa observa-se outro conjunto de orientações de estruturas diferentes das anteriores, Direção 3, com orientações preferenciais de  $24.82^\circ$  e  $121.26^\circ$ .



**Figura 6.6:** Representação dos três conjuntos de orientações preferenciais das estruturas visíveis em Pisões. A rotação de direções poderá permitir a classificação em diferentes tipologias de edifícios que compõem uma villa Romana.

## 6.2. PROSPEÇÃO GEOFÍSICA DA VILLA ROMANA DE PISÕES

O estudo geofísico que se encontra em desenvolvimento na Villa Romana de Pisões teve início em 2017. Os primeiros levantamentos, de caráter experimental, foram executados no âmbito da criação do plano de ação para conhecimento em profundidade do local arqueológico e planeamento da sua conservação. Numa primeira etapa foi planificada uma prospeção magnética extensiva em modo pseudo-gradiente vertical aplicada em vários setores (Figura 6.7) 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.

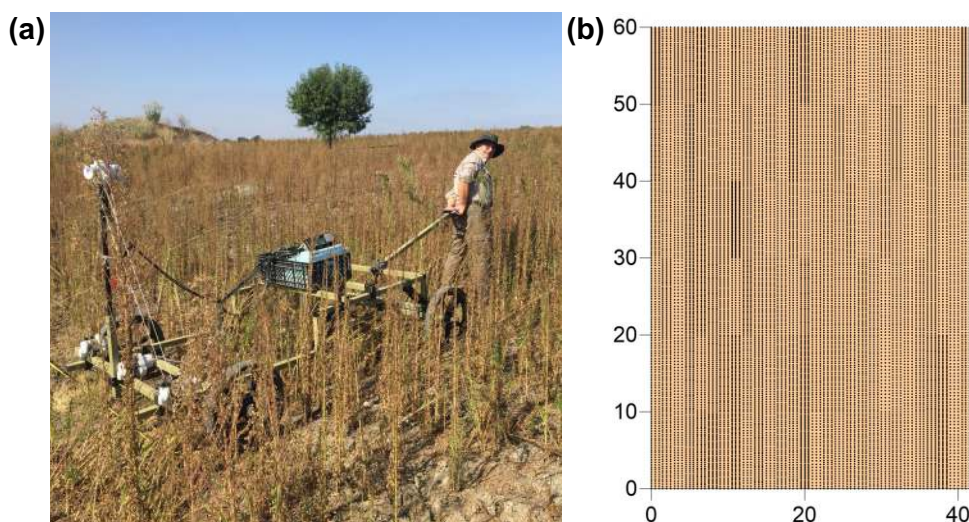


**Figura 6.7:** Localização dos setores onde foram efetuados levantamentos geofísicos. O levantamento de GPR foi efetuado no setor A1. O levantamento magnético foi realizado em todos os setores.

### 6.2.1. Prospecção magnética

#### *Aquisição e análise dos dados magnéticos*

A aquisição magnética foi efetuada em modo de pseudo-gradiente vertical com um *array* de magnetómetros 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 6.8). No total foram adquiridos 417 perfis que somam uma distância linear de 21240 m.

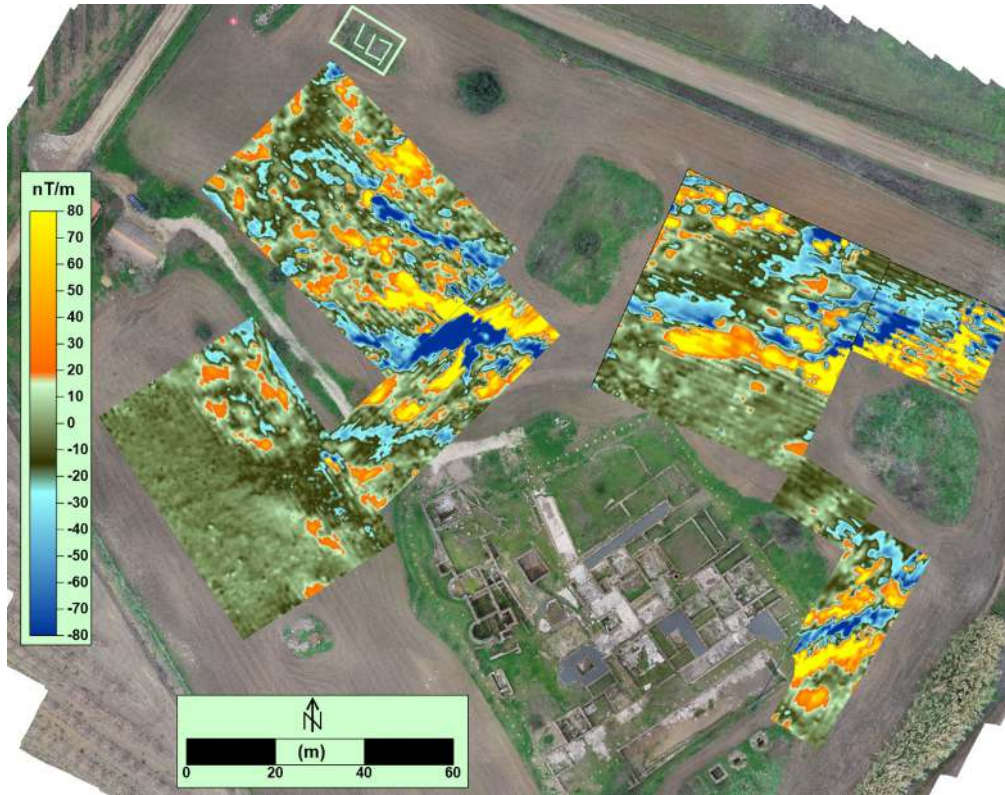


**Figura 6.8:** (a) A aquisição de dados magnéticos foi realizada com um *array* de 4 magnetómetros *overhauser* dispostos em T invertido como se mostra na fotografia. (b) Esquema final da malha de pontos obtidos pelo varrimento dos perfis em modo zig-zag. Cada ponto corresponde a um valor em bruto do 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*.

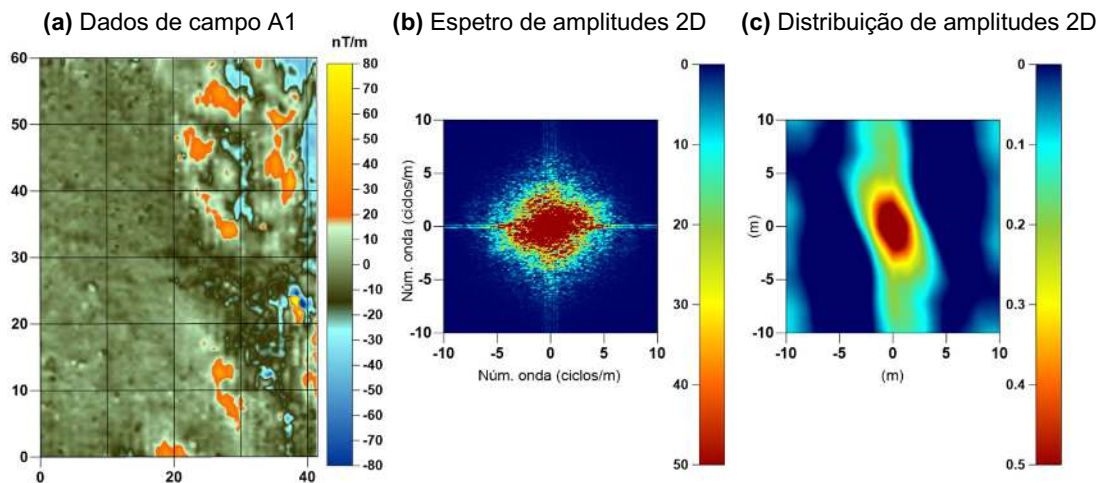
Antes do processamento houve necessidade de analisar os dados brutos, para planificar o fluxo de operações e determinar os parâmetros a fixar nos algoritmos. Nesta primeira aproximação aos dados magnéticos foram detetadas duas características relevantes, exibidas na Figura 6.9: (i) Distribuição dos valores 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  $\pm 10$  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 6.10 apresenta diagramas com os resultados desses cálculos para a área A1. O espectro de amplitudes (Figura 6.10b) 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 6.10c) também indica um eixo de anisotropia na direção N-S.



**Figura 6.9:** Mapa de anomalias do gradiente vertical 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 6.10:** 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  $\pm 5$  ciclos/m. (c) Distribuição espacial de amplitudes estendida  $\pm 10$  m de cada ponto da malha.

Processamento do sinal magnético

Na Tabela 6.1 estão indicados os passos do processamento aplicado a todos os setores magnéticos, cujo efeito das operações está representado na Figura 6.11. Antes de se aplicarem estas operações é necessário corrigir os efeitos de paralaxe e construir malhas regulares com algoritmos próprios.

Tabela 6.1: Fluxo de processamento para dos mapas de anomalias magnéticas.

Processos	Objetivo/Parametrização
Clipping a $\pm 20$ 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

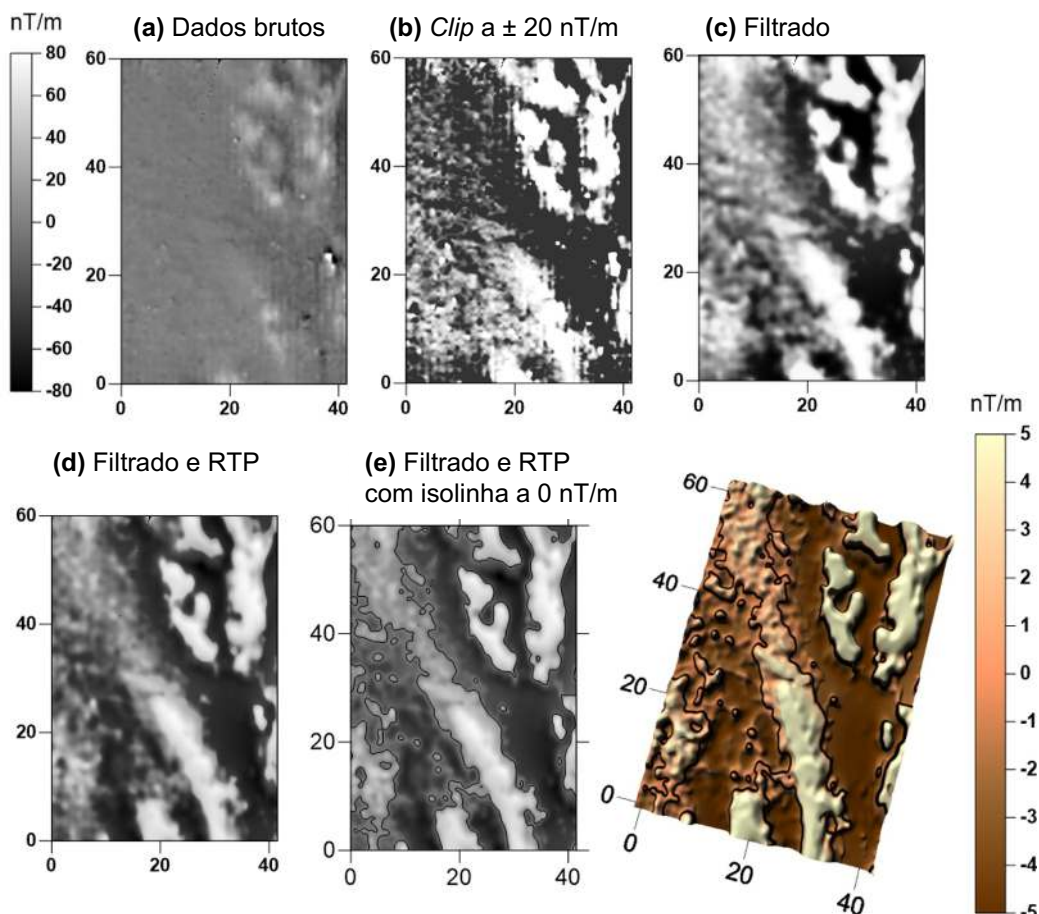
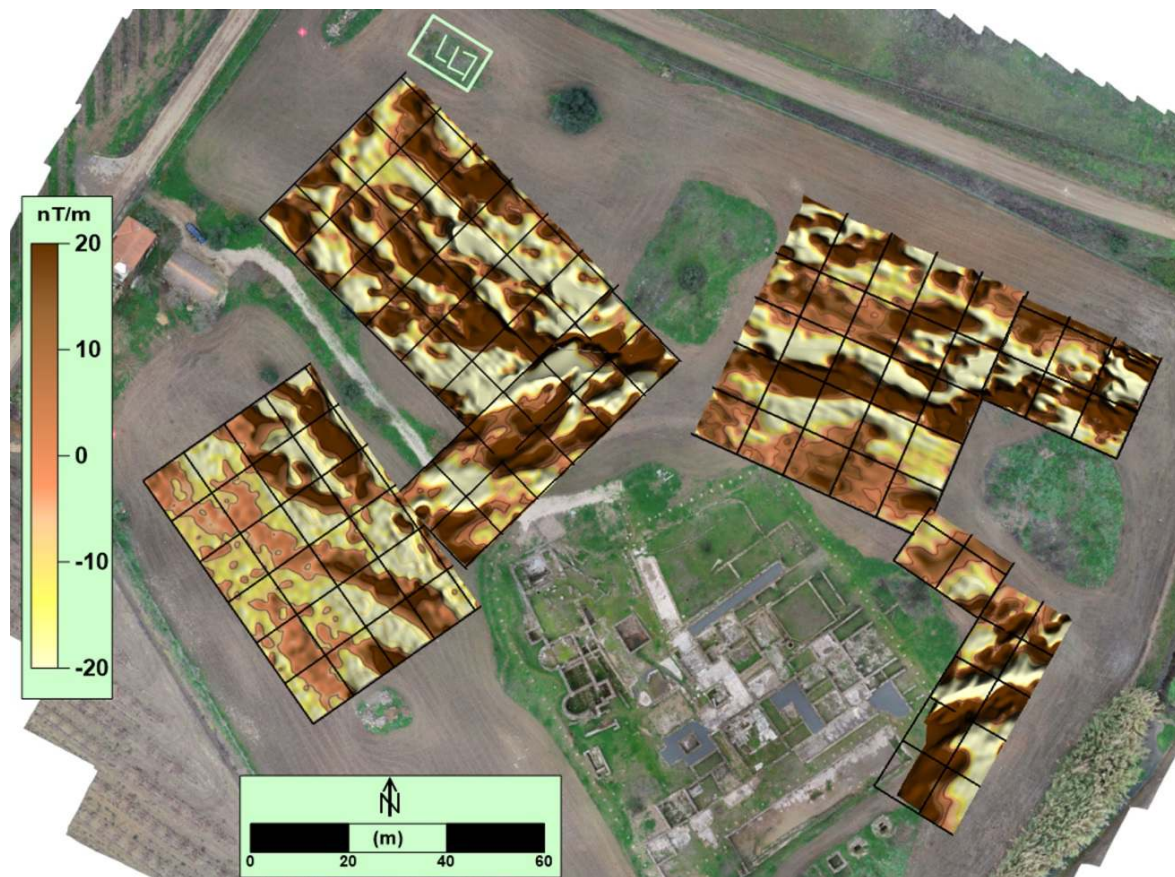


Figura 6.11: Resultados do processamento na área A1. Projção dos dados brutos (a), para definição do intervalo de valores de amplitude a considerar, em que se pode observar que a maioria das amplitudes estão definidas entre  $\pm 20$  nT/m (b). (c) Resultado dos filtros para eliminação do bandeado. (d) 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 6.11a), 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 6.11b). A maioria dos valores significativos encontram-se definidos entre  $\pm 20$  nT/m, que corresponde a magnetismo induzido (estruturas de alvenaria, entre  $\pm 10$  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 6.11c). Adicionalmente foi também aplicada a operação redução ao polo magnético (RTP) ao mapa de resultante com o objetivo de “verticalizar” as anomalias magnéticas (Figura 6.11d).

O mapa de anomalias final da área A1 encontra-se representado nas imagens da Figura 6.11e, 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 6.12 está representado o mapa de anomalias do conjunto das sete áreas resultantes do mesmo processamento.



**Figura 6.12:** 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.

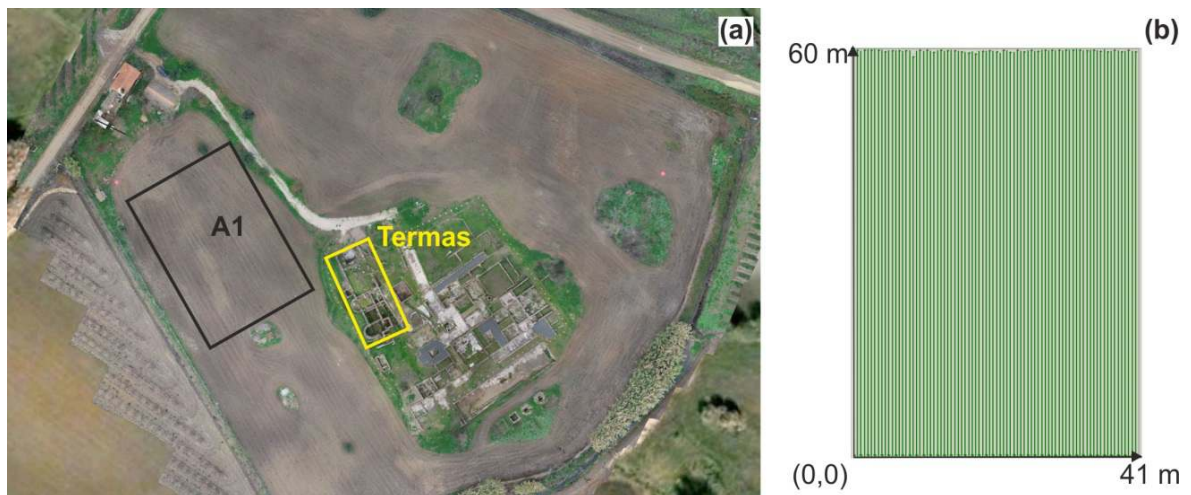
### 6.2.2. Prospecção GPR

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 (Serra, 2007) que indicam a presença de condutas do tipo aqueduto nas imediações (assinalada na Figura 6.5) 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 6.13 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 (aproximadamente).

Na Tabela 6.2 encontram-se representados os parâmetros que configuraram o sistema, para a aquisição com as duas antenas de GPR.

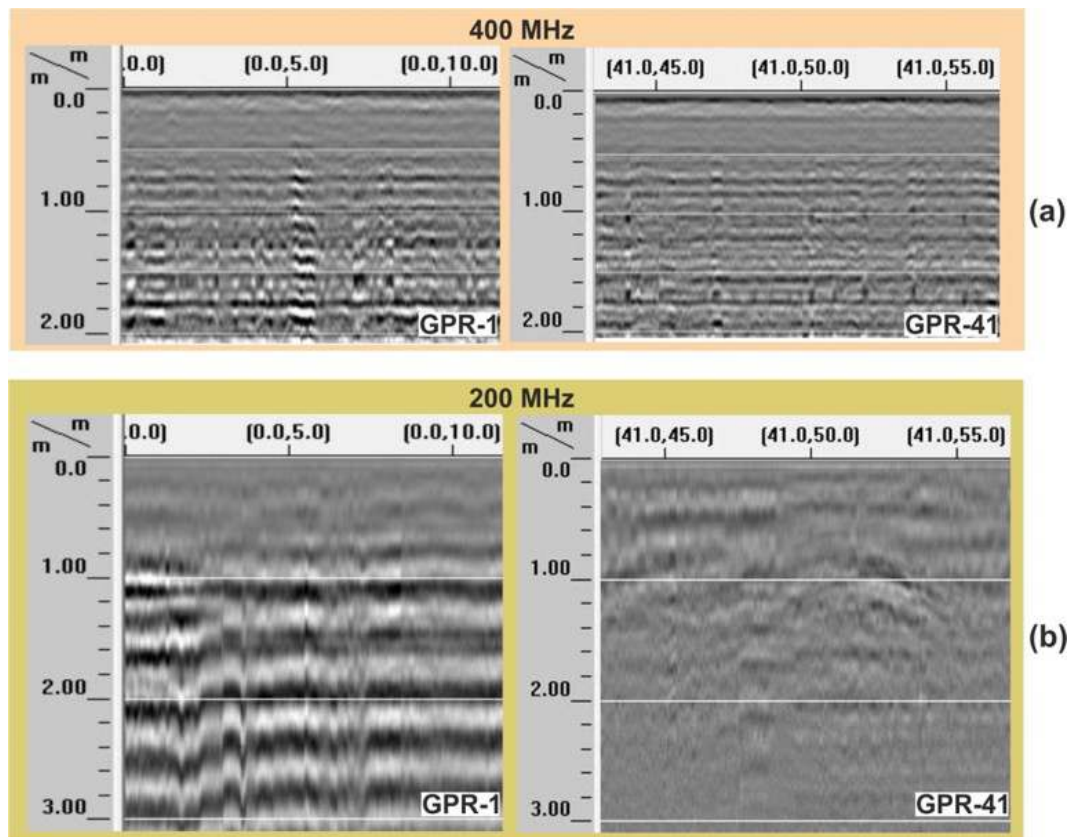


**Figura 6.13:** (a) Vista detalhada do setor A1 explorado com prospecção magnética e GPR. (b) Esquema de aquisição dos perfis de GPR, numa área de 41 x 60 m, adquiridos em modo zig-zag, espaçados de 0.5 m e com a mesma direção dos perfis magnéticos.

**Tabela 6.2:** Parâmetros de aquisição do conjunto de dados de GPR-3D obtidos com as duas antenas de GPR.

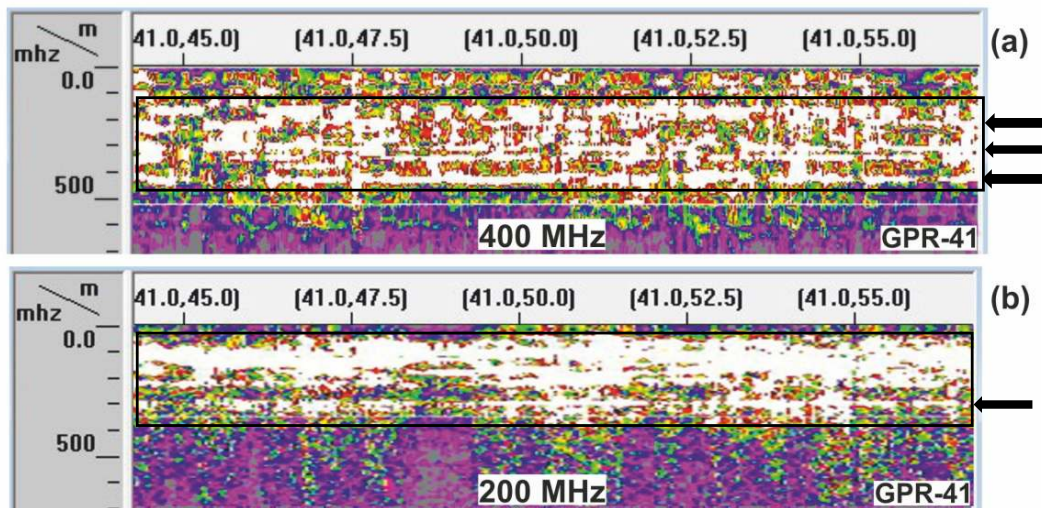
Parâmetros de aquisição	Antena de 400 MHz	Antena de 200 MHz
N.º de perfis	83	83
Distância entre perfis	0.50 m	0.50 m
Taxa de amostragem	40 traços/m	20 traços/m
Espaçamento horizontal ( <i>dy</i> )	0.025 m	0.050 m
N.º de amostras/traço	1024	1024
Alcance temporal	60 ns	100 ns
Espaçamento entre amostras ( <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 aspetos 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 6.14), em que foram definidos intervalos de frequências desses dados (Figura 6.15).



**Figura 6.14:** Porções de radargramas de campo homólogos, pertencentes aos dois conjuntos de dados de GPR (200 MHz e 400MHz).





**Figura 6.15:** Espectros de frequências das duas porções dos radargramas considerados na Figura 6.14, 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 6.15a) são detetadas bandas de monofrequência 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 (aluviosolos/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* ( $\delta$ , Equação 2.11). 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.

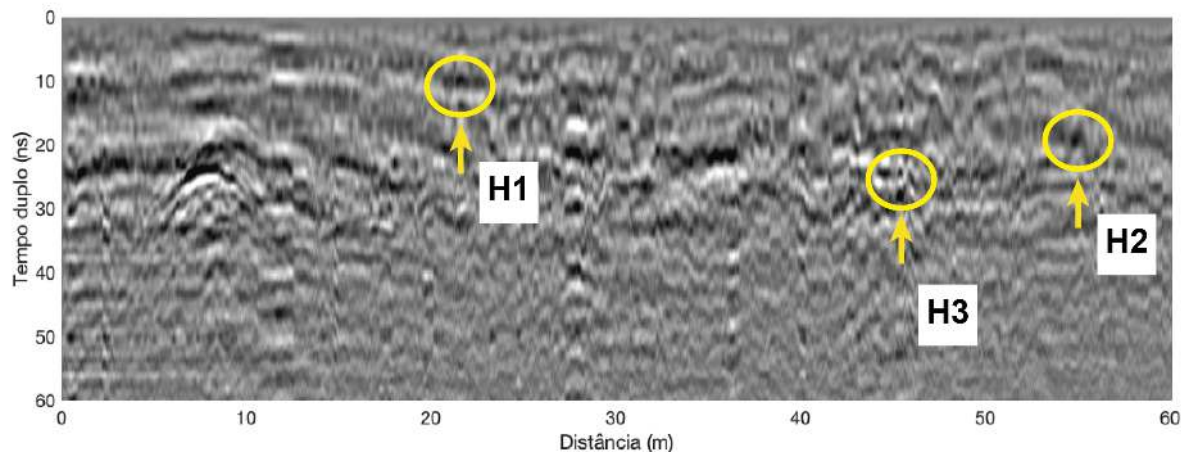
Por outro lado, se se considerar uma velocidade de propagação das OEM de 0.058 m/ns (determinada experimentalmente a partir da análise de alguns perfis obtidos nesta área), o comprimento de onda central para a antena de 400 MHz neste terreno é de  $\lambda \cong 0.14$  m. Aplicando o critério de *Huygens*,  $\frac{\lambda}{4} \cong 0.035$  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 6.14.

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 6.16) foram calculadas velocidades através do ajustamento da largura e abertura das hipérboles (H), tendo sido identificados três tipos de materiais (em analogia com a Tabela 2.2, Capítulo 2):

- 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 6.16:** Radargrama obtido com a antena de 200 MHz. Determinação de alguns valores de velocidade de materiais a partir do colapso das hipérboles de difração.

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

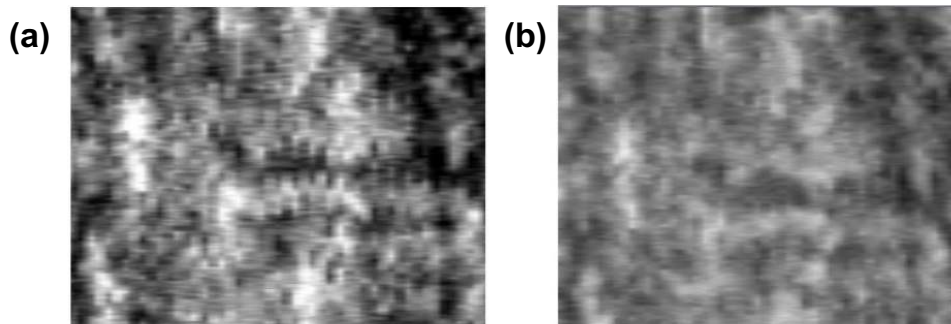
*Processamento convencional*

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 6.3 encontra-se sintetizado a sequência de procedimentos aplicada neste nível de processamento.

**Tabela 6.3:** Fluxo de processamento convencional aplicado aos dados de GPR (antena de 200 MHz).

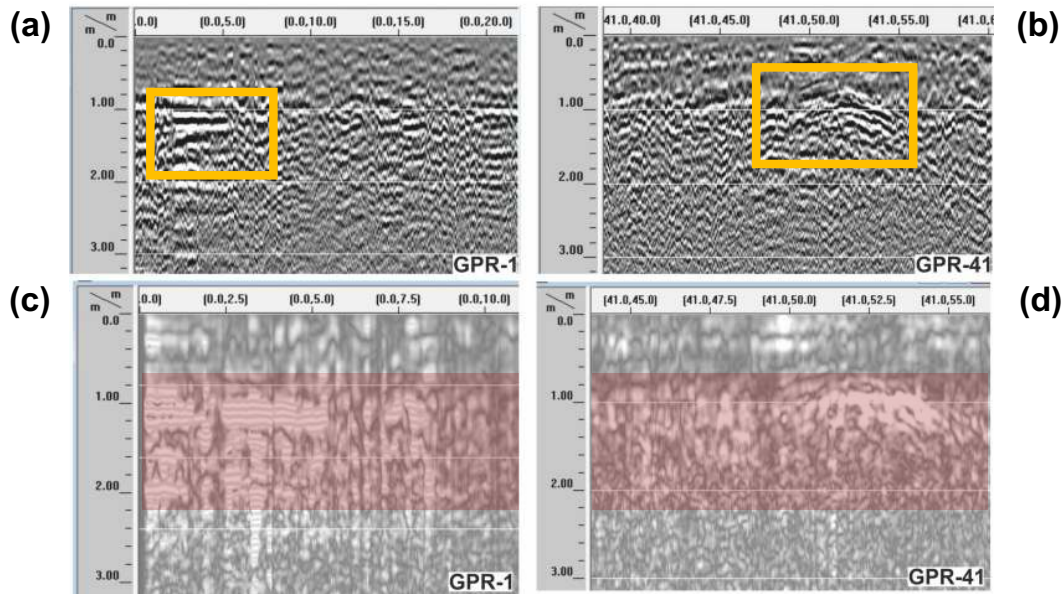
Operação	Parametrização
Correção da posição	<i>Shift</i> de 3.60 ns
Remoção dos ecos da onda aérea	Remoção do ruído de fundo
Desconvolução	<i>Operator length</i> : 31; <i>Prediction lag</i> : 11; <i>Prewhitening</i> : 10; <i>Gain</i> : 3
Filtro FIR temporal	Filtro passa-alto 150 MHz
Filtro FIR espacial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

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 6.17) que deve ser corrigido antes do restante processamento.



**Figura 6.17:** Efeito da correção da paralaxe, antes (a) e depois (b).

O efeito do processamento resumido na Tabela 6.3 está representado nos perfis de GPR da Figura 6.18a-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 perceptibilidade espacial das reflexões correspondentes a estruturas é baixa. Neste contexto foi aplicada a transformada de *Hilbert* em modo amplitude (Figura 6.18c-d) de modo a “empacotar” a energia e melhorar a visibilidade. A conversão em profundidade foi efetuada considerando a constante dielétrica média de 14.

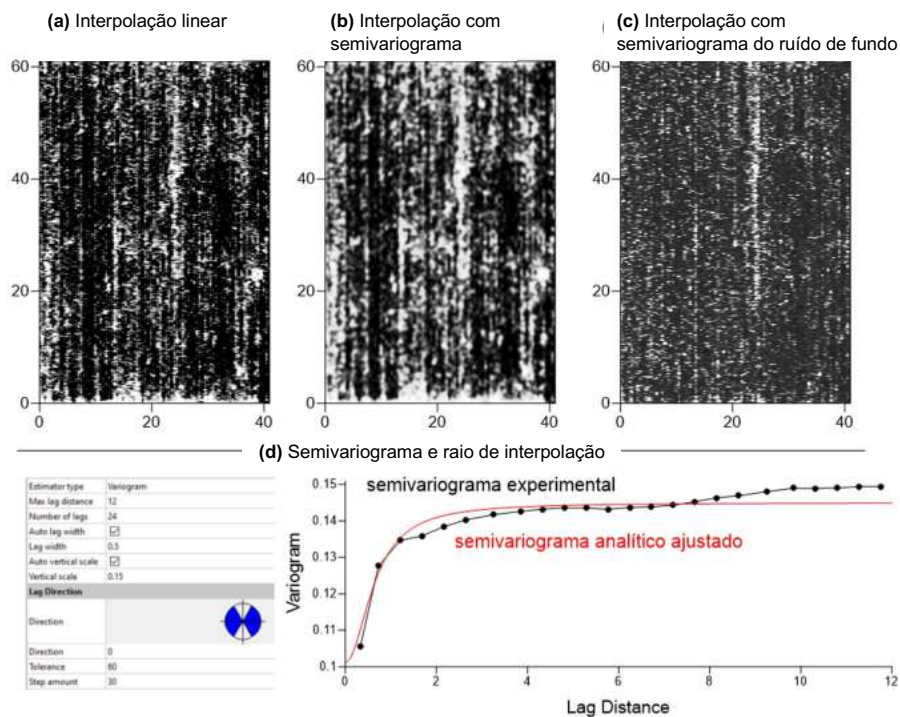


**Figura 6.18:** (a-b) Porções de radargramas, os mesmos exibidos na Figura 6.14, depois de aplicar o fluxo de processamento aos dados. O baixo valor da razão sinal-ruído obriga a aumentar a amplitude do sinal, o que provoca o aumento do ruído envolvente. (c-d) A transformada de *Hilbert* foi aplicada 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 6.18c-d). A superfície de cobertura que se obteve (Figura 6.19a) 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 6.19d), 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.



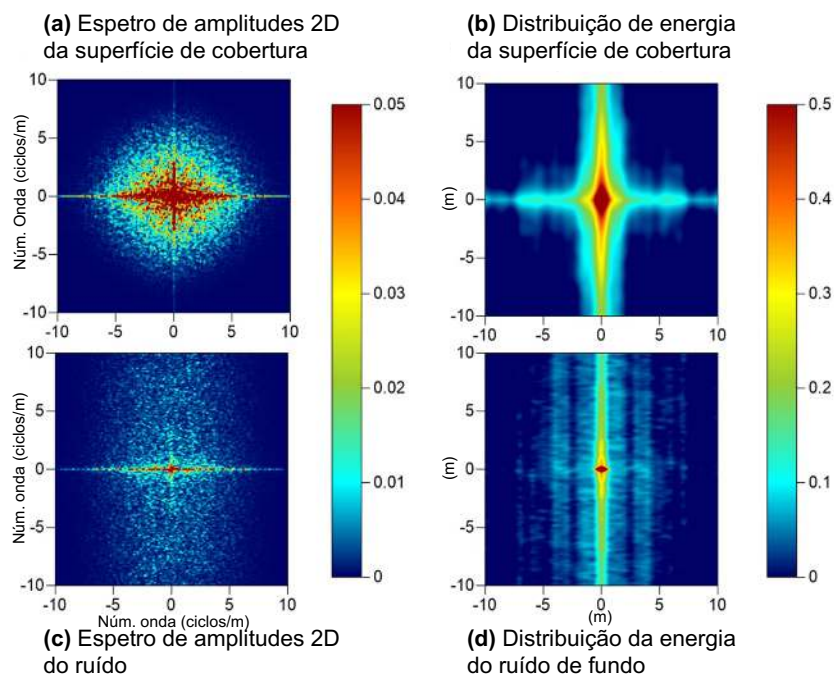
**Figura 6.19:** (a) Superfície de cobertura do conjunto GPR1 obtida por interpolação linear com o método de *kriging* de várias camadas a diferentes profundidades. (b) Mesmos dados depois de aplicar a interpolação a partir do semivariograma analítico. (c) Slice extraído a 3.65 m de profundidade com 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 30° centrados a norte e sul do ponto (círculo azul na Figura 6.19d). O resultado desta interpolação (Armstrong, 1989; Hengl, 2009; Kanankege et al., 2018) está representado na Figura 6.19b, 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 6.19c 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 6.18).

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 6.20 estão representados os espectros 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 6.10).



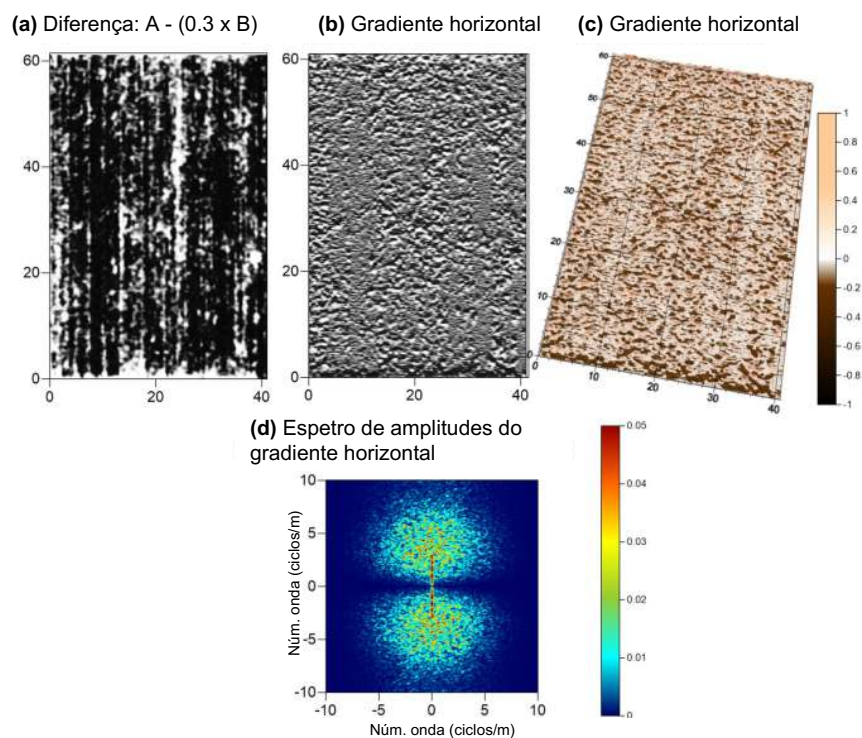
**Figura 6.20:** Análise espectral 2D do sinal. (a,c) Espectros de amplitudes que mostram a periodicidade espacial do sinal das duas superfícies consideradas. (b,d) Distribuição espacial de energia para as mesmas superfícies, que indicam as direções preferenciais da anisotropia.

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 6.20a,c). Por sua vez, a distribuição espacial de energia mostra também uma componente vertical que se estende a  $\pm 10$  m de cada ponto, assim como também para os lados com um alcance de  $\pm 5$  m (Figura 6.20b,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 6.21a). 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 6.21:** Processo de eliminação do bandado. (a) Superfície de cobertura normalizada resultante da diferença entre a superfície da Figura 6.19b e o ruído de fundo da Figura 6.19c. (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 direccionais).

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 6.21b,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 6.21d), que permite observar que o ruído bandado foi eliminado com sucesso.

#### *Processamento avançado*

A informação arqueológica das áreas prospectadas pode ser obtida, nomeadamente, pela inspeção visual à superfície do terreno realizada *in situ*, que revela uma enorme quantidade de vestígios arqueológicos (fragmentos de cerâmica, argamassa e tijolos). Nas imediações dos vestígios fragmentados existem estruturas arqueológicas desenterradas. Considerando estas informações e que os mapas de anomalias magnéticas obtidos mostram alinhamentos que sugerem a presença de estruturas enterradas, então pode-se atribuir um caráter de baixa detetabilidade ao método de GPR neste local. Esta problemática motivou que se aplicassem as operações avançadas de processamento de dados apresentadas nos Capítulos 3 e 4.

#### *Densificação de dados de GPR-3D com Interpolação de Fourier*

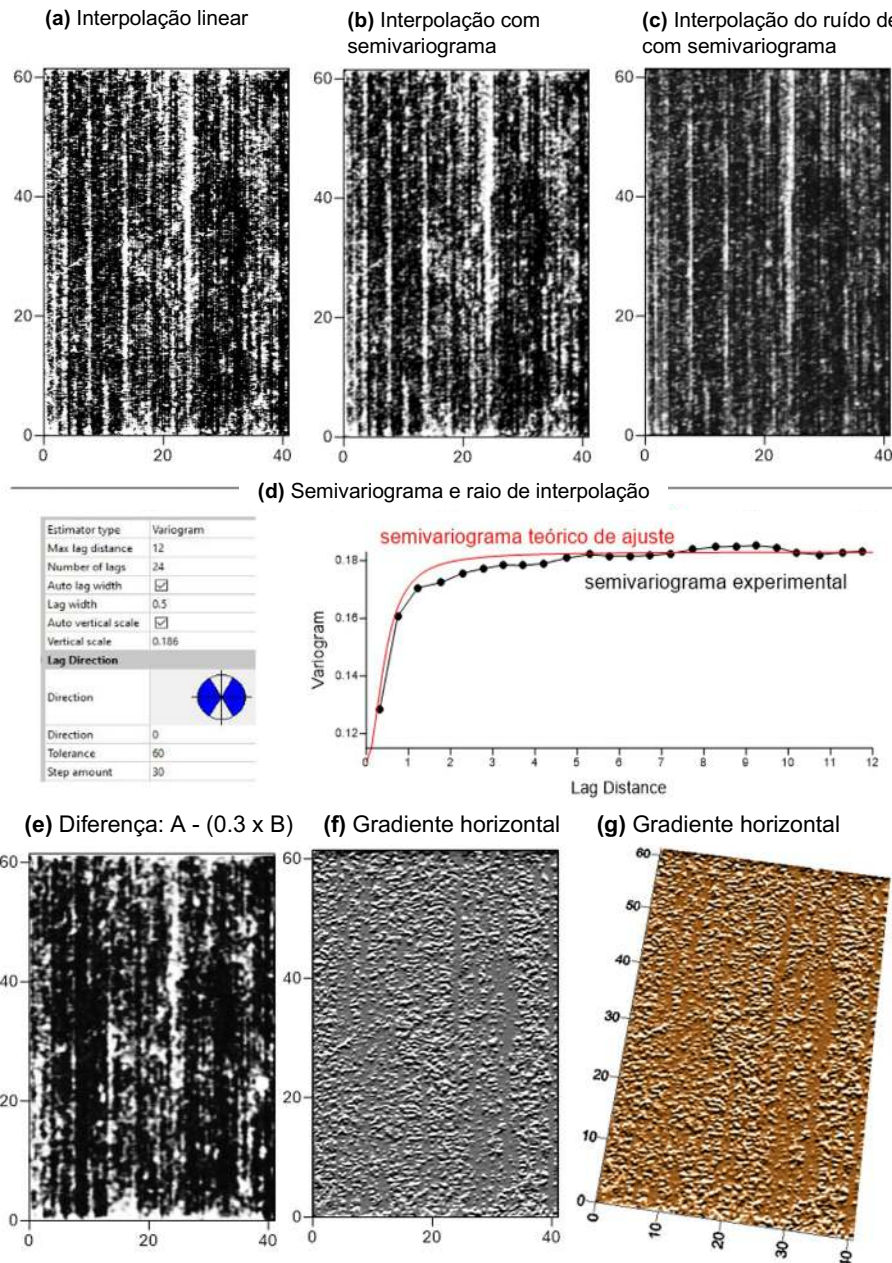
A densificação de dados aplicada a este conjunto de dados foi semelhante à aplicada no Capítulo 3. Foram interpolados perfis do conjunto 3D-GPR1 entre os perfis existentes, duplicando o número de 83 para 165 ( $2n-1$ , em que  $n$  é o número de perfis) e diminuindo a distância de 0.50 para 0.25 m. Adicionalmente foram também interpolados os traços de cada perfil, usando o mesmo algoritmo, passando a possuir  $2m-1$  traços ( $m$  é o número original de traços de cada perfil). O objetivo de aplicar dupla interpolação foi o de verificar se apresenta benefícios nos dados obtidos, nomeadamente o aumento da definição dos *slices* que serão extraídos do modelo 3D. O conjunto resultante, 3D-GPR2, foi processado com o mesmo fluxo de processamento da Tabela 6.3 e foi submetido ao mesmo tipo e análise espacial para eliminar o ruído de fundo persistente. Na Figura 6.22 estão representados os resultados obtidos para este conjunto de dados.

#### *Remoção do ruído de fundo através de Decomposição em Valores Singulares*

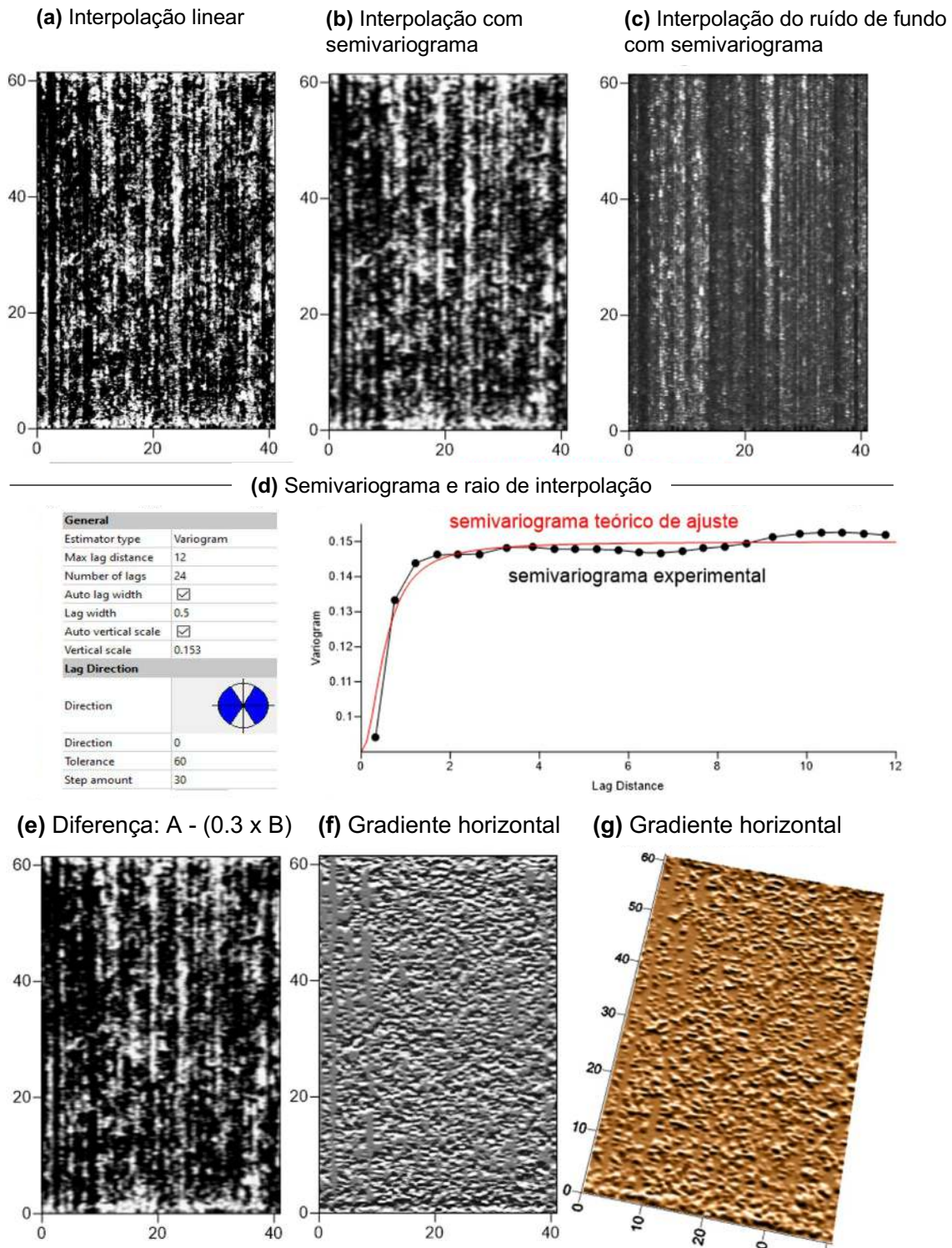
O conjunto 3D-GPR2 possui um excesso de ruído que não permite avaliar a presença de estruturas de uma forma clara e por isso foi submetido à técnica de SVD no domínio espectral (explorada no Capítulo 4). Esta abordagem é de aplicação semiautomática, dependendo apenas do utilizador o processamento prévio dos dados para aplicação das operações convencionais e a escolha da dimensão do filtro para eliminação das amplitudes em torno de  $k=0$  (amplitudes de grande comprimento de onda que provocam um efeito bandado na representação dos dados).



À semelhança do procedimento efetuado na secção anterior, a aplicação da abordagem foi inicialmente testada num perfil, antes de se aplicar iterativamente ao todo o conjunto 3D. Os resultados foram avaliados visualmente para verificar que não existem artefactos numéricos criados pelos algoritmos. Na Figura 6.23 estão representados os resultados das etapas de pós-processamento aplicado ao conjunto 3D-GPR3 usando as mesmas operações, parâmetros e critérios que nos casos anteriores.



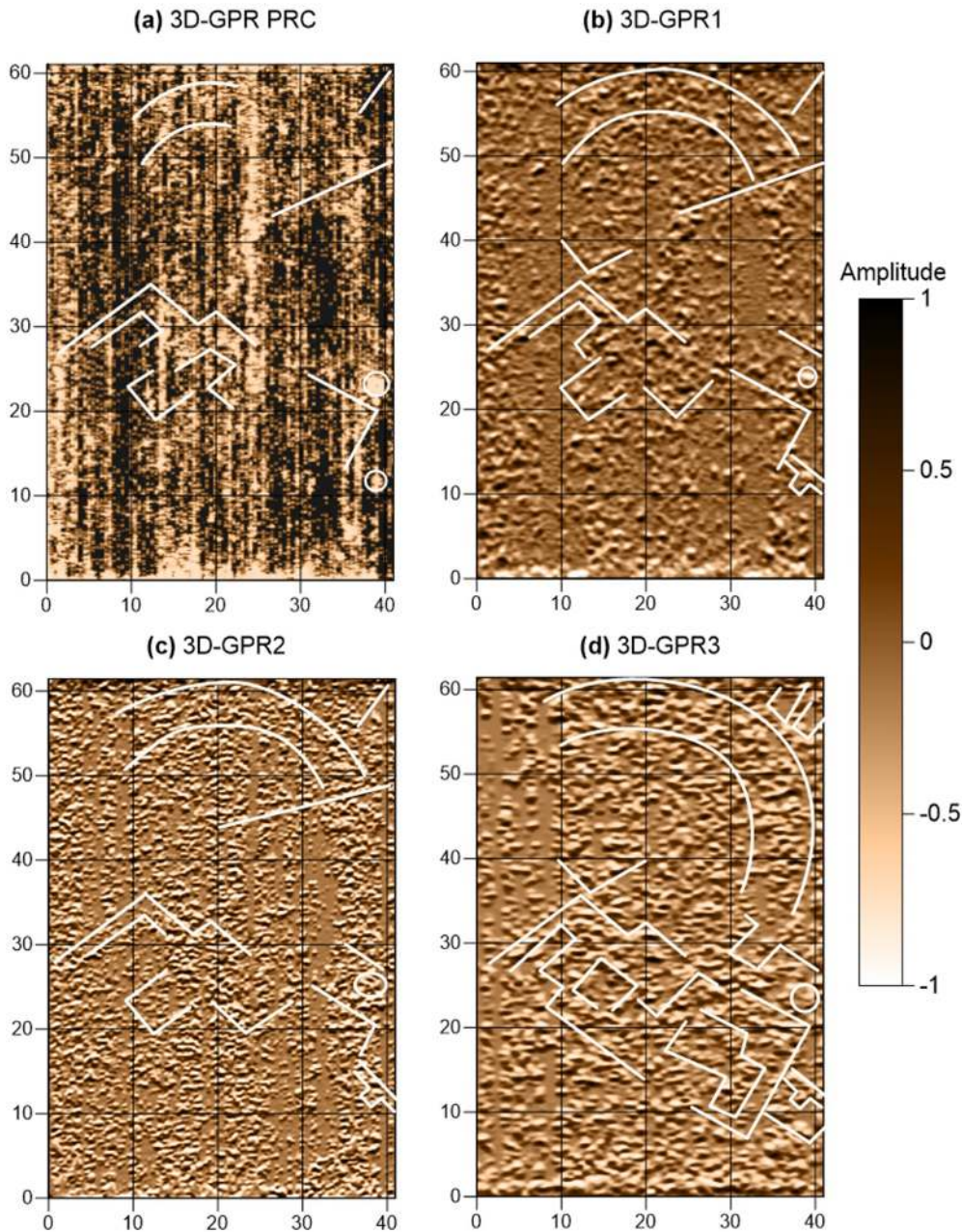
**Figura 6.22:** (a) Superfície de cobertura do conjunto 3D-GPR2, interpolado com o método de *kriging* linear. (b) Os mesmos dados depois de serem interpolados com recurso ao semivariograma analítico. (c) Slice à profundidade 3.65 m, com espessura 0.25 m, interpolado com o mesmo semivariograma. Este slice corresponde ao ruído de fundo e serve para eliminar o bandado N-S. (d) Semivariograma experimental e ajuste teórico. (e) Superfície de cobertura normalizada resultante da diferença (ponderada) entre a superfície (b) e o ruído de fundo (c). (f) Gradiente horizontal do conjunto anterior. (g) Mesmo conjunto do gradiente horizontal com representação espacial e outra escala de cores. Todas as malhas possuem valores de amplitude normalizados.



**Figura 6.23:** (a) Superfície de cobertura do conjunto 3D-GPR3 interpolado pelo método de *kriging* linear. (b) Os mesmos dados depois de efetuar a interpolação a partir do semivariograma analítico. (c) Slice à profundidade 3.65 m, com espessura de 0.25 m, correspondente ao ruído de fundo. (d) Semivariograma experimental e ajuste teórico. (e) Superfície de cobertura normalizada resultante da diferença (ponderada) entre a superfície anterior (b) e o ruído de fundo (c). (f) Gradiente horizontal do conjunto resultante. (g) Gradiente horizontal com representação espacial e outra escala de cores. Todas as malhas possuem valores de amplitude normalizados.

Comparação dos três conjuntos de dados

Na Figura 6.24 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), 3D-GPR2 – interpolação de perfis paralelos (c); e 3D-GPR3 – modelo final proposto, resultante das sequências anteriores e do algoritmo de remoção de ruído com SVD (d).



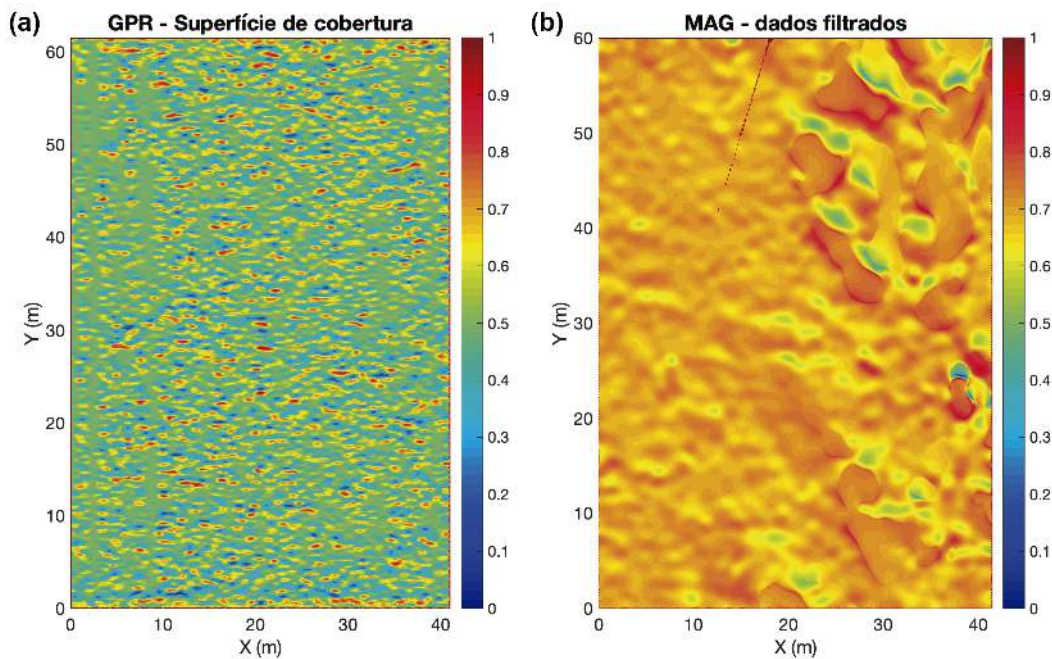
**Figura 6.24:** Etapas do processamento avançado aplicado aos conjuntos de dados de GPR-3D do setor A1 de Pisões. (a) 3D-GPR PRC, resultante do processamento básico. (b) 3D-GPR1, resultante da interpolação pelo método de *kriging* com semi-variograma. (c) 3D-GPR2, resultante da densificação de dados. (d) 3D-GPR3, resultante da remoção do ruído no domínio espectral. Sobre as três superfícies foram traçadas algumas linhas para facilitar a observação dos alinhamentos mais significativos.

Sobre os resultados obtidos foram traçadas uma série de linhas para facilitar a observação dos alinhamentos mais significativos. Salienta-se o aumento de novos lineamentos que vão sendo identificados à medida que se avança com o processamento avançado. Na Seção 6.4 será efetuada a interpretação dos alinhamentos que se observam em cada um dos modelos, após consideradas também as informações provenientes de todos os métodos aplicados no local. No caso da aplicação do algoritmo de interpolação horizontal (Figura 6.24c), regista-se um aumento do ruído de fundo, de forma que deve ser considerado um passo intermédio antes da aplicação do método SVD.

### 6.3. FUSÃO DE DADOS GEOFÍSICOS

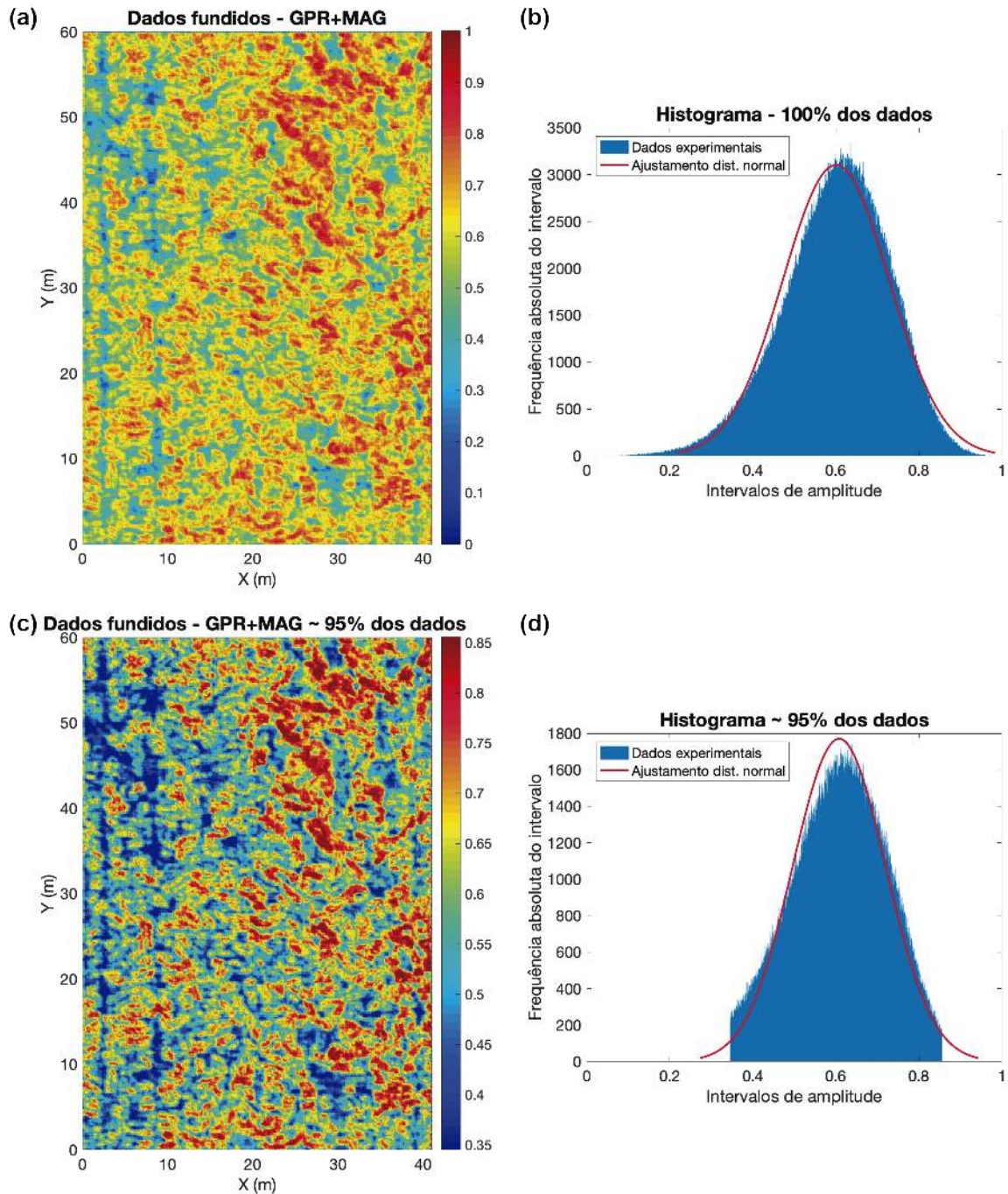
A fusão de dados geofísicos (explorada no Capítulo 5) pode ser vantajosa como última ferramenta para tentar articular as informações obtidas de dois modelos de baixa perceptibilidade para gerar um terceiro modelo representativo das propriedades físicas dos modelos de origem e mais perceptível. Nesta secção são apresentados os resultados da fusão de dados de GPR e de gradiente vertical magnético com recurso a DWT2 e MSVD.

Os dados de entrada usados para esta fusão correspondem ao conjunto 3D-GPR3 da Figura 6.23 e ao conjunto de dados de gradiente vertical magnético da Figura 6.11, ambos adquiridos no setor A1. Na Figura 6.25 estão representados os dados de entrada no algoritmo com valores de amplitude normalizados e outra escala de cores, cuja característica que mais se destaca é a baixa perceptibilidade sobre a presença de estruturas enterradas neste local.



**Figura 6.25:** Dados de entrada do algoritmo de fusão de dados geofísicos: (a) 3D-GPR3 – Superfície de cobertura dos dados densificados, processados e filtrados do ruído de fundo; (b) MAG gradiente vertical filtrado e com aplicação de RTP.

O resultado final que se obteve com a aplicação do algoritmo de fusão encontra-se representado na Figura 6.26a. A escala de cores usada na representação do mapa de gradiente de amplitudes (normalizadas) apresenta uma ligeira falta de contraste podendo dificultar a identificação dos alinhamentos de possíveis estruturas.



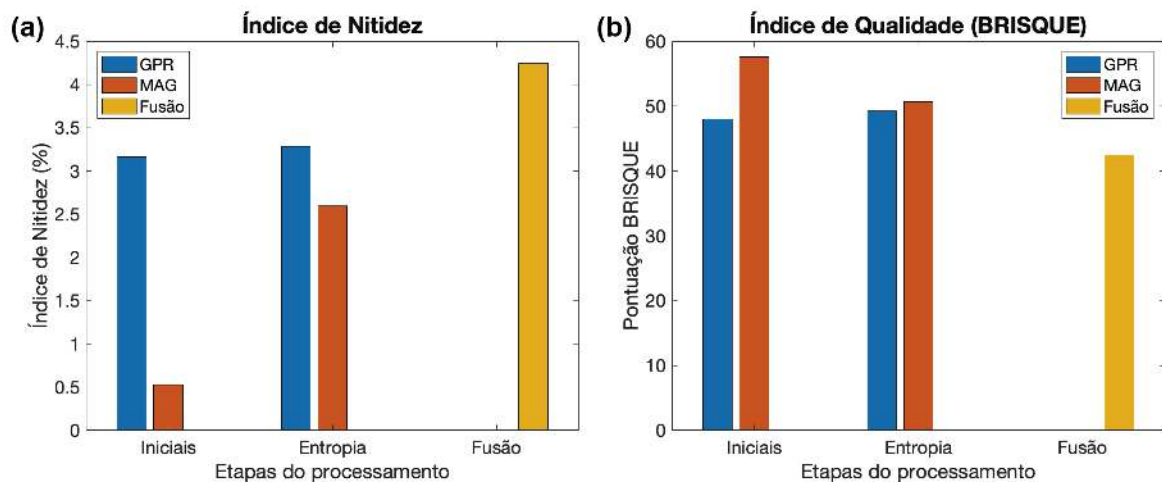
**Figura 6.26:** (a) Resultado da fusão de dados. (b) Histograma da frequência absoluta dos intervalos de amplitude dos resultados. (c) Ajuste da gama de cores do resultado da fusão de dados – representação de 95% dos valores de amplitude. (d) Histograma da frequência absoluta dos intervalos de amplitude de 95% dos valores considerados em (a).

De modo a equalizar a escala de cores, calculou-se o histograma dos valores de amplitude para afinar a escala de cores de forma a tentar prejudicar o menos possível o sinal (Figura 6.26b). Se forem considerados 95% dos dados (média  $\pm$  2 desvio padrão) o mapa final fica com uma escala de cores com mais contraste, facilitando a sua interpretação (Figura 6.26c). O histograma referente a 95% dos dados mantém a distribuição inicial da frequência absoluta dos valores de amplitude (Figura 6.26d). Os dois histogramas considerados apresentam distribuição normal muito bem definida e próxima do modelo teórico calculado (linha a vermelho).

Os resultados da fusão foram avaliados em várias etapas do processamento. O Índice de Nitidez (Tabela 6.4 e Figura 6.27a) aumentou, significando que houve um aumento de nitidez com a aplicação do algoritmo de fusão. O Índice de Qualidade – BRISQUE (Tabela 6.4 e Figura 6.27b) diminuiu, significando que a qualidade aumentou com a aplicação do algoritmo de fusão.

**Tabela 6.4:** Evolução do Índice de Nitidez e do Índice de Qualidade (BRISQUE) dos dados do setor A1.

Parâmetros de aquisição	Índice de Nitidez (%)	Índice de Qualidade (BRISQUE)
GPR iniciais	3.17	48.04
MAG iniciais	0.53	57.61
GPR Entropia	3.28	49.25
MAG Entropia	2.60	50.71
Fundidos	4.24	42.49

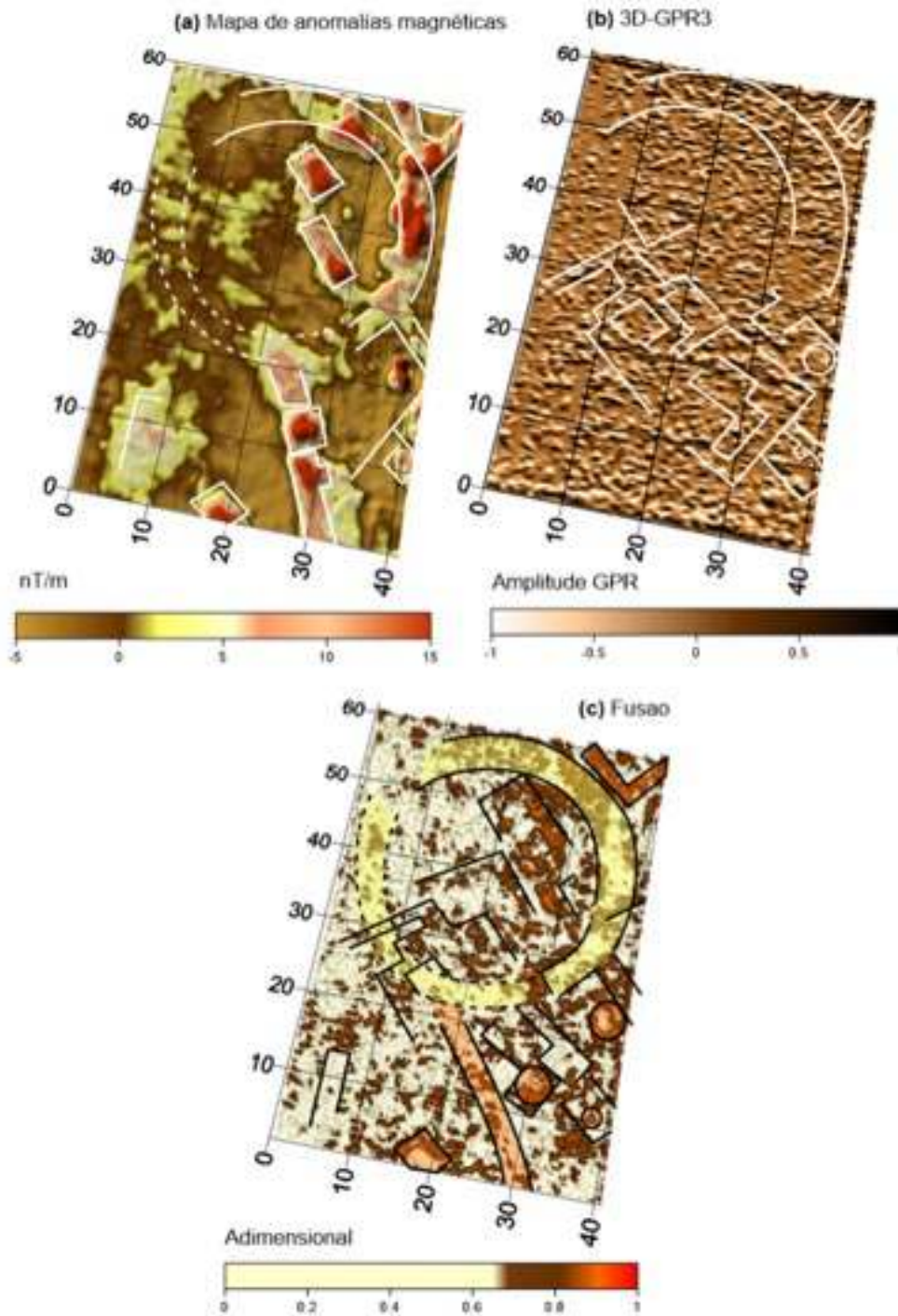


**Figura 6.27:** Representação gráfica da evolução do Índice de Nitidez (a) e Índice de Qualidade – BRISQUE (b) dos dados considerados em várias etapas da fusão de dados.

## 6.4. INTERPRETAÇÃO DA PROSPECÇÃO GEOFÍSICA

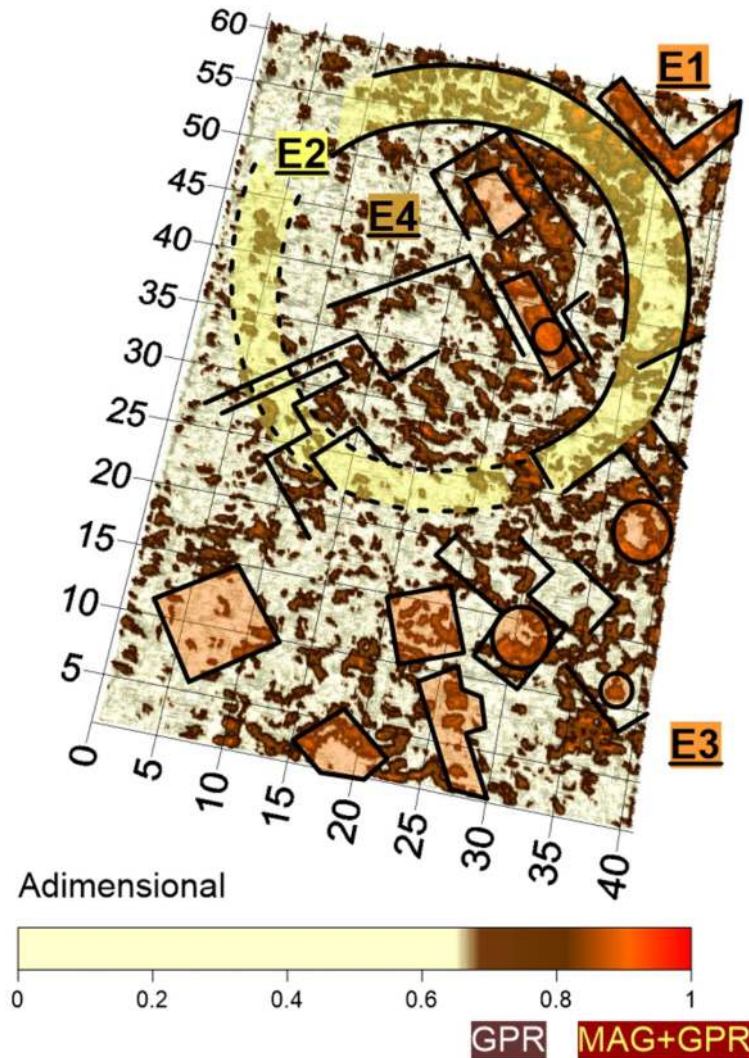
### 6.4.1. Interpretação do setor A1

Na Figura 6.28 estão representados os modelos geofísicos obtidos para o setor A1: (a) mapa de anomalias magnéticas; (b) modelo 3D-GPR final; e (c) gráfico de fusão de ambos.



**Figura 6.28:** Visualização dos modelos obtidos no setor A1. (a) Mapa de anomalias magnéticas. (b) Modelo 3D-GPR. (c) Resultado da fusão de dados de ambos. Sobre os três modelos foram traçadas as linhas interpretativas mais significativas.

O procedimento para interpretar as anomalias geofísicas consistiu em traçar-se as linhas mais significativas das duas imagens originais (mapas de anomalias magnéticas e 3D-GPR final), para depois se realizar a comparação-correção entre as interpretações e finalmente poder sobrepor-se a síntese ao modelo fundido (Figura 6.29).



**Figura 6.29:** Interpretação das anomalias geofísicas sobre o modelo da fusão. Os valores mais próximos da unidade (a vermelho) estão associados a locais em que há coincidência com os valores altos de anomalias magnéticas e o intervalo de valores médios (a castanho) a amplitudes GPR.

De seguida são detalhadas as estruturas marcadas na Figura 6.29:

- **E1:** A conjugação do alinhamento de forma hiperbólica visível nos resultados de GPR, com o valor elevado de anomalia magnética e a sua forma geométrica parece sugerir que é provável que se trate de uma parede de tijolos com espessura entre 1 e 2 m. Os dados de GPR indicam que o seu teto está localizado a cerca de 0.5 m de profundidade.



- **E2:** Esta estrutura é de baixa fiabilidade e metade desta estará muito arrasada. Possui forma circular, com um diâmetro interior aproximado de 30 m, com uma espessura de 5 m (a amarelo). A metade orientada a NE parece estar algo melhor conservada, no entanto apresenta ausências de material distribuídas de forma que podiam indicar reutilizações posteriores. Neste caso, as anomalias magnéticas altas podiam indicar acumulações de tijolos e lugares de combustão.
- **E3:** Pode tratar-se de um conjunto de estruturas que ocupam o quarto inferior SE da zona de estudo. Dado o tamanho e disposição das anomalias poderá tratar-se de restos de recintos retangulares de dimensões variadas, em que a maioria não excede os 4 x 4 m. Em alguns deles foram detetadas anomalias magnéticas pontuais, que são compatíveis com zonas de habitações e alguns restos de forno doméstico, uma vez que o magnetismo não é muito elevado.
- **E4:** No interior da coroa circular (E2) foram detetados vestígios dispersos de recintos de diferentes tamanhos e tipologias. Em direção à parte NE estão localizados os vestígios de maiores dimensões e melhor conservados que podem corresponder a esquinas de casas ou fornos, enquanto que no resto do círculo as estruturas se encontram mais arrasadas.

#### 6.4.2. Interpretação de toda a prospeção

Há que ter em conta que a interpretação do setor A1 foi realizada do ponto de vista geofísico que rastreia as possíveis estruturas geradoras de anomalia, no entanto, num local complexo e polifásico como o Villa de Pisões, seria necessária uma interpretação com recurso a Arqueologia que tenha em consideração o cânone urbanístico e a sua cronologia. Apesar dessa carência, os alinhamentos interpretados em A1 foram utilizados como padrão para extrapolar a interpretação de todas as áreas magnéticas.

Na Figura 6.30 está representada uma interpretação geral em que os modelos foram georreferenciados e sobrepostos a uma ortofotografia do sítio arqueológico. Esta interpretação é aproximada e deve ser considerada no seu contexto genérico, de modo que muitas das estruturas descritas deverão ser corrigidas depois de efetuar a comparação com as futuras escavações.

#### *Interpretação*

Tendo em conta os valores e distribuição das anomalias magnéticas, o sítio arqueológico apresenta uma zona de anomalias elevadas ( $\pm 60$  nT/m), situada na parte norte, e outra zona de anomalias médias localizada a sul ( $\pm 20$  nT/m). Separando os dois ambientes foi detetada uma anomalia linear

larga tripolar (vala azul) caracterizada por um máximo central e dois mínimos laterais, que foi interpretada como uma canalização hidráulica em que o máximo corresponde à parte cimentada (*opus signinum?*), com uma espessura entre 0.5 e 1 m, e as partes laterais à zona escavada entre 1 e 1.5 m transversais a cada lado, posteriormente preenchidos.

No setor A2 parece iniciar-se uma canalização com forma indeterminada, que coincide com um ligeiro gradiente à altitude 185 m (linha azul na Figura 6.31). Na sua margem direita foi detetado um conjunto disperso de altas anomalias com dimensão média de 3 x 4 m, que poderão corresponder a recintos que contêm algum tipo de cimentação (*opus signinum?* ou *caementicium?*), enquanto que na margem esquerda estão localizadas anomalias dimensões mais pequenas (2 x 2 m, aproximadamente), possivelmente formadas por tijolos, em que ao lado do caminho atual parecem corresponder a poços. Quase paralelamente à canalização foi detetada uma anomalia retangular negativa que pode ser associada a um fosso. A esquina sul é caracterizada também por uma anomalia negativa com interpretação similar, possivelmente relacionada com os poços anteriores situados a uma cota altimétrica superior.

No setor A3 foram obtidas uma série de anomalias em que a maior parte deverá ter origem edafológica-biológica.

No setor A4 existe uma anomalia tripolar linear que parece terminar no fim do setor A5, uma espécie de recinto com cerca de 5 m de largura. Assim como no setor A2, aqui a canalização parece ser uma divisória entre estruturas de altos valores magnéticos com dimensões semelhantes e construções, e na zona sul com anomalias médias que se estendem até aos setores A6 e A7. Nas estruturas a norte foram localizadas pequenas anomalias bipolares circulares que podem corresponder a fornos (marcados com círculos vermelhos).

Se se considerarem as estruturas situadas no limite este da Villa com as anomalias médias detetadas nos setores A6 e A7, parece ser provável que se trate de recintos habitacionais parecidos.

No setor A7 foi detetada uma anomalia similar que parece sair do leito do rio dirigida à grande *natatio*. Está localizada imediatamente ao lado das estruturas identificadas como necrópole (Pereira et al., 2013).

A Figura 6.31 é uma imagem tridimensional da exploração geofísica sobreposta ao MDE georreferenciada em coordenadas UTM (WGS 1984 Zona 29 N). O mapa de anomalias magnéticas do setor A1 foi substituído pelo modelo de fusão, de modo a que se possa observar o notável aumento de resolução e de informação nele contido. Neste caso foi omitida a interpretação para que a própria imagem possa fomentar uma interpretação sem que se condicionem interpretações alternativas.

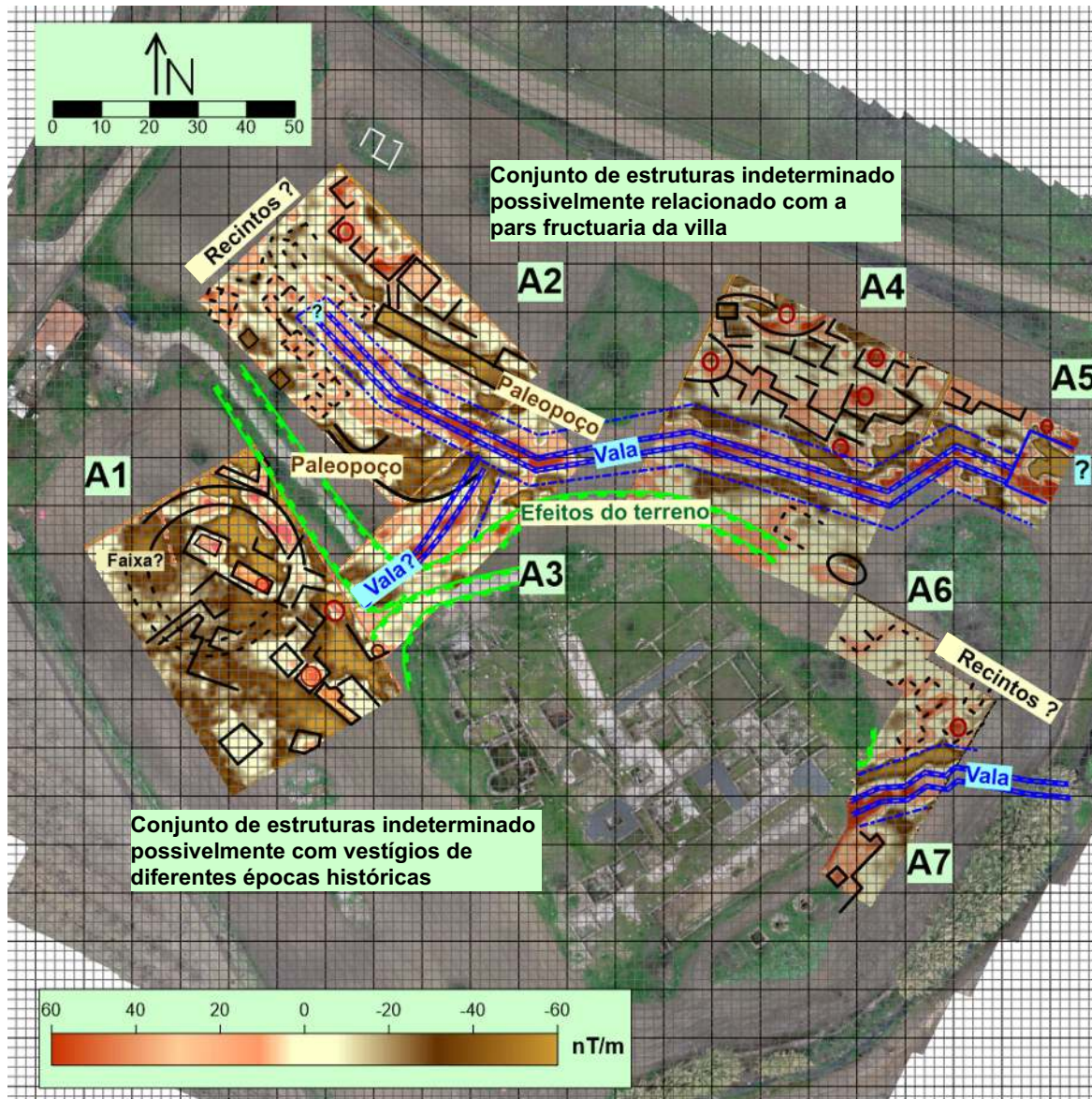
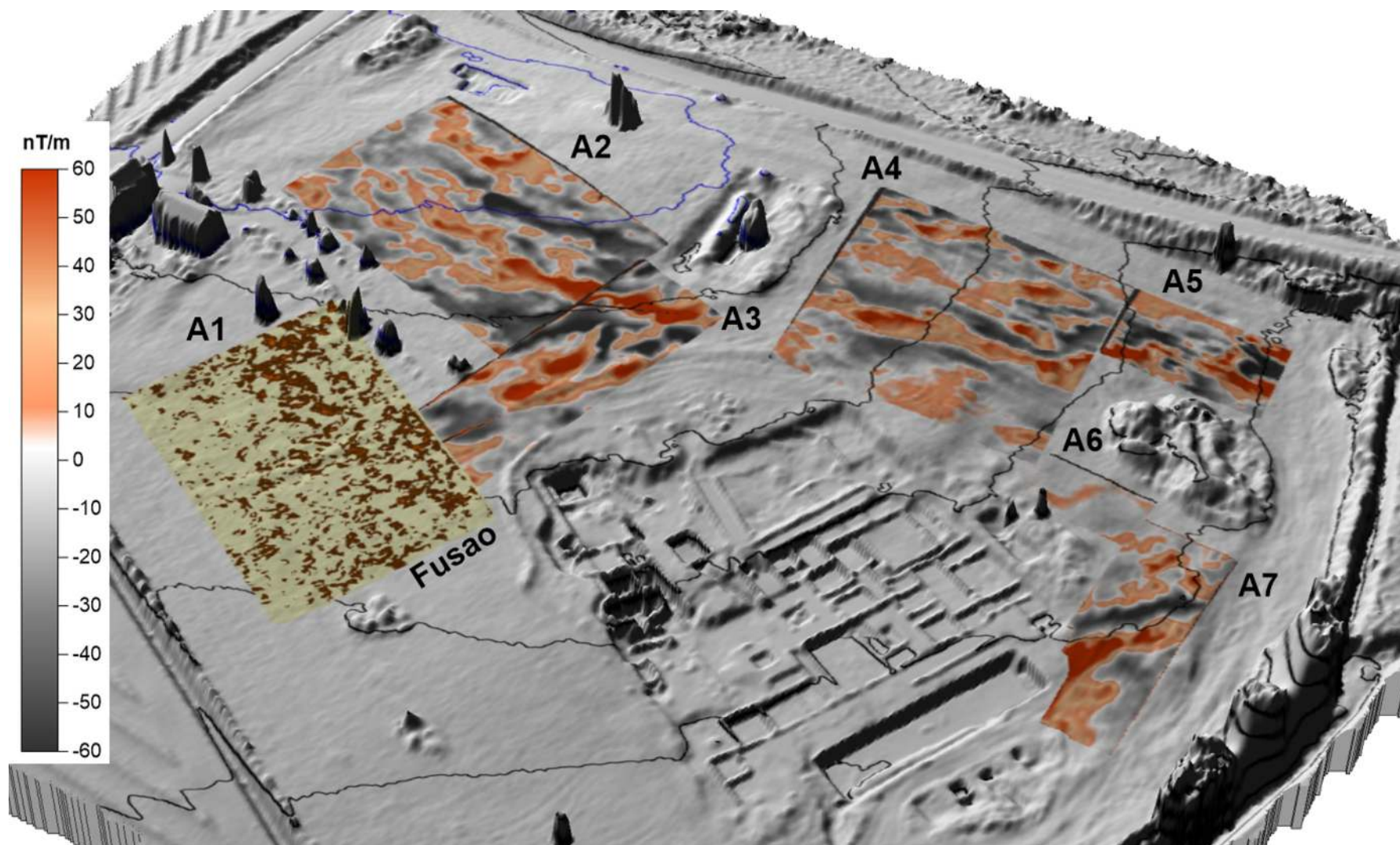


Figura 6.30: Interpretação geral da prospeção geofísica sobre a ortofotografia da Villa de Pisões.



**Figura 6.31:** Vista geral da exploração geofísica sobre o MDE da Villa de Pisões. Em todos os setores há sobreposição do levantamento magnético, exceto no setor A1, em que está representado o modelo de fusão. Foi marcada com cor azul a curva de nível da altitude 185 m para evidenciar o início da canalização detetada.

## 6.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste capítulo consistiu em testar os algoritmos avançados criados para melhorar os dados magnéticos e de GPR apresentados nesta tese. Para isso foi escolhido um sítio arqueológico em que o material em torno de estruturas enterradas é formado por argilas-limos húmidos e orgânicos que provoca uma pobre deteção do GPR. Além disso, as altas anomalias magnéticas produzidas pelas canalizações hidráulicas cimentadas produzem também um obstáculo do sinal magnético, que “ofuscam” as zonas com magnetismo induzido da proximidade, de forma que também se torna difícil a diferenciação.

A nível metodológico, o procedimento aplicado no setor A1 exemplifica de que modo a geração do modelo de fusão representa uma síntese dos métodos para melhorar a interpretação. Observou-se um desfasamento de cerca de meio metro em relação às anomalias, efeito provocado pelo algoritmo.

Este estudo também ilustra a vantagem da utilização de modelos georreferenciados, para facilitar a interpretação, já que a sua sobreposição a uma ortofotografia e/ou ao MDE contribui para entender a distribuição espacial de um sítio arqueológico.

Na última etapa, o objetivo final de todo o estudo geofísico é a interpretação dos modelos anómalos, por isso é crucial estabelecer os critérios de interpretação baseados em toda a informação disponível (perfis de contraste, bibliografia, informação arqueológica). Mesmo assim, os métodos geofísicos são técnicas indiretas de medida de forma que estão intrinsecamente limitadas por uma determinada resolução (Capítulo 2) e não podem nunca chegar a um nível de precisão como o que se consegue com uma escavação arqueológica, nem é essa a sua pretensão. Desta forma, qualquer interpretação que seja apresentada deve ser considerada provisória até a um momento posterior de análise com critérios arqueológicos e com a validação efetiva com uma escavação. Neste contexto, qualquer exploração geofísica representa mais uma ferramenta que o arqueólogo pode considerar.

Outro fator a ter em conta é que a geofísica não distingue anomalias pela sua afiliação crono-cultural, de forma que se estamos perante um sítio arqueológico de carácter polifásico, é muito provável que parte das anomalias interpretadas tenham cronologias diferentes à ocupação Romana.

Boa parte da interpretação dos resultados não poderia ter sido realizada sem a colaboração dos Arqueólogos, Professor André Carneiro (Departamento de História – Universidade de Évora) e Doutor Jesús Sánchez (Instituto de Arqueología de Mérida), a quem expressamos o nosso agradecimento.



## **CAPÍTULO 7**

### **CONCLUSÕES**

Atualmente, qualquer intervenção arqueológica envolve a colaboração entre várias disciplinas científicas, em que cada uma interpreta o local a partir do seu enquadramento epistemológico. Deste modo a Arqueologia Moderna já não contempla apenas a historiografia, os processos de escavação, restauro e construção; tornou-se uma ciência interdisciplinar. A Geofísica faz parte do grupo de especialidades que apoiam a Arqueologia. A sua capacidade para explorar a subsuperfície e obter informação de um local arqueológico através de sensores remotos (*remote sensing methods*) ou *in situ*, mas sempre sem ter de o invadir, faz dela um aliado precioso do Arqueólogo. A sua ação na Arqueologia é orientada fundamentalmente para três áreas de estudo: (i) a contextualização geoarqueológica do local; (ii) a obtenção de modelos do subsolo contendo a distribuição espacial das estruturas enterradas; e (iii) o estudo de uma determinada estrutura.

Como se sabe, uma característica comum dos métodos geofísicos aplicados em Arqueologia é que não são destrutivos e cada um deles tem uma capacidade diferente de deteção do objeto de estudo. Cada um produz como resultado um modelo do subsolo que representa a visão de uma realidade dada pela distribuição de uma propriedade específica dessa realidade que foi estimada (velocidades sísmicas, resistividades, suscetibilidade magnética). São modelos que não sendo iguais, por se referirem à mesma realidade contém necessariamente traços comuns. A semelhança entre eles será tanto mais fácil de perceber quanto maior a resolução dos parâmetros físicos estimados por cada um. Um grande desafio para os profissionais de Geofísica é proporcionar a correspondência entre os modelos geofísicos de forma a extrair deles a melhor e mais substancial percepção arqueológica do objeto em estudo.

A presente Tese de Doutoramento é escrita neste paradigma, porque as novas metodologias apresentadas são centradas na melhoria dos modelos resultantes de tratamentos convencionais. Todos os três algoritmos construídos são dirigidos a aumentar a razão sinal/ruído dos dados de GPR e magnéticos em condições de baixa detetabilidade. O estudo demonstrou que a aplicação destes tratamentos consegue:

- i. Aumentar a nitidez dos modelos de GPR, reduzindo o ruído de fundo (Algoritmo SVD).
- ii. Aumentar a resolução dos modelos, aumentando a densidade dos perfis (Algoritmo INT-FFT).
- iii. Aumentar a informação dos modelos, combinando os mapas dos dois métodos geofísicos (Algoritmo de FUSÃO-GPR-MAG).

Ao testar os três algoritmos que proporcionam esses resultados aplicados a casos reais surgiu outro resultado que não estava previsto, no entanto, no final desta investigação, considera-se que também merece ser elevado à categoria de objetivo final:



- iv. Aumentar a coerência dos modelos, estabelecendo uma metodologia avançada de análise e filtragem das malhas de dados 2D.

Todos os estudos apresentados nesta tese são complementares, uma vez que os conhecimentos desenvolvidos em cada um deles se articula com os outros, demonstrando que o processamento de dados geofísicos é extremamente versátil (flexível) e deve ser estruturado para se adequar aos objetivos de um determinado problema arqueológico.

Outro aspeto que se teve em conta ao longo da redação da tese é a seleção de exemplos e estudos de casos que foram incorporados, pois considera-se que através deles se ilustra também a capacidade da exploração geofísica no campo arqueológico.

### 7.1. VALORIZAÇÃO DOS ALGORITMOS

**SVD.** Esta metodologia foi motivada pelas dificuldades encontradas para extrair informação do sinal registado num levantamento de GPR realizado no sítio arqueológico de Horta da Torre (Fronteira, Portugal). Constatou-se que os radargramas apresentam uma quantidade elevada de reflexões que não correspondem a estruturas enterradas e que deviam ser consideradas como ruído de fundo, mas não se sabia como consegui-lo através das rotinas de processamento habituais.

Para monitorizar estas reflexões foi criado um modelo laboratorial que possibilitasse o estudo em condições controladas. Num recipiente de acrílico foi colocado solo com materiais do sítio, onde foram introduzidos objetos com localização e geometria bem definidos. Os parâmetros físicos que definem as suas propriedades eletromagnéticas foram determinados experimentalmente e, juntamente com a sua geometria, foram usados para parametrizar o modelo sintético, em ambiente numérico, para posterior cálculo dos radargramas sintéticos.

Depois de várias aproximações de filtragem, optou-se pela técnica de fatorização de Decomposição em Valores Singulares, concluindo que o ruído de um radargrama corresponde à primeira componente principal dos dados transformados. A seleção automática dos dados através do uso de SVD deve ser complementada com a remoção das amplitudes relacionadas com o conteúdo espectral de frequências residuais.

**INT-FFT.** Neste caso, a criação do algoritmo foi motivada para aumentar a nitidez dos modelos GPR-3D adquiridos com uma antena comum. Para tal, a inspiração da abordagem foi baseada nos *arrays* GPR formados por conjuntos de 4 a 16 antenas que fazem o varrimento ao mesmo tempo em cada perfil. Tentou-se densificar os dados através do uso de técnicas de interpolação de traços próximos no domínio da frequência. Os testes realizados permitiram avaliar a eficácia deste algoritmo,

que é capaz de interpolar novos perfis entre cada dois existentes. O resultado traduz-se num aumento da nitidez dos modelos.

No entanto, deve ser referido que a metodologia é eficaz quando os perfis são à partida suficientemente densos, ou seja, devem ser provenientes de uma boa planificação da aquisição porque a técnica não é capaz de gerar informação que não esteja contida nos perfis originais.

**FUSÃO-GPR-MAG.** Na exploração geofísica ocorrem duas situações, que embora muito diferentes, possuem um denominador comum ao nível da informação que o modelo final pode fornecer. A primeira situação ocorre quando é feita a interpretação conjunta dos resultados, em que cada um dos modelos apresenta uma resposta diferente do subsolo; por exemplo, o mapa de anomalias magnéticas é diferente do mapa de anomalias de GPR. Associar estas respostas à mesma estrutura arqueológica é uma tarefa meticulosa que depende da experiência pessoal do geofísico. A segunda situação ocorre quando, na exploração do subsolo, há muito pouco contraste entre as estruturas e o ambiente. É então habitual, e recomendado, incorporar outro método de varrimento que reaja a outro parâmetro físico da matéria.

Seguindo a linha de investigação desta tese, foi proposta uma fusão dos modelos obtidos por métodos de exploração diferentes. A ideia foi criar uma imagem combinada, calculada segundo uma metodologia similar à da fusão de imagens em Medicina para deteção de tumores.

A metodologia de fusão de modelos construída permitiu a obtenção de uma imagem final do subsolo com melhor nitidez e qualidade que os dados originais, concentrando a informação dos dois tipos de anomalias sobre o mesmo corpo que as produz.

Após testar esta nova metodologia em diferentes casos de estudo, os resultados permitem, sem dúvida, considerá-la um valioso contributo para a interpretação de anomalias geofísicas e para a compreensão arqueológica do local.

## 7.2. TRATAMENTO AVANÇADO DE MALHAS DE DADOS 2D

Ao longo desta tese, tornou-se evidente que a obtenção de modelos geofísicos passa por diferentes etapas de processamento. Em primeiro lugar, os dados são processados utilizando fluxos padrão; de seguida os algoritmos SVD e INT-FFT foram incorporados para melhorar o modelo básico.

No GPR, tanto os modelos básicos como os avançados são conjuntos de dados 3D  $(x_i, y_i, z_i, a_i)$ , que localizam para cada ponto do terreno explorado a amplitude da onda eletromagnética refletida. Este conjunto tridimensional de pontos com a informação  $a_i$ , permite gerar uma variedade de imagens para visualizar as estruturas. Destacam-se os cortes horizontais (*depth-time slices*) ou as superfícies

de cobertura (*cover surfaces*), que são imagens 2D  $(x_i, y_i, a_i / z_i)$  com capacidade para mostrar as planimetrias da área de estudo.

Por outro lado, o mapa de anomalias magnéticas é um conjunto 2D  $(x_i, y_i, b_i)$ , que localiza para cada ponto da superfície explorada a anomalia magnética que lhe corresponde e que também tem a mesma capacidade.

**Interpolação.** Ambos os conjuntos têm dados discretos (pontos) que devem ser representados como uma superfície uniforme. Para gerar essas imagens, são construídas malhas densas regulares (2D) onde cada nó é o resultado de uma interpolação dos pontos originais. Nesta tese foi demonstrado como o processo de interpolação espacial é um aspeto crucial na qualidade destas superfícies, propondo a análise geoestatística dos dados originais que permite obter uma função analítica por ajuste teórico do semi-variograma experimental, como forma para otimizar a interpolação.

**Análise espectral e filtragem da malha.** A importância da análise dos dados interpolados foi também salientada na sua forma espectral para avaliar as tendências que apresentam (anisotropia, dependências lineares, gamas de frequência dos valores).

A visualização destes espaços duais é uma garantia para desenhar filtros que podem ser aplicados na malha que eliminam os sinais parasitas, preservando os de interesse arqueológico.

### 7.3. SÍNTESE DA EXPLORAÇÃO GEOFÍSICA NO SÍTIO ARQUEOLÓGICO DA VILLA ROMANA DE PISÕES

O objetivo deste estudo foi o de avaliar a eficácia dos três algoritmos concebidos (SVD, INT-FFT e FUSÃO-GPR-MAG) e a metodologia de tratamento espacial de malhas 2D. Para o efeito, foi escolhido o local de Pisões, que é formado por um solo de manchas de argila húmida e orgânica, suscetível de uma má deteção pelo método de GPR. Além disso, a exploração magnética também se revelou adversa, uma vez que o mapa magnético apresentava anomalias elevadas, distribuídas por toda a área de estudo. Num sítio Romano, os valores elevados são normalmente produzidos por ferros, fornos e restos de estruturas contendo *caementum*. Neste caso, estes sinais atuam como pontos luminosos extremamente brilhantes que mascaram os sinais das estruturas próximas com magnetismo mais fraco (induzido), tornando difícil a sua identificação. Com estas péssimas condições iniciais, foi demonstrado que a aplicação de toda a metodologia desenvolvida nesta tese consegue “extrair informação” do sítio.

Para a interpretação definitiva dos modelos geofísicos é fundamental estabelecer critérios de interpretação baseados em toda a informação disponível (perfis de contraste, bibliografia, informação arqueológica). Mas mesmo assim, há que ter presente que se trata de métodos indiretos de recolha

de dados e que são intrinsecamente limitados por uma determinada resolução. Por isso, nunca poderão atingir um nível de precisão como o proporcionado por uma escavação arqueológica, nem é sua pretensão fazê-lo.

O comentário anterior sugere que qualquer interpretação apresentada deve ser considerada provisória, faltando uma análise posterior com critérios arqueológicos e a validação definitiva por escavação.

Outro fator a ter em conta é que a Geofísica não distingue anomalias devido à sua atribuição cronocultural, pelo que se o local de estudo for polifásico é muito provável que algumas das anomalias interpretadas tenham cronologias diferentes das da ocupação Romana.

#### **7.4. LINHAS DE INVESTIGAÇÃO FUTURAS**

A continuação do trabalho de investigação apresentado nesta tese continua em desenvolvimento, sempre considerando o paradigma de se usar todas as ferramentas numéricas disponíveis para melhorar os resultados dos métodos aplicados.

Destacam-se alguns temas que poderão ter seguimento após a conclusão desta tese:

- O estudo de imagens aéreas para se obter informação sobre a subsuperfície pode ser melhorado através da combinação das técnicas de análise espectral associadas a técnicas de fatorização e de decomposição de dados.
- O uso dos resultados produzidos pelos algoritmos propostos para usar em inversão conjunta para obtenção de modelos da subsuperfície mais próximos da realidade.
- Aplicação dos algoritmos propostos em estudos de pequena escala, para conhecimento de estruturas de pequenas dimensões que possam padecer de patologias estruturais.
- Incorporação de dados obtidos por outros métodos como a Indução Eletromagnética, Tomografia de Resistividade Elétrica e Sísmica nas abordagens concebidas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Qader, I., Krause, V., Abu-Amara, F., & Abudayyeh, O. (2014). Comparative Study of Deconvolution Algorithms for GPR Bridge Deck Imaging. *WSEAS Transactions on Signal Processing*, 10, 20–31.
- Abma, R., & Kabir, N. (2005). Comparisons of interpolation methods. *The Leading Edge*, 24(10), 984–989.
- Alarcão, J. (1988). *Roman Portugal*. 480.
- Ali, F. E., El-Dokany, I. M., Saad, A. A., & Abd El-Samie, F. E. (2010). A curvelet transform approach for the fusion of MR and CT images. *Journal of Modern Optics*, 57(4), 273–286.
- Allred, J. C. (1964). A fluxgate gradiometer for archaeological surveying. *Archaeometry*, 7(1), 14–19.
- Andersen, J. (Centre for W. P.-C. S. of M. (2011). *SUINTERP revision 1.15 - interpolate traces using automatic event picking (Seismic Unix Routine – open source)*.
- Andersson, F., Morimoto, Y., & Wittsten, J. (2015). A variational formulation for interpolation of seismic traces with derivative information. *Inverse Problems*, 31(5).
- Andrews, H. C., & Patterson, C. L. (1976). Singular Value Decompositions And Digital Image Processing. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 24(1), 26–53.
- Annan, A. P. (2001). GPR – Trends, History, and Future Developments. *Proceedings of the EAGE 2001 Conference, Delft, The Neatherlands*, (905), 18.
- Armstrong, M. (1989). *Geostatistics, vol. 1 and 2*.
- Arribas, A., & Arteaga Mamute, O. (1975). El yacimiento fenicio de la desembocadura del rio Guadalhorce, Málaga. *Cuadernos de Prehistoria de La Universidad de Granada, Serie Monográfica*, (2).
- Aspinall, A., & Gaffney, C. F. (2001). The Schlumberger array?potential and pitfalls in archaeological prospection. *Archaeological Prospection*, 8(3), 199–209.
- Aubet Semmler, M. E. (1992). Cerro del Villar., Guadalhorce (Málaga). El asentamiento fenicio y su interacción con el Hinterland. *Investigaciones Arqueológicas En Andalucía: 1985-1992. Proyectos*, 471–480.
- Aubet Semmler, M. E., Carmona, P., Curiá, E., Delgado, A., Fernández, A., & Párraga, M. (1999).

*Cerro del Villar-I. El asentamiento fenicio en la desembocadura del río Guadalhorce y su interacción con el hinterland.*

- Azzola, P., Cardaci, A., Mirabella Roberti, G., & Nannei, V. M. (2019). Uav Photogrammetry for Cultural Heritage Preservation Modeling and Mapping Venetian Walls of Bergamo. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(2/W9), 45–50.
- Bano, M. (1996). Constant dielectric losses of ground-penetrating radar waves. *Geophysical Journal International*, 124(1), 279–288.
- Baranov, V. (1957). A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo-gravimetric anomalies. *Geophysics*, 22(2), 359–382.
- Barnes, A. E. (1996). Theory of 2-D complex seismic trace analysis. *Geophysics*, 61(1), 264–272.
- Barnes, A. E. (2007). A tutorial on complex seismic trace analysis. *Geophysics*, 72(6), W33–W43.
- Becker, H. (2015). Duo- and Quadro-sensor Configuration for High Speed/High Resolution Magnetic Prospecting with Caesium Magnetometer. *Monuments and Sites*, 6(0), 20–25.
- Berkhout, A. J. (2008). Signal Models in Seismic Processing. In *Handbook of Signal Processing in Acoustics* (pp. 1559–1570).
- Biessy, G., Moreau, F., Dauteuil, O., & Bour, O. (2011). Surface deformation of an intraplate area from GPS time series. *Journal of Geodynamics*, 52(1), 24–33.
- Birdal, T. (2019). Sharpness Estimation From Image Gradients. *MATLAB Central File Exchange*.
- Bitri, A., & Grandjean, G. (1998). Frequency-wavenumber modelling and migration of 2D GPR data in moderately heterogeneous dispersive media. *Geophysical Prospecting*, 46(3), 287–301.
- Born, M., & Wolf, E. (1980). *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*.
- Bras, R. L., & Rodriguez-Iturbe, I. (1985). Random functions and hydrology. Adison-Wesley. Reading, Massachusetts.
- Breuer, P., Chmielewski, T., Górski, P., & Konopka, E. (2002). Application of GPS technology to measurements of displacements of high-rise structures due to weak winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(3), 223–230.
- Brown, K., Streit, K., Hoban, L., & Gaddi, R. (2001). 2D Frequency Domain Filtering and the 2D DFT.

- Brown, W., & Crane, R. (1969). Conjugate linear filtering. *IEEE Transactions on Information Theory*, 15(4), 462–465.
- Caldeira, B., & Borges, J. F. (2017). *Relatório de Geofísica Prévio à Construção do Centro de Interpretação e Acolhimento do Sítio Arqueológico da Villa Romana de Pisões*.
- Caldeira, B., Oliveira, R. J., Teixidó, T., Borges, J. F., Henriques, R., Carneiro, A., & Peña, J. A. (2019). Studying the Construction of Floor Mosaics in the Roman Villa of Pisões (Portugal) Using Noninvasive Methods: High-Resolution 3D GPR and Photogrammetry. *Remote Sensing*, 11(16), 1882.
- Canales, L. L. (1984). Random noise reduction. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1984*, 525–527.
- Canny, J. (1986). A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-8(6), 679–698.
- Cardoso, G. (2018). *Villa Romana de Freiria - Estudo arqueológico*.
- Carneiro, A. (2010). Em pars incerta: estruturas e dependências agrícolas nas villae da Lusitânia. *Conimbriga: Revista de Arqueologia*, 49, 225–250.
- Carvalho, J., Alves, D., Borges, J. F., Caldeira, B., Cabral, J., Dias, R., ... Leote, J. (2018). Estudo Geofísico e Geológico da Falha de Vila Franca de Xira. *Gazeta de Física*, 40(3/4), 20–25.
- Chaple, G. N., Daruwala, R. D., & Gofane, M. S. (2015). Comparisons of Robert, Prewitt, Sobel operator based edge detection methods for real time uses on FPGA. *Proceedings - International Conference on Technologies for Sustainable Development, ICTSD 2015*, (1), 1–4.
- Chavez, P. S., Sides, S. C., & Anderson, J. A. (1991). Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data. Landsat TM and SPOT panchromatic. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(3), 295–303.
- Chopra, S., & Marfurt, K. J. (2005). Seismic attributes - A historical perspective. *Geophysics*, 70(5), 3S0-28S0.
- Chrisman, N. R. (1987). Efficient digitizing through the combination of appropriate hardware and software for error detection and editing. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1(3), 265–277.
- Conyers, L. B., & Goodman, D. (1997). *Ground-penetrating radar: an introduction for archaeologists*.
- Costa, M. L. V. (1983). Contribuições para o estudo de alguns dos mosaicos da Villa Romana de

- Pisões. *Arquivo de Beja, 2ª Série*(2), 95–122.
- Costin, H., & Rotariu, C. (2009). Registration of Multimodal Medical Images. *Computer Science Journal of Moldova, 17*(3), 231–254.
- Couto, M. B. S. M. (2007). *Balnevum da villa romana de Pisões* (Universidade Nova de Lisboa).
- Daniels, D. J. (2004). *Ground penetrating radar*.
- Delgado Hervás, A. (2008). Cerro del Villar, de enclave comercial a periferia urbana: dinámicas coloniales en la Bahía de Málaga entre los siglos VIII y VI aC. *Contactes. Índices i Fenicis a La Mediterrània Occidental Entre Els Segles VIII i VI Ane Signes. Barcelona, 69–88*.
- Dossi, M., Forte, E., & Pipan, M. (2015). Application of attribute-based automated picking to GPR and seismic surveys. *GNGTS 2015, Sessione 3.3*, 141–147.
- Du, J., Li, W., Xiao, B., & Nawaz, Q. (2016). Medical image fusion by combining parallel features on multi-scale local extrema scheme. *Knowledge-Based Systems, 113*, 4–12.
- Duijndam, A. J. W., Schonewille, M. A., & Hindriks, C. O. H. (1999). Reconstruction of band-limited signals, irregularly sampled along one spatial direction. *Geophysics, 64*(2), 524–538.
- El-Sayed, M. A., & Hafeez, T. A.-E. (2012). New edge detection technique based on the shannon entropy in gray level images. *ArXiv Preprint ArXiv:1211.2502*.
- Fallis, A. . (1998). Transição de signos: os motivos representados num mosaico da Villa romana de Pisões. *Revista Da Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, 1*(11), 247–255.
- Fialka, O., & Čadík, M. (2006). FFT and convolution performance in image filtering on GPU. *Proceedings of the International Conference on Information Visualisation, (August 2006)*, 609–614.
- Fisher, E., McMechan, G. A., & Annan, A. P. (1992). Acquisition and processing of wide-aperture ground-penetrating radar data. *Geophysics, 57*(3), 495–504.
- Gaffney, C. (2008). Detecting trends in the prediction of the buried past: a review of geophysical techniques in archaeology. *Archaeometry, 50*(2), 313–336.
- Gaffney, C., & Gater, J. (2006). *Revealing the buried past : geophysics for archaeologists*.
- Ganic, E., & Eskicioglu, A. M. (2004). Robust DWT-SVD domain image watermarking: Embedding data in all frequencies. *Proceedings of the Multimedia and Security Workshop 2004, MM and Sec'04*, 166–174.



- Gaudreau-Balderrama, a. (2012). Multi-modal image registration. *Boston University*.
- Gautam, S., & Kumar, M. (2015). An Effective Image Fusion Technique based on Multiresolution Singular Value Decomposition. *INFOCOMP, 14(2)*, 31–43.
- Gonçalves, J. A., & Henriques, R. (2015). UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 104*, 101–111.
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2002). *Digital image processing*.
- Gubbins, D., & Herrero-Berver, E. (2008). Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism. *Geological Magazine, 145(3)*, 1054.
- Hansen, B. C., & Hess, R. F. (2007). Structural sparseness and spatial phase alignment in natural scenes. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision, 24(7)*, 1873–1885.
- Henderson, R. G., & Zietz, I. (1949). The computation of second vertical derivatives of geomagnetic fields. *Geophysics, 14(4)*, 508–516.
- Hengl, T. (2009). A Practical guide to Geostatistical Mapping. In *Scientific and Technical Research series*.
- Herbich, T., & Zych, I. (2015). Archaeological Prospection. *Archaeologia Polona, 53*.
- Hildebrand, J. A., Wiggins, S. M., Driver, J. L., & Waters, M. R. (2007). Rapid seismic reflection imaging at the Clovis period Gault site in central Texas. *Archaeological Prospection, 14(4)*, 245–260.
- Hindriks, K., & Duijndam, A. J. W. (2000). Reconstruction of 3-D seismic signals irregularly sampled along two spatial coordinates. *Geophysics, 65(1)*, 253–263.
- Hirani, A. N., & Totsuka, T. (1996). *Combining Frequency and Spatial Domain Information for Fast Interactive Image Noise Removal*. 269–276.
- Irving, J., & Knight, R. (2006). Numerical modeling of ground-penetrating radar in 2-D using MATLAB. *Computers and Geosciences, 32(9)*, 1247–1258.
- Jackson, J. D. (1962). *Classical electrodynamics*.
- Jar-Ferr Yang, & Lu, C. (1995). Combined Tw techniques of Singular Value Decomposition and Vector Quantization for Image Coding. *IEEE Transactions on Image Processing, 4(8)*, 1141–1146.
- Jensen, J. R. (1986). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective*.
- Jol, H. M. (2009). Ground penetrating radar. *Elsevier, 524*.

- Kamm, J., & Nagy, J. G. (1998). Kronecker product and SVD approximations in image restoration. *Linear Algebra and Its Applications*, 284(1–3), 177–192.
- Kanankege, K. S. T., Alkhamis, M. A., Phelps, N. B. D., & Perez, A. M. (2018). A Probability Co-Kriging Model to Account for Reporting Bias and Recognize Areas at High Risk for Zebra Mussels and Eurasian Watermilfoil Invasions in Minnesota. *Frontiers in Veterinary Science*, 4(January), 1–10.
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An introduction to geophysical exploration*.
- Konstantinides, K., Natarajan, B., & Yovanof, G. S. (1997). Noise estimation and filtering using block-based singular value decomposition. *IEEE Transactions on Image Processing*, 6(3), 479–483.
- Koutsias, N., Karteris, M., & Chuvieco, E. (2000). The use of Intensity-Hue-Saturation transformation of Landsat-5 Thematic Mapper Data for burned land mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(7), 829–839.
- Lange, A. F., & Gilbert, C. (2005). Using GPS for GIS data capture. *Geographical Information Systems*, 467–476.
- Li, H., & Manjunath, B. s. (1994). *Multisensor-Image-Fusion-Using-the-Wavelet-Transform\_1995\_Graphical-Models-and-Image-Processing.pdf* (p. 11). p. 11.
- Li, J., Huang, D., & Yang, P. (2018). Inspection method of images' overlap of UAV photogrammetry based on features matching. *MATEC Web of Conferences*, 173.
- Li, Z., Chai, Y., Guo, M., & Li, H. (2012). Multifocus image fusion scheme based on feature contrast in lifting stationary wavelet domain. *Chongqing Daxue Xuebao/Journal of Chongqing University*, 35(10), 109–116.
- Ligoría, J. P., & Ammon, C. J. (1999). Iterative deconvolution and receiver function estimation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(October), 1395–1400.
- Linford, N. (2006). The application of geophysical methods to archaeological prospection. *Reports on Progress in Physics*, 69(7), 2205–2257.
- Liu, W., Cao, S., Li, G., & He, Y. (2015). Reconstruction of seismic data with missing traces based on local random sampling and curvelet transform. *Journal of Applied Geophysics*, 115, 129–139.
- López-Castro, J. L., Ferjaoui, A., Jerbania, I. Ben, Ferrer Albelda, E., Jendoubi, K., Martínez Hahn Müller, V., ... Esaadi, F. (2015). Proyecto Utica: Excavaciones en la ciudad fenicio-púnica: campañas de 2013 y 2014. *Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, Edt.*

- Secretaría General Técnica, Subdirección General de Documentación y Publicaciones*, (12), 259–280.
- Loulizi, A. (2001). *Development of Ground Penetrating Radar Signal Modeling and Implementation for Transportation Infrastructure* (Virginia Tech Virginia Polytechnic Institute and State University).
- Lu, W., Cheng, S., Yang, H., & Liu, D. (2008). Application of GPS technology to build a mine-subsidence observation station. *Journal of China University of Mining and Technology*, 18(3), 377–380.
- Maciel, M. J. (2006). *Vitrúvio, Tratado de Arquitectura, Tradução, Introdução e Notas*.
- Mackay, D. J. C. (2005). *Information Theory, Inference And Learning Algorithms*.
- Mallat, S. G. (1989). A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11(7), 674–693.
- Matheron, G., & Armstrong, M. (2012). *Geostatistical case studies* (Vol. 2).
- Meng, X., Dodson, A. H., & Roberts, G. W. (2007). Detecting bridge dynamics with GPS and triaxial accelerometers. *Engineering Structures*, 29(11), 3178–3184.
- Metwaly, M., Green, A. G., Horstmeyer, H., Maurer, H., Abbas, A. M., & Gh. Hassaneen, A.-R. (2005). Combined seismic tomographic and ultrashallow seismic reflection study of an Early Dynastic mastaba, Saqqara, Egypt. *Archaeological Prospection*, 12(4), 245–256.
- Mitianoudis, N., & Stathaki, T. (2007). Pixel-based and region-based image fusion schemes using ICA bases. *Information Fusion*, 8(2 SPEC. ISS.), 131–142.
- Mittal, A., Moorthy, A. K., & Bovik, A. C. (2011). Blind/referenceless image spatial quality evaluator. *2011 Conference Record of the Forty Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*, 723–727.
- Mittal, A., Moorthy, A. K., & Bovik, A. C. (2012). No-reference image quality assessment in the spatial domain. *IEEE Transactions on Image Processing*, 21(12), 4695–4708.
- Mittal, N., & Gupta, D. R. (2015). *Fusion of MRI & CT Medical Images with different Wavelet Transforms using Wavelet Method*. 2(3), 15–21.
- Moonen, M., Van Dooren, P., & Vandewalle, J. (1992). A singular value decomposition updating algorithm for subspace tracking. *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, 13(4), 1015–1038.
- Naghizadeh, M., & Sacchi, M. D. (2007). Multistep autoregressive reconstruction of seismic records.

- Geophysics*, 72(6), V111.
- Naghizadeh, M., & Sacchi, M. D. (2009). f-x adaptive seismic-trace interpolation. *Geophysics*, 74(1), V9–V16.
- Naidu, V. P. S. (2011). Image fusion technique using multi-resolution singular value decomposition. *Defence Science Journal*, 61(5), 479–484.
- Naidu, V. P. S., & Raol, J. R. (2008). Pixel-level image fusion using wavelets and principal component analysis. *Defence Science Journal*, 58(3), 338–352.
- Neubauer, W. (2001). Magnetische Prospektion in der Archäologie. In ISBN 3-7001-3009-0.
- Neves, F. A., Miller, J. A., & Roulston, M. S. (1996). Source Signature Deconvolution of Ground Penetrating Radar - Technische Informationsbibliothek (TIB). *GPR -Proceedings*, 573–578.
- Nikolaidis, N., & Pitas, I. (2000). *3-D image processing algorithms*.
- Nobes, D. C. (1999). Geophysical surveys of burial sites: A case study of the Oaro urupa. *Geophysics*, 64(2), 357–367.
- Oliveira, R. J., Caldeira, B., & Borges, J. F. (2014). Sismo de Áquila (2009): influência do modelo de fonte sísmica e da estrutura para a simulação de movimentos sísmicos intensos. *Comunicações Geológicas*, 101(1), 371–374.
- Oliveira, R. J., Caldeira, B., Teixidó, T., & Borges, J. F. (2016a). Influência da função temporal da fonte no processo de desconvolução de radargramas. *Comunicações Geológicas*, 103(1), 149–154.
- Oliveira, R. J., Caldeira, B., Teixidó, T., & Borges, J. F. (2016b). Influência da função temporal da fonte no processo de desconvolução de radargramas Influence of the source temporal function in the radargram deconvolution process. *Comunicações Geológicas*, 103(1), 149–154.
- Oliveira, R. J., Caldeira, B., Teixidó, T., & Borges, J. F. (2016c). Modelação e comparação de perfis GPR no desenvolvimento de metodologias eficazes de Prospeção Geofísica em Arqueologia. *Geonovas*, 29, 125–133.
- 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.
- Pajares, G., & de la Cruz, J. M. (2004). A wavelet-based image fusion tutorial. *Pattern Recognition*, 37(9), 1855–1872.
- Paul, S., Sevcenco, I. S., & Agathoklis, P. (2016). Multi-exposure and multi-focus image fusion in

- gradient domain. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 25(10), 2–3.
- Peña, J. A., & Teixidó, T. (2011). Prospección geofísica en la Zona Norte del Yacimiento de Utica (Túnez). *Ref. AGA-127, Informe Interno. Área de Geofísica Aplicada, Instituto Andaluz de Geofísica, Universidad de Granada*.
- Peña, J. A., & Teixidó, T. (2013). Cover Surfaces As a New Technique for 3D Gpr Image Enhancement. *Archaeological Applications. RNM104 - Informes. Universidad de Granada - Instituto Andaluz de Geofísica*, 1–10.
- 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., & Soares, R. (2013). Os mausoléus da villa romana de Pisões: a morte no mundo rural romano. *Revista Portuguesa de Arqueologia*, 16, 303–321.
- Pérez, M., Agüera, F., & Carvajal, F. (2013). Low Cost Surveying Using an Unmanned Aerial Vehicle. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-1/W2*(September), 311–315.
- Phillips, C. L., Parr, J. M., & Riskin, E. A. (Eve A. (2008). *Signals, systems, and transforms*.
- Pu, T. (2000). Contrast-based image fusion using the discrete wavelet transform. *Optical Engineering*, 39(8), 2075.
- Ralph, E. K. (1964). Comparison of a proton and a rubidium magnetometer for archaeological prospecting. *Archaeometry*, 7(1), 20–27.
- Reis, M. P. (2004). Las termas y balnea romanos de Lusitania. In *MNAR*.
- Ribeiro, F. N. (1972). *A Villa Romana de Pisões*.
- Ripley, B. D. (2005). *Spatial statistics* (Vol. 575).
- Rohani, M., Gingras, D., & Gruyer, D. (2014). Dynamic base station DGPS for cooperative vehicle localization. *2014 International Conference on Connected Vehicles and Expo, ICCVE 2014 - Proceedings*, 781–785.
- Russ, J. C. (1998). Image Processing Toolbox User's Guide. In *CRC Press* (2nd ed.).
- Russell, B., & Ribordy, C. (2014). *New edge detection methods for seismic interpretation*. 26(2002).
- Sacchi, M. D., & Kuehl, H. (2000). FX ARMA filters. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2000*, 2092–2095.

- Sacchi, M. D., & Ulrych, T. J. (1995). High-resolution velocity gathers and offset space reconstruction. *Geophysics*, 60(4), 1169–1177.
- Sadek, R. A. (2008). Blind synthesis attack on SVD based watermarking techniques. *2008 International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control and Automation, CIMCA 2008*, 140–145.
- Sadek, R. A. (2012). *SVD Based Image Processing Applications : State of The Art , Contributions and Research Challenges*. 3(7), 26–34.
- Sadhasivam, S. K., Keerthivasan, M. B., & Muttan, S. (2011). Implementation of max principle with PCA in image fusion for surveillance and navigation application. *Electronic Letters on Computer Vision and Image Analysis*, 10(1), 1–10.
- Sasikala, M., & Kumaravel, N. (2007). A comparative analysis of feature based image fusion methods. *Information Technology Journal*, Vol. 6, pp. 1224–1230.
- Scollar, I., Weidner, B., & Segeth, K. (1986). Display of archaeological magnetic data. *GEOPHYSICS*, 51(3), 623–633.
- Serra, M. (2007). *Novos dados para o conhecimento da Villa romana de Pisões ( Beja )*. (Cmp 520), 503–507.
- Shaikh, S., Choudhry, A., & Wadhvani, R. (2016). Analysis of Digital Image Filters in Frequency Domain. *International Journal of Computer Applications*, 140(6), 12–19.
- Shaw, D. M., & Atkinson, S. F. (1990). An Introduction to the Use of Geographic Information Systems for Ornithological Research. *The Condor*, 92(3), 564.
- Smith, P., Reid, D. B., Environment, C., Palo, L., Alto, P., & Smith, P. L. (1979). *Otsu, A threshold selection method*, 1979. 20(1), 62–66.
- Soares, S. (2012). *Contribuição para o Conhecimento das Características Geotécnicas dos Gabros de Beja, Faixa entre Beringel e Beja*.
- Soubaras, R. (1994). Signal-preserving random noise attenuation by the f-x projection. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1994*, 1576–1579.
- Spector, A., & Grant, F. S. (1985). Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 50(11), 1951–1960.
- Spitz, S. (1991). Seismic trace interpolation in the F-X domain. *Geophysics*, 56(6), 785–794.
- Stefanik, K., Gassaway, J., Kochersberger, K., & Abbott, A. (2011). UAV-based stereo vision for rapid aerial terrain mapping. *GIScience and Remote Sensing*, 48(1), 24–49.

- Suárez, J., & Peral, C. (2019). Nuevas investigaciones en el yacimiento fenicio del Cerro del Villar: de los estudios geofísicos al Proyecto TSUNIBER 2018-2020. *Fenicios Entre Oriente y Occidente: El Yacimiento Del Cerro de Villar*.
- Taner, M. T., Koehler, F., & Sheriff, R. E. (1979). Complex seismic trace analysis. *Geophysics*, 44(6), 1041–1063.
- Tao, Q., & Veldhuis, R. (2009). Threshold-optimized decision-level fusion and its application to biometrics. *Pattern Recognition*, 42(5), 823–836.
- Teixidó, T., & Peña, J. A. (2009). Detección de la potencia de sedimentos en las salas de la Mina y de la Torca. Cueva de Nerja (Málaga, España). *Documento Interno Do Instituto Andaluz de Geofísica (UGR). Ref. AGA-73*.
- Teixidó, T., & Peña, J. A. (2010a). Prospección Georradar en la Villa Romana de Fuente Álamo, Puente Genil (Córdoba, Espanha). *Ref. AGA-079, Informe Interno. Área de Geofísica Aplicada, Instituto Andaluz de Geofísica, Universidad de Granada*.
- Teixidó, T., & Peña, J. A. (2010b). Prospección magnética en la parcela 158 del Polígono Industrial de Vera (Almería, Espanha). *Ref. AGA-121, Informe Interno. Área de Geofísica Aplicada, Instituto Andaluz de Geofísica, Universidad de Granada*.
- Teixidó, T., & Peña, J. A. (2018). Servicio para documentación del Yacimiento Fenicio de Cerro del Villar con métodos geofísicos. Ayuntamiento de Málaga. Gerencia Municipal de Urbanismo y Obras Públicas. *Ref. AGA-215, Informe Interno. Área de Geofísica Aplicada, Instituto Andaluz de Geofísica, Universidad de Granada*.
- Teixidó, T., Peña, J. A., & Carmona, E. (2010). *Prospección geofísica en el Yacimiento Romano del Guijo, Córdoba (España)*.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Scheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics, second edition*.
- Trad, D., Ulrych, T., & Sacchi, M. (2003). Latest views of the sparse Radon transform. *Geophysics*, 68(1), 386–399.
- Trorey, A. W. (1977). Diffractions for arbitrary source-receiver locations. *Geophysics*, 42(6), 1177–1182.
- Tzanis, A. (2010). matGPR Release 2: A freeware MATLAB® package for the analysis & interpretation of common and single offset GPR data. *FastTimes*, 15(1), 17–43.
- Udhaya Suriya, T. S., & Rangarajan, P. (2017). Brain tumour detection using discrete wavelet transform based medical image fusion. *Biomedical Research (India)*, 28(2), 684–688.

- Vickers, R. S., & Dolphin, L. T. (1975). A Communication on archaeological radar experiment at Chaco Canyon, New Mexico. *MASCA Newsletter*. *MASCA Newsletter (Museum Applied Science Center for Archaeology)*, 11(1), 6–8.
- Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. P. (2004). Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(4).
- Wang, Zhijun, Ziou, D., Armenakis, C., Li, D., & Li, Q. (2005). A comparative analysis of image fusion methods. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 43(6), 1391–1402.
- Wells, D., Wells, D., Beck, N., Kleusberg, A., Krakiwsky, E. J., Lachapelle, G., ... Vanicek, P. (1987). Guide to GPS Positioning. *Canadian GPS Assoc.*
- Wiggin, E. (2001). *Elementary digital filtering*.
- Xu, S., Zhang, Y., & Lambaré, G. (2010). Antileakage Fourier transform for seismic data regularization in higher dimensions. *Geophysics*, 75(6), WB113–WB120.
- Xu, S., Zhang, Y., Pham, D., & Lambaré, G. (2005). Antileakage Fourier transform for seismic data regularization. *Geophysics*, 70(4), V87–V95.
- Xu, Xiaojun, Wang, Y., & Chen, S. (2016). Medical image fusion using discrete fractional wavelet transform. *Biomedical Signal Processing and Control*.
- Xu, Xiaowei, Dexter, S. D., & Eskicioglu, A. M. (2004). A hybrid scheme for encryption and watermarking. *Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents VI*, 5306, 725.
- Yang, Y., Huang, S., Gao, J., & Qian, Z. (2014). Multi-focus image fusion using an effective discrete wavelet transform based algorithm. *Measurement Science Review*, 14(2), 102–108.
- Yilmaz, Ö. (2001). *Seismic Data Analysis*.
- Zhu, X., Xu, Q., Zhou, J., & Deng, M. (2012). Remote Landslide Observation System with Differential GPS. *Procedia Earth and Planetary Science*, 5(2011), 70–75.
- Zwartjes, P. M., & Sacchi, M. D. (2007). Fourier reconstruction of nonuniformly sampled, aliased seismic data. *Geophysics*, 72(1), V21–V32.








## ANEXO A1: ARTIGO CIENTÍFICO PUBLICADO



Article

## Studying the Construction of Floor Mosaics in the Roman Villa of Pisões (Portugal) Using Noninvasive Methods: High-Resolution 3D GPR and Photogrammetry

Bento Caldeira <sup>1,\*</sup>, Rui Jorge Oliveira <sup>2</sup>, Teresa Teixidó <sup>3</sup>, José Fernando Borges <sup>1</sup>, Renato Henriques <sup>4</sup>, André Carneiro <sup>5</sup> and José Antonio Peña <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Earth Sciences/Physics Department, University of Évora, Rua Romão Ramalho, 59, 7002-554 Évora, Portugal

<sup>2</sup> Institute of Earth Sciences, University of Évora, Rua Romão Ramalho, 59, 7002-554 Évora, Portugal

<sup>3</sup> Andalusian Institute of Geophysics, University of Granada, Campus Universitario de Cartuja, 18071 Granada, Spain

<sup>4</sup> Institute of Earth Sciences, University of Minho, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal

<sup>5</sup> Centre for Art History and Artistic Research/History and Archaeology Department, University of Évora, Largo dos Colegiais, 2, 7000-803 Évora, Portugal

\* Correspondence: bafcc@uevora.pt

Received: 29 June 2019; Accepted: 9 August 2019; Published: 12 August 2019





Article

# Studying the Construction of Floor Mosaics in the Roman Villa of Pisões (Portugal) Using Noninvasive Methods: High-Resolution 3D GPR and Photogrammetry

Bento Caldeira <sup>1,\*</sup> , Rui Jorge Oliveira <sup>2</sup> , Teresa Teixidó <sup>3</sup> , José Fernando Borges <sup>1</sup> , Renato Henriques <sup>4</sup> , André Carneiro <sup>5</sup> and José Antonio Peña <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Earth Sciences/Physics Department, University of Évora, Rua Romão Ramalho, 59, 7002-554 Évora, Portugal

<sup>2</sup> Institute of Earth Sciences, University of Évora, Rua Romão Ramalho, 59, 7002-554 Évora, Portugal

<sup>3</sup> Andalusian Institute of Geophysics, University of Granada, Campus Universitario de Cartuja, 18071 Granada, Spain

<sup>4</sup> Institute of Earth Sciences, University of Minho, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal

<sup>5</sup> Centre for Art History and Artistic Research/History and Archaeology Department, University of Évora, Largo dos Colegiais, 2, 7000-803 Évora, Portugal

\* Correspondence: bafcc@uevora.pt

Received: 29 June 2019; Accepted: 9 August 2019; Published: 12 August 2019



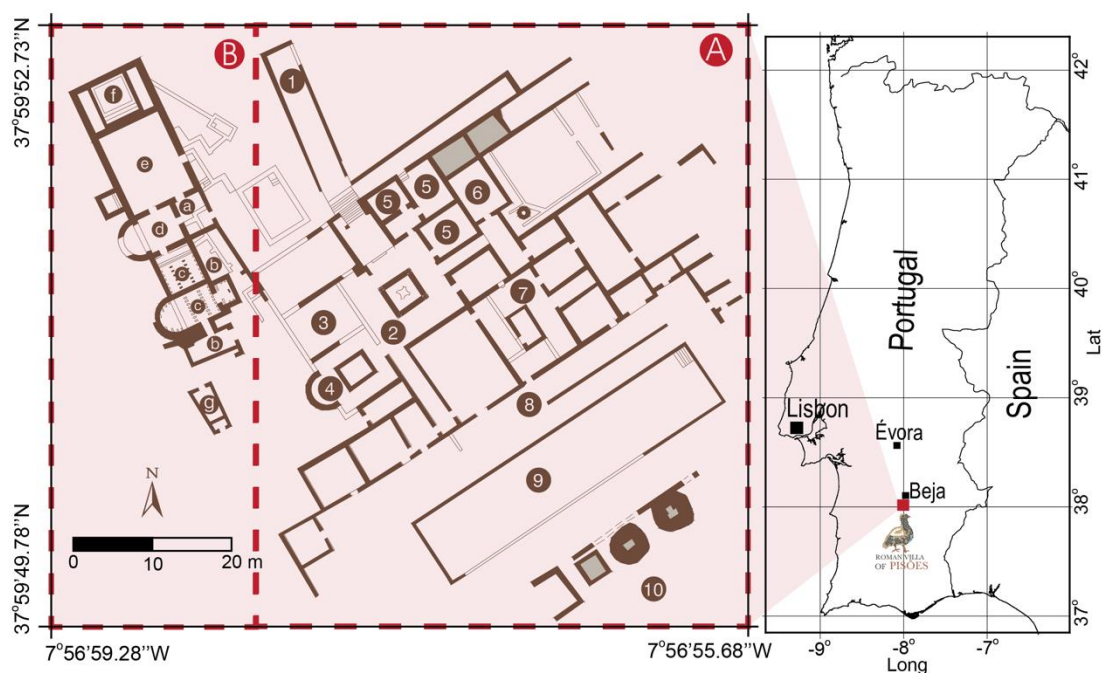
**Abstract:** Over the past decade, high-resolution noninvasive sensors have been widely used in explorations of the first few meters underground at archaeological sites. However, remote sensing actions aimed at the study of structural elements that require a very high resolution are rare. In this study, layer characterization of the floor mosaic substrate of the Pisões Roman archaeological site was carried out. This work was performed with two noninvasive techniques: 3D ground penetrating radar (3D GPR) operating with a 1.6 GHz central frequency antenna, which is a very high-resolution geophysical method, and photogrammetry with imagery obtained by an unmanned aerial vehicle (UAV), which is a very high-resolution optical method. The first method allows penetration up to 30–40 cm depth and 3D models can be obtained, and with the second method, very high detail surface images and digital surface models can be obtained. In this study, we analyze a combination of data from both sensors to study a portion of the floor mosaic of the Pisões Roman Villa (Beja, Portugal) to obtain evidence of the inner structure. In this context, we have detected the main structural levels of the Roman mosaic and some internal characteristics, such as etched guides, internal cracking, and detection of higher humidity areas. The methodology that we introduce in this work can be referenced for the documentation of ancient pavements and may be used prior to carrying out preservation activities. Additionally, we intend to show that a Roman mosaic, understood as an archaeological structure, does not consist of only beautiful superficial drawings defined by the tesserae, but these mosaics are much more complex elements that must be considered in their entirety for preservation.

**Keywords:** subsurface detection; GPR and photogrammetry UAV; Roman mosaic structure; noninvasive archaeological inspection

## 1. Introduction

The Roman Villa of Pisões (Figure 1) is located 10 km south of Beja (Portugal). This villa was discovered accidentally in 1967 and is considered by the academic and scientific community to be a heritage site of the greatest cultural relevance and was classified as a property of public interest in

1970. The excavations made during the 1970s revealed a *pars urbana* (residential house) of a singular monument of the Roman province of Lusitania composed of more than 40 divisions, distributed around a small peristyle in the tradition of the Italian atrium, which is gathered around the four-columnnaded space (Figure 1). The south facing, large porticoes with columns open to face a large water mirror with a length of 40 m, one of the largest of this type in private residences throughout the Iberian Peninsula [1]. The architectural design and type of structures [2], refinement of the decoration, especially the great quality of the floor covering materials, mosaics and marbles [3,4], bring to mind a luxurious residence with proven occupation between the 1st and 6th centuries A.D. [1]. In addition to the residence, the thermal baths are considered to be the most relevant examples of private baths [5], which are remarkably well-preserved in some compartments, with an entire heating system that allowed the circulation of hot air between double walls and under the pavements of the rooms. This complex system of brick arched roof, known as hypocaust, is exceptionally well preserved [6].



**Figure 1.** Localization of the Roman Villa of Pisões in Portugal map, and the plan view of the *pars urbana* with the (A) residential area and (B) thermal baths. 1. North entrance corridor, where the studied mosaics are located; 2. columned atrium; 3. reception room (*tablinium*); 4. dining room (*triclinium*); 5. bedrooms; 6. larder and kitchen; 7. former atrium with square basin for rainwater (*implivium*); 8. south porticoe; 9. swimming pool (*natatio*); and 10. mausoleums. In the baths: a. Dressing room (*apodyterium*); b. furnace (*prae-furnium*); c. hot water room (*caldarium*); d. warm room (*tepidarium*); e. cooling room (*frigidarium*); f. swimming pool (*natatio*); and g. latrines.

Despite the relevance attributed to this villa, the *pars rustica* and *pars fructuaria* remain underground and undiscovered. The knowledge about the excavated areas remains poor due the scarcity of documentation resulting from the excavations made at that time, a lack of stratigraphic sequences, and the absence of other studies performed thereafter.

In 2017, the University of Évora assumed the tutelage of the villa with the commitment to promote multidisciplinary scientific research to study, preserve, value, and disseminate that heritage [7]. Thus, the investigation returned to Pisões, and the ongoing work aims to conduct a multidisciplinary research approach based on two essential pillars: a) Analysis and interpretation of structures and artifacts already known and b) research of underground structures. Due to the fact that the preservation aspect guides the dynamics of this plan, all activities are defined to develop, refine, and apply research

methodologies that minimize impacts, rigorously reproduce the geometric and functional memory of the structures, and ensure the scrupulous preservation of all data collected throughout the whole site.

Archaeological geophysics are noninvasive survey techniques that are sometimes used for the analysis of architectural elements and artifacts of the Roman villae [8,9], but in the Roman villae located in Lusitania, these methodologies have rarely been used. The study of Roman material culture found in archaeological excavations still mostly relies on typological and comparative approaches. However, in recent years, the approaches in this field have changed with the introduction of archaeometric and geophysical analyses to promote the inspection of structures prior to interventions of excavation or conservation, e.g., [10,11], and to contribute to a better understanding of the site and works of the people who lived in that villa.

Unmanned aerial photogrammetric survey is a technique widely used in the study and documentation of Roman mosaics [12–14], but to date, there are few bibliographic examples that employ geophysical methods to inspect Roman mosaics. Most of these works use the ground penetrating radar method (GPR) as the better technique to obtain detailed information on these structures. That said, all of them focus their studies on evaluating the degree of conservation and the humidity concentration through the amplitude reflection analysis in 2D-GPR profiles [15,16] or consider horizontal slices of 40 cm thickness in 3D-GPR sets to detect anomalies within a wall covered by mosaic [17]. In this context, the present study is the first where a Roman mosaic is investigated to know how it has been constructed and what its internal stratigraphy is. Effectively, the analysis of man-made materials such as stones, bricks, mortars, marble, and mosaics can provide significant clues to resolve archaeological issues, shedding light on topics related to the raw material provenance and their structural characterizations, thus deepening our knowledge of the technology used by the Romanized population that lived at Pisões.

Since the discovery of Pisões, one of the more relevant issues associated with it is the abundance of leisure elements and the quality of the covering materials, especially the collection of floor mosaics. In an interview with “Diário de Notícias” (national newspaper) on February 21, 1967, which was a few days after the discovery, the archaeologist stated, “In the soil observed so far, we have found two species of mosaics, one of *opus signinum* and the other with geometric designs in white, dark blue and red ...”.

Later, the excavations uncovered mosaics with figures of nature and geometrics drawings in approximately 40 division floors of the urban pars. This collection of mosaics is notable, both for its eclectic nature and richness of iconology, presenting geometric and naturalistic compositions, and for the quality of its execution, from the oldest monochromaticity to the most recent polychromaticity [6,18].

In this paper, the constituting layers characterization of the floor mosaic substrate from the Roman archaeological site of Pisões was carried out. The work, completed using noninvasive geophysical and photogrammetric methods, allowed us to obtain evidence of the construction process, which is adequate as a model for the documentation of ancient pavements and can be used prior to conservation actions. Additionally, we intend to show that a Roman mosaic, understood as an archaeological structure, does not consist of only beautiful superficial drawings defined by the tesserae, but is a much more complex element that must be considered in its entirety.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Manufacturing Processes of the Roman Floor

The term mosaic is associated with the presence of a tesserae and represents the result of a mixing of arts and techniques from different parts of the Roman Empire, and mosaics are used as decorative elements in many environments [19]. The different aspects related to artistic styles or historical cultural issues represented on the surface of the mosaics is widely documented. However, when we look for the invisible structure that demonstrates how the substrate of the well-studied mosaics was formed, the information is scarce or absent. Concerning this question, practically all works cite the treatise of

Architecture of Vitruvius, *De Architectura*, written in the 1st century B.C. and translated into nearly all languages [20]; the author documents the techniques used for the preparation of mosaic pavements, highlights the impermeability issue of the mosaic in terms of functionality, and supplies the ideal method to ensure impermeability. Summarizing Vitruvius's rules, the floor mosaic foundation should be manufactured with the following stratigraphy (Figure 2):

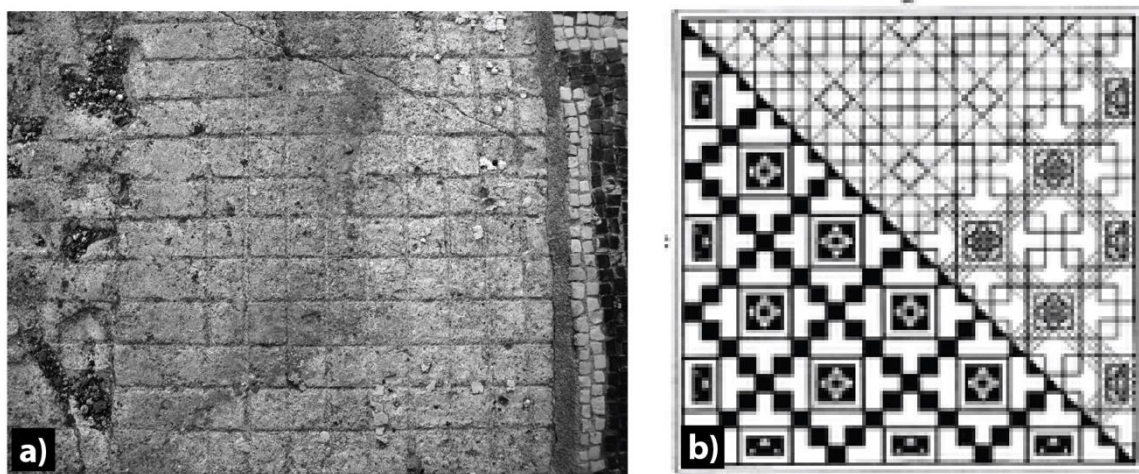
- (1) The first layer, called *statumen*, is made of stones approximately 12 cm thick “each of which is not less than a handful”, laid vertically on the ground, without mortar between the stones, which gives stability to the pavement and favors the flow of infiltrated waters.
- (2) The second layer, called *rudus*, is spread over the *statumen* and consists of a mortar of sand and gravel (three quarters) mixed with lime (a fourth part). This layer is rammed by means of wooden stamps until a unified level is formed, which is then left to dry. The thickness of this layer is at least 22 cm.
- (3) The third layer, called the *nucleus*, is a ceramic mortar that is 11–15 cm thick, made of powdered pottery and lime in proportions of three to one, respectively, and this mortar is spread over the *rudus* and allowed to dry. This layer is the hardest and most impermeable of the three layers. The purpose of this layer was to allow drainage of surface waters.
- (4) On top of the *nucleus*, a bedding layer of mortar very rich in lime is thinly applied in small sections over the *nucleus*. This thin layer is applied according to the forecast of the working day and fresh enough to mark the reference points of the drawing (*sinopia*) or geometric or figurative design. *Tesserae* are inserted in this layer before the mortar dries.



**Figure 2.** Stratigraphy of a Roman mosaic floor according to Vitruvius's description. The scheme is adapted from the Getty Conservation Institute and the Israel Antiquities Authorities and shows a fragment of the studied mosaic. 1. *Statumen*—First preparatory layer of large stones; 2. *Rudus*—mortar layer of gravel to level the floor; 3. *Nucleus*—impermeable mortar layer of powdered pottery and lime to protect the mosaic surface from the soil water (humidity); 4. *Bedding*—thin mortar layer, rich in lime, applied fresh in small regular portions where the mosaic designs were marked, and the *tesserae* were inserted before the mortar dried; and 5. *Tessellatum*—surface of the mosaic composed of *tesserae* and mortar with the bedding composition filling the interstices between *tesserae*.

As the placement of tesserae demanded a fresh lime bedding mortar, it was necessary to plan the dimension of the bedding mortar panels as a function of the capacity to fix the tesserae during the drying time. Thus, each panel represents a work planning unit, and in some mosaics, the boundary between these panels can be observed.

The tesserae were placed according to previously defined patterns, figurative or geometric, and were drawn through incisions in the bedding mortar; some of the imprints were captured under some mosaics (Figure 3a). These geometrically etched guides, called *sinopia*, were made with simple instruments that formed part of the common masonry tools: Rulers, calipers, compasses, nails, and ropes. Once the general pattern was established (Figure 3b), the specific drawings were painted with chalk or charcoal, whereas for the repetitive motifs that formed part of the decoration of borders and edges, templates could be used.



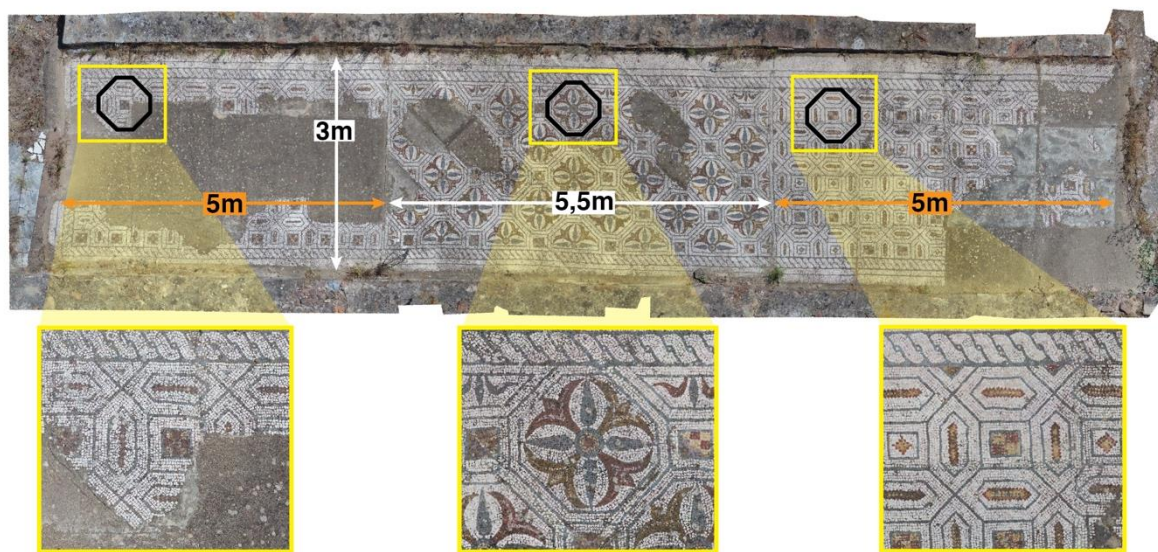
**Figure 3.** (a) View of the *sinopia* of a mosaic belonging to the domus of [21], from Pompeii. (b) Scheme of mosaic construction based on the *sinopia*, from [22].

According to [23], the pavements examined in past and modern archaeological excavations do not necessarily display the stratigraphy described in the ancient treatise of Vitruvius or others, as in [24]. Frequently, the thickness and the nature of their constituent materials vary among sites or even within the same building among pavements, which justifies investigations accounting for the whole structure of the pavement.

## 2.2. Surface Analysis of the Studied Mosaic

The studied mosaic is dated from the early 3rd century A.D. [3]. The mosaic covers the northern corridor of 15.5 m × 3.0 m, which provides access to the *pars urbana* (Figure 1). This floor was repaired during the last conservation intervention, which was carried out by the University of Évora [7], and this intervention consisted of vegetal species removal and surface cleaning with water and biocide application by means of nylon brooms.

The mosaic is formed by a decorative geometric composition of large octagons (Figure 4), outlined with a black filet over a white background. Three distinctive geometric compositions fill the inner octagons. At the ends of the corridor, there are defined panels (5 m in length each) formed by colored squares and diamonds on the same white background, and this pattern is repeated in all octagons; in the central zone (5.5 m), the octagons are filled with rosettes that are the same colors as the ends panels, creating a beautiful decorative effect. The composition is completely enveloped by a simple guilloche border produced with a double row of gray tesserae over the same white background [18]. The same constituent elements and forms are found in the two mosaic fragments of Merida [25], which leads to the assumption that the same model was used for the mosaics at both sites.



**Figure 4.** Photogrammetric orthomosaic of the entire studied roman mosaic (top), where the large octagons that define the geometry of the background pattern are shown. The bottom panels show a zoom in of the geometric compositions that fill the inner three sections of the mosaic.

### 2.3. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery Acquisition and Processing

As a first product of the noninvasive analysis, a UAV was used to survey all of the Roman Villa of Pisões exposed area. The orthophoto and digital surface model (DSM) generated were used to map the area and provide a reference for further excavation, management, and monitoring works. A DJI Phantom 4 Pro UAV was used to acquire RGB imagery and Agisoft Photoscan was used for processing. Geodesic accuracy of the final products was possible by using five ground control points (GCP's). Four of these ground control points were temporary ones, placed in the corners of the surveyed area, and built on big screens with a pattern and a cross to be easily seen in the UAV imagery. Another GCP was collected approximately in the middle of the area, using a point in the mosaic pattern easily seen in the photos. The methodology used for this first task is the one detailed in [26]. The GCP's were collected using a Spectra Precision Epoch 50 GNSS receiver configured with base and rover antennas. Acquisition was made using post-processing kinematic (PKK), with further coordinate correction made with data from the fixed station of Beja, which belongs to the ReNEP network (GNSS National Network of Permanent Stations), which is the Portuguese service for geolocation based in fixed stations. High resolution images of these products, in jpeg format, can be downloaded from [http://www.dct.uminho.pt/pisoos/ORTHO\\_HD\\_PISOES\\_GENERAL.zip](http://www.dct.uminho.pt/pisoos/ORTHO_HD_PISOES_GENERAL.zip) (orthomosaic) and [http://www.dct.uminho.pt/pisoos/DSM\\_PISOES\\_GENERAL.zip](http://www.dct.uminho.pt/pisoos/DSM_PISOES_GENERAL.zip) (DSM).

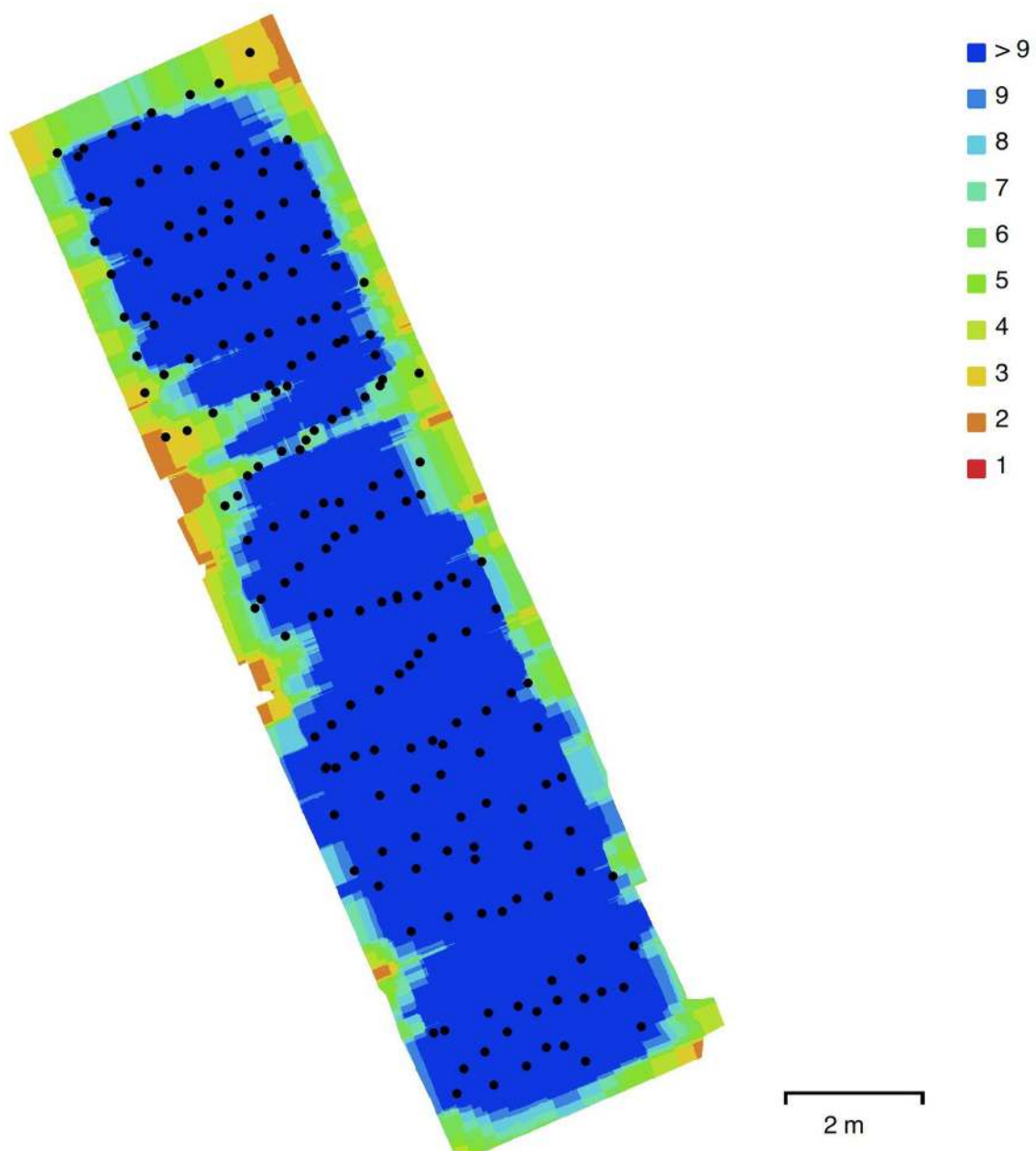
To detail the survey of the mosaic area that was studied, close-range photogrammetry was used, and a high-resolution orthophoto image and DSM were obtained for the mosaic surface.

The imagery data and final georeferenced products were also obtained by using a UAV and photogrammetric processing. The UAV used in this study (DJI Phantom 4 Pro) was equipped with a 20 megapixel camera, a 1 inch sensor, and a mechanical shutter. The camera was stabilized with a 3 axis gimbal. To capture the aerial data, two individual flights at low altitudes (~1.5 m) were conducted using manual control because there is no automatic flight control software that can be used at such low altitudes. The application DJI Go 4 was used to configure the UAV and to monitor and control the flight. This UAV had an obstacle avoidance system, which the manufacturer calls "Vision System". This system is based on three optical sensors (to frontward, backward, and downward obstacle avoidance), an ultrasonic sensor (as a redundancy to downward obstacle avoidance), and two infra-red sensors for leftward and rightward obstacle avoidance. The downward obstacle avoidance sensors were configured to 1.5 m distance to automatically avoid the UAV to get below that height.



Phantom 4 Pro can use the Vision System to accurately hover over a point with a vertical precision of  $\pm 0.1$  m and a horizontal precision of  $\pm 0.3$  m, according to the manufacturer. This position system was based on image analysis of the features below the UAV, obtained with the pair of small cameras that are also used for obstacle avoidance. This system was automatically used when both radio control sticks were put in the middle position. The UAV was then maneuvered very carefully with small shifts along the X axis, taking pictures when the UAV was completely still, until a complete stripe over the mosaic was completed. After a small shift along the Y axis was made and small shifts along X axis were again performed, pictures were taken. This time-consuming procedure ensured that all obtained pictures had enough overlap, both in X and Y axis, to be able to produce an orthomosaic and a DSM.

In total, 191 pictures were taken, covering  $69.9 \text{ m}^2$  of area. A battery exchange was necessary to complete all the surveyed area using this technique. Figure 5 shows the position of each camera as well as the amount of overlap obtained.



**Figure 5.** Camera locations (black dots) and image overlap. Colors represent the number of photos where each point appears.

The use of the UAV was chosen as opposed to a manual handheld camera because it allowed us to make a high-resolution orthomosaic of the whole mosaic extension without walking on it unnecessarily, and it was more practical to obtain perfectly vertical pictures from an elevated standpoint without too many shadows or obstructions, such as the photographer's own feet.

To perform the data processing, the first step was the photo alignment. The highest accuracy was used as well as the generic preselection and reference preselection parameters. In the advanced parameters, the key point limit was set to 60,000 and the tie point limit was set to 4000. Masks were used to exclude areas in the images where the UAV's shadow was present. Adaptive camera model fitting was also used. After this step, points with a reprojection error bigger than 0.50 were excluded from the sparse point cloud. In total 4305 points were excluded and 102,222 were maintained. After this step, a dense cloud with medium quality and a mesh was built, only to help in the placement of GCP's because they were, this way, placed automatically in each photo. To ensure the geometrical accuracy and georeferencing of the photogrammetry products, ten GCP's, which were mostly distinguishable features of the mosaic pattern, were used in the processing chain. The positions of these GCP's relative to the surveyed area are illustrated in Figure 6. The measurement of GCP coordinates was performed using a differential Spectra Precision Epoch 50 GNSS system. The average easting, northing, and altitude errors of the collected coordinates were 0.001 m, 0.002 m, and 0.010 m respectively. After the point cloud optimization, the resulting average errors were: 0.003686 m East; 0.002260 m North; 0.00988 m Altitude. The total RMS error was 0.004435 m and 0.415 pixels. The coordinate system used was PT-TM06/ETRS 89 (EPSG: 3763) which is the official coordinate reference system in Portugal mainland.



**Figure 6.** Position of the ten ground control points used to geometrically correct the unmanned aerial vehicle (UAV) mosaic survey.

After this step the dense point cloud was rebuilt using the ultra-high quality parameter and moderate depth filtering. A total of 442291309 points were generated. Although not necessary for this study, a mesh was also built using the dense cloud as source. The parameters used were height field (2.5 D) as surface type, face count set to high, and, in the advanced tab, interpolation was set to “enabled”.

Finally, a very high-resolution digital surface model (DSM) and an orthomosaic of the mosaic area were generated. In both cases, all the parameters were the default ones. The source of data for the DSM was the dense cloud and for the orthomosaic was the DSM. The calculated ground sampling distance (GSD) of the products was 0.47722 mm. The results of the mosaic survey can be downloaded, in high resolution jpeg format from [http://www.dct.uminho.pt/pisoos/DSM\\_PISOES\\_MOSAIC.zip](http://www.dct.uminho.pt/pisoos/DSM_PISOES_MOSAIC.zip) (DSM) and [http://www.dct.uminho.pt/pisoos/ORTHO\\_PISOES\\_MOSAIC.zip](http://www.dct.uminho.pt/pisoos/ORTHO_PISOES_MOSAIC.zip) (orthomosaic). Some small portions of the DSM near the walls appear miscalculated due to the presence of moving vegetation, as can be easily seen in the orthomosaic. The photogrammetry processing using “structure from motion” is a very time consuming task that usually requires important hardware features to process data in the best quality possible. For all the photogrammetric processing in this work the computer used was an Apple MacPro with a Xeon E5 octacore 3 GHz processor, 128 GB of RAM, one SSD with 1 Terabyte disk, two internal AMD FirePro D500 graphical processing units and two external Nvidia GeForce GTX 1080 Ti graphical processing units (capable of 11.34 teraflops of processing power each).

#### 2.4. Inner Analysis of the Studied Mosaic

##### 2.4.1. Data Acquisition and Processing

GPR uses electromagnetic waves generated by an antenna moving on the surface. These waves penetrate in the subsurface and a part of their energy is reflected on the materials composing the structure, returning to the surface where they are detected on another antenna. The results are radar sections (radargrams) in which the  $x$ -axis represents the antenna survey line and the  $y$ -axis defines the propagation time of the radar wave in your path. In the case of floors and walls, a 1600 MHz antenna was used because it allows distinguishing reflectors of up to 50 cm inside. In the case of a 400 MHz antenna the investigation range is 3 m (approx.)

The selected mosaic portion has been recognized on two sensor resolution scales; first, a 2D-GPR survey was carried out using a 400 MHz antenna (yellow rectangle in Figure 7, lower image). These profiles were placed every 50 cm (approx.) along the width of the mosaic, and their lengths exceeded the dimensions of the study area in order to obtain a general vertical inner view. Second, we used a 1600 MHz antenna to conduct a 3D-GPR survey based on parallel profiles spaced 0.05 m apart (black rectangle in Figure 7, lower image) to obtain detailed volumetric images of the mosaic. The most significant acquisition parameters for both surveys are presented in Table 1.



**Figure 7.** The upper left image shows the 400 MHz antenna, which was used in this study to generally inspect below the mosaic. In the upper right image shows the 1600 MHz antenna, which was used to conduct a detailed 3D inspection of the mosaic. The lower image corresponds to the orthomosaic of the corridor where the inspected rectangles were placed; in yellow, the area of the 2D ground penetrating radar (GPR) profiles; and in black, the 3D-GPR area with parallel profiles spaced 0.05 m apart.

**Table 1.** Most significant acquisition parameters.

Antenna	400 MHz	1600 MHz
Time range	60 ns	10 ns
Scans/m	50	800
Samples/trace	512	256
Bit sample	16	32
Low vertical filter	800 MHz	32,000 MHz
High vertical filter	100 MHz	800 MHz

The data processing was performed with RADAN-7 (GGSI, Inc.) commercial software, and for the 2D and 3D images, our own design codes were also used for presentation [27]. As the quality of the acquired signal in this study was good, conservative flow processing was applied (Table 2), which was mainly aimed at increasing the signal amplitude (gain corrections) and, most importantly, to increase the vertical and lateral resolutions (deconvolution operator). To determine the average dielectric permittivity, an exhaustive analysis of the velocities was performed by adjusting some diffractions in the 400 MHz antenna profiles.

**Table 2.** Most relevant flow processing steps.

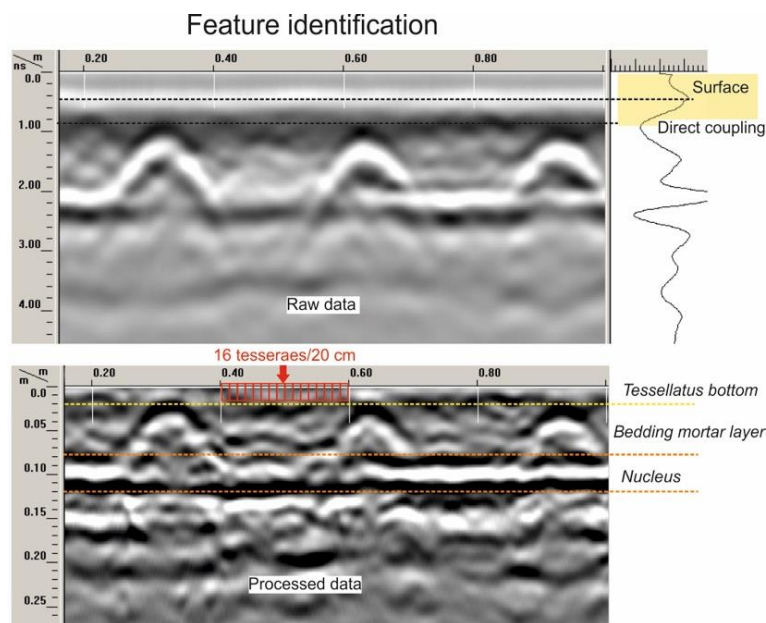
Zero correction	−0.23 ns
Gain correction	Constant in time window
Kirchhoff migration	$V = 0.128 \text{ m/ns}$
Predictive convolution	$N = 2.5$ , pred. Lag = 1.5
Bandpass filter	150–500 MHz
Gain correction	Linear in 11 time segments
Mean dielectric permittivity	5.5

2.4.2. Methodological Aspects: Resolution and Feature Identification

The GPR device parametrization with the 1600 MHz antenna (Table 1) suggests a very high resolution, capable of inspecting objects with sizes compatible with the tesserae (1–2 cm at 4 cm depth, Table 3). However, the GPR radargrams obtained from the Roman mosaic (Figure 8) did not allow for the high resolution suggested, although the radargrams clearly reveal the main stratigraphy of the mosaic.

**Table 3.** Absolute final accuracy for a 3D GPR grid.

Lateral X resolution	2–3 cm
Lateral Y resolution	4–5 cm
Vertical Z resolution	“fuzzy” above 1.8 cm 4 cm at 4 cm depth 5.66 cm at 8 cm depth (top of <i>nucleus</i> )

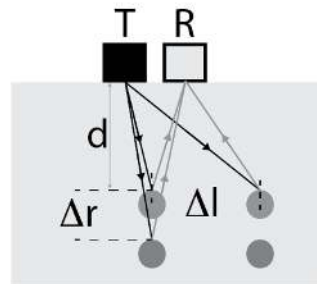


**Figure 8.** Fragments of acquired radargrams over the mosaic with the 1600 MHz antenna; the fragments contain the main identifiable features. The upper radargram is raw data, and the lower radargram is the same processed data, where we note that the 16 tesserae of the chain represented by the red grid, which fill 20 cm on average, are not detected. The three hyperbolas are caused by the sinopia main furrows.

The accuracy with which a specific body can be located depends on several factors. The GPR antenna begins sensing the target upon approach, continues to receive reflections as it passes over the target, and continues to receive reflections for some distance past the target. The distance between the antenna and the target changes as the GPR moves, which explains the hyperbolic shape of the reflection that determines the body detection.

In the first theoretical approximation, the GPR resolution is controlled by i) the bandwidth frequency of the electromagnetic pulses that radiate from the antenna in a cone of approximately 60 degrees amplitude and ii) the wave pulses velocity in the involved material. The two components that dictate the resolution [28] are the lateral resolution length,  $\Delta l$ , (sideways displacement) and the longitudinal resolution length,  $\Delta r$ , (depth), as depicted in Figure 9.

### Lateral and Longitudinal resolution



**Figure 9.** The GPR resolution can be divided into two parts: The lateral ( $\Delta l$ ) and the longitudinal resolution ( $\Delta r$ ).

The lateral resolution is described by the Fresnel zone equation:

$$\Delta l \geq \sqrt{\frac{d\lambda}{2}} = \sqrt{\frac{dv}{2f_c}} \quad (1)$$

where  $\lambda$  is the central wavelength,  $v$  is the GPR wave velocity in the medium,  $f_c$  is the central frequency and  $d$  is the depth.

The longitudinal resolution, based on the Rayleigh principle, can be described by the following equation:

$$\Delta r \geq \frac{\lambda}{4} = \frac{v}{4f_c}. \quad (2)$$

If we assume an average velocity of 0.128 m/ns for the mosaic and 1600 MHz of central frequency, we have a limit of 2 cm for longitudinal resolution and 2–4 cm for lateral resolution at depths between 1 cm and 4 cm, respectively. This explains why the tesserae cannot be detected from data acquired with the 1600 MHz antenna, as shown in Figure 8.

There are other factors that also contribute to the final absolute accuracy:

- (1) The positioning accuracy also depends on the sampling rates of the GPR signals, both spatially and temporally. In this study, we used a scan sampling of 800 scans/m and a time sampling of 0.04 ns between samples along each trace (Table 2); thus, we determined Nyquist values of 1.25 mm ( $1/2\Delta x$ ) and 12.5 GHz ( $1/2\Delta t$ ), respectively. Although these 800 scans/m were averaged in 4 traces (stack), the effective Nyquist number became 2.5 mm. These two sampling values were in accordance with the required resolution ranges, indicating that the acquisition parameters were appropriate in this study.
- (2) The distance between the transmitter and receiver (T-R offset), which is often ignored in deep surveys, is comparable to the target depth in this study. For the 1600 MHz antenna, the T-R offset was 5.8 cm (GSSI, Inc.). This value defines a “fuzzy” top level in the raw data that can be made finer during the processing flow if we consider some signal features (Figure 8). The very first signal in a scan is called the “direct coupling” between the transmitter and receiver. This signal is used to identify the surface position in a scan. With the 1600 MHz antenna, the surface is located at the first positive (white) peak within the direct coupling. In our raw radargram, direct coupling looked like straight horizontal bands on top of the data window. The signal arrives at

the receiver before penetrating the material, which in this case, was after 0.4 ns or 4–5.25 cm if we consider the air-tesserae velocities. This signal was a combination of the transmit pulse in the air and surface reflection from the top of the material (top of mosaic), so the direct coupling carries little information about the top of the mosaic. However, the amplitude depends on the dielectric constant of the material, and variations in amplitude may indicate changes in properties (e.g., increased moisture). Direct coupling disguises the first part of the scan, and thus, making this signal as short as possible is a major configuration goal. For a 1600 MHz antenna, direct coupling allows for the detection of targets from 1.8 cm (5.8–4 cm) below the surface and the accurate measurement of their depths. Considering the negative peak (a straight horizontal black line in the radargram) immediately below the surface is part of the direct coupling. The first positive peak does not show any visible variations, although its amplitude may vary along the profile. Some variations may be observed within the negative peak, and they usually indicate changes in the layer properties within the top inch of the material, although their accurate interpretation is difficult.

- (3) Increasing the resolution with a spike deconvolution. When the target size is a fraction of the wavelength, the shape of the detection hyperbola does not change significantly. This means that any targets that are dimensionally less than 2 cm in length and 2–4 cm laterally will produce hyperbolas of the same size and shape. Relative sizing is possible for targets with a diameter greater than 2 cm, as long as these targets are located at the same depth, crossed at the same orientation, and surrounded by the same material.

These resolution limits can be reduced slightly in the data processing by applying a spike deconvolution [29]. In Figure 8, we compared the raw radargram with the processed radargram, observing a significant increase in resolution.

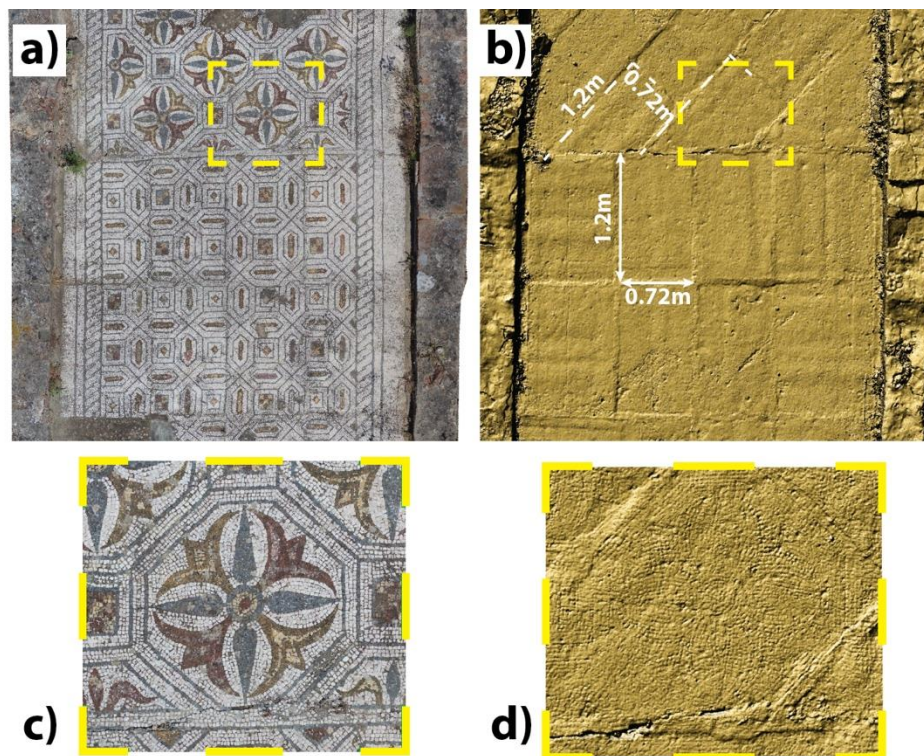
All of these previous considerations have been established for the 2D-GPR profiles ( $X, Z$ ), but in our 3D survey, the ( $X, Z, Y$ ) profile spacing was also considered. The orientation and number of profiles depends on the structure type and size, and other factors, such as distance control and wheel accuracy. The general rules are as follows: (a) The planned profiles could cross perpendicular to the features intended for detection. (b) A line spacing of 5–7.5 cm is required for complete coverage. This is the maximum practicable survey density that may be used for detailed 3D mapping because the 1600 MHz antenna width is 15 cm. (c) Linear targets that cross the survey lines at an angle of  $45^\circ$  to  $90^\circ$  will be resolved with good accuracy. (c) Complete exploration of the structure requires a survey in two directions, which are perpendicular to each other.

In this study, we planned a grid layout with the profiles spaced only 5 cm apart in the parallel direction to the corridor. By considering all the theoretical and experimental aspects that affect the GPR resolution, we could establish the absolute final accuracy, shown in Table 3. This means that the surface layer of the tesserae was unknown, and up to the nucleus level, only those elements that exceed the dimensions listed in Table 3 could be detected.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. Surface Analysis Based on Photogrammetry

The orthomosaic (Figure 10a) consists of approximately 1 giga square pixel with a 0.5 mm ground sampling distance (GSD). It is a resolution that allowed each tesserae (of  $1 \text{ cm}^2$ ) be defined of approximately 400 pixels. Figure 10b shows a grid of rectangular mesh of  $1.2 \text{ m} \times 0.72 \text{ m}$  oriented in two directions: (i) Along the corridor direction in the bottom sector, where the octagonal pattern is filled by squares and diamonds and (ii) oriented  $45^\circ$  with respect to the corridor direction in the upper sector, where the octagonal pattern is filled with rosettes.



**Figure 10.** (a) Fragment of the obtained photogrammetric orthomosaic from the studied floor mosaic. (b) Fragment of the digital surface model (DSM) in the same area where the boundaries between the bedding mortar sections of different work planning units were perceived and measured. (c) Detail of the green detached square found in (a). (d) Detail of the green detached square found in (b).

Some in situ measurements of the various tesserae colors were made with a Vernier caliper and confirmed with a photogrammetric image. Table 4 represents these measures and the mean sizes, resulting in an average tesserae of 1 cm wide, 1 cm long. In addition, thickness measurements were made in 14 tesserae of the various colors, which were loose. These values ranged between 1.5–2.0 cm high. All of these measurements were considered when interpreting the results.

**Table 4.** Measurements of various tesserae to determine the average size.

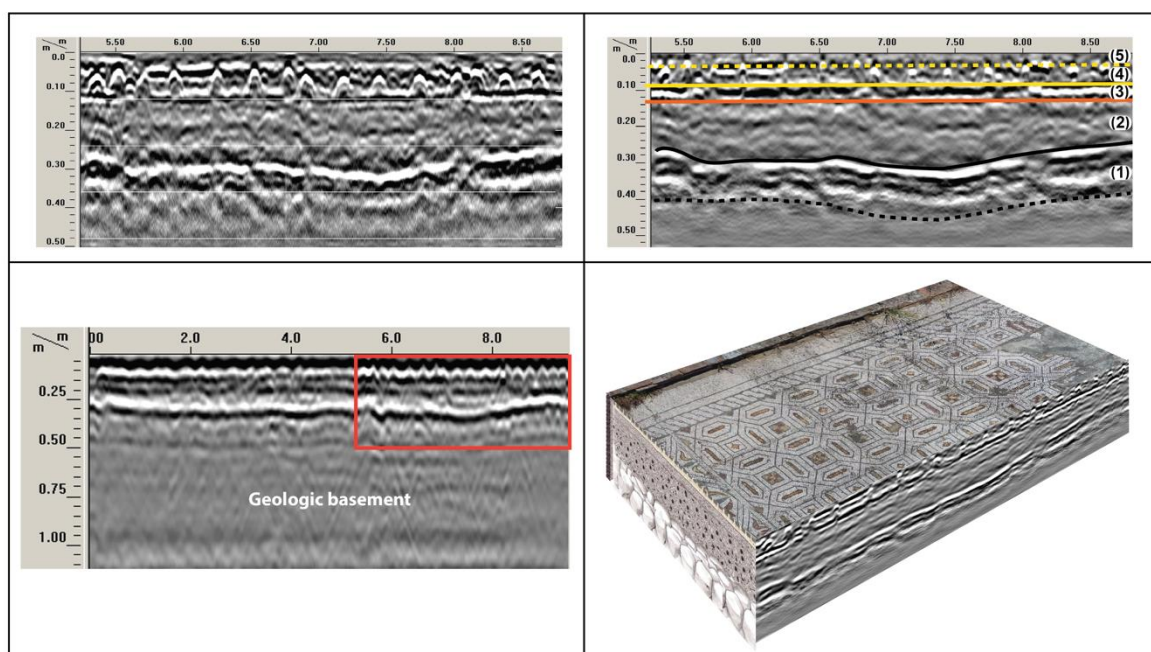
Tessera Types		Measurements									Mean
White	Wide (mm)	7	10	14	9	4	8	10	7	9	8.8
	Long (mm)	10	12	14	13	8	9	11	9	12	10.9
Black	Wide (mm)	7	9	11	10	7	11	12	12	7	9.6
	Long (mm)	12	9	14	12	9	13	14	13	9	11.7
Dark red	Wide (mm)	11	10	12	14	7	10	10	10	9	10.3
	Long (mm)	14	11	17	12	13	11	13	11	10	12.4
Light red	Wide (mm)	13	13	8	9	8	6	8	8	10	9.2
	Long (mm)	13	14	14	12	10	10	10	12	10	11.7
Dark yellow	Wide (mm)	10	10	9	12	12	8	10	9	8	9.8
	Long (mm)	11	12	9	12	12	10	12	10	11	11.0
Light yellow	Wide (mm)	10	6	12	12	10	7	9	9	11	9.6
	Long (mm)	11	8	14	12	11	7	13	10	11	10.8



In addition, the lineal and superficial densities of the tesserae have also been calculated by in situ measurements and over the orthomosaic. We can deduce that the lineal density of the tesserae for this mosaic is 15–16 tesserae/20 cm on average, and the superficial density is 112 tesserae/10 cm<sup>2</sup>. Although the pieces are 1 cm long, the linear density decreases, given that the joint widths are unequal. In this context, the surface density is a very approximate average value because it varies according to the orientation of the tesserae that form the different drawings.

### 3.2. The Inner Mosaic Based on 3D-GPR

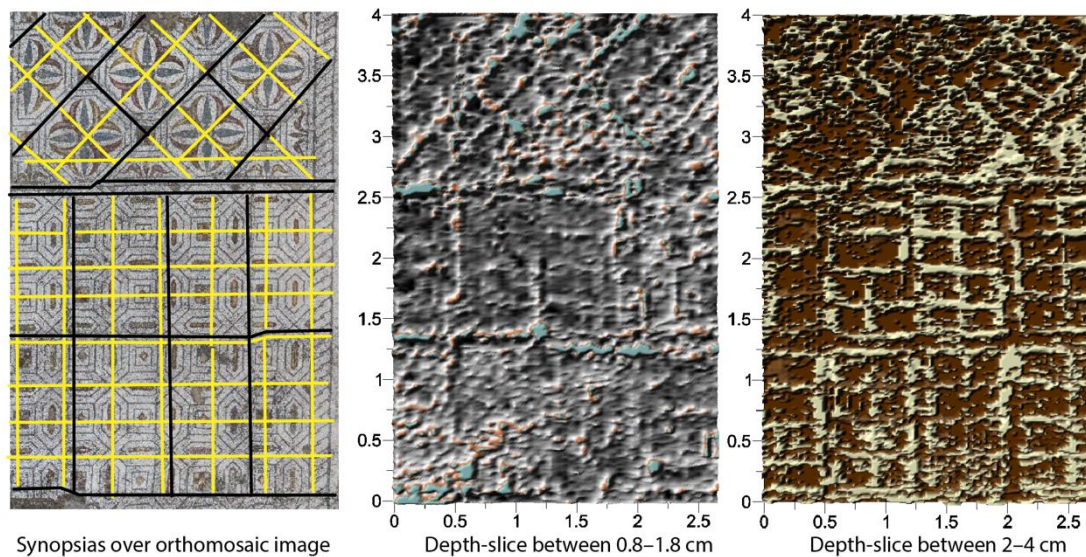
Figure 11 shows a portion of the raw 2D-GPR of the 400 MHz profile (lower left image) and two 2D-GPRs of 1600 MHz processed radargrams (upper images), which are coincident with the upper 2D-GPR profile (red rectangle). The right 1600 MHz radargram has been processed with the same flow, but a Kirchhoff migration has also been applied (marked step in Table 2).



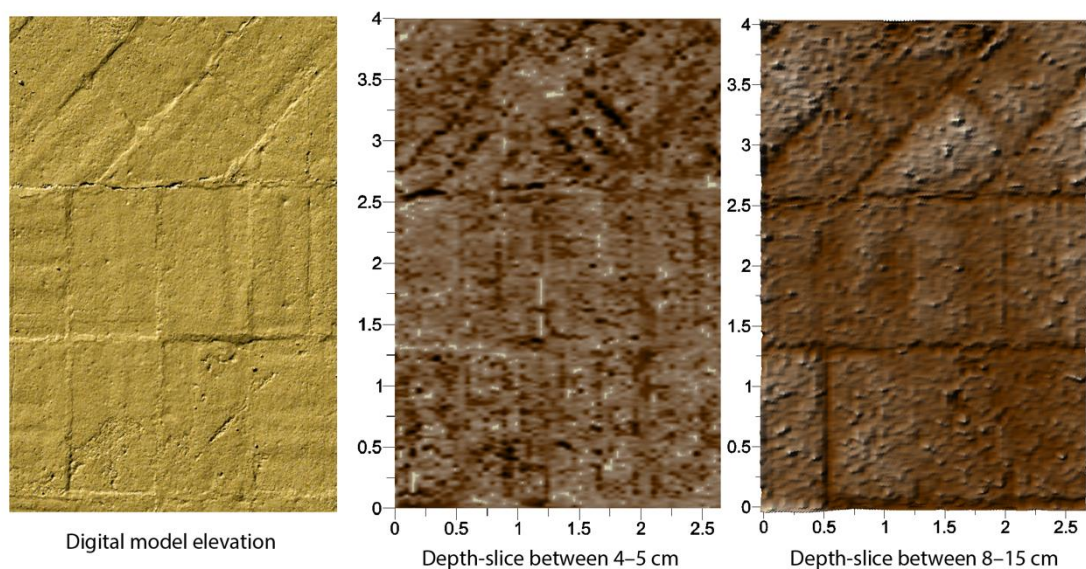
**Figure 11.** Top images show a 2D-GPR profile acquired with a 1600 MHz antenna, and the processing flow that was applied to this profile, as represented in Table 2. The right radargram differs from the left radargram because a Kirchhoff migration has also been applied. In both radargrams, we can distinguish all mosaic units (see the main text). The bottom left image is a raw 2D-GPR profile acquired with a 400 MHz antenna. The profile shows a general vertical stratigraphy view of the mosaic over the geologic bed. The red target indicates the location of the 1600 MHz 2D-GPR profile shown in the upper panel. The bottom right image is a general interpretation view of the main inner structure of the mosaic.

The first results of the 3D-GPR survey are shown in Figure 12, where the most significant detected levels up to the base of the nucleus are presented. From left to right, the two left images correspond to the photogrammetry: The one on the upper left is the orthomosaic and the bottom left is the DSM. The remaining images are horizontal cuts (depth slices) of the 3D-GPR model from the surface up to 15 cm depth, which contain the most reflective elements within this depth range [25]. The upper GPR slices in Figure 12 (0.8–1.8 cm and 2–4 cm) correspond to the distribution of the significant reflective elements in the bedding layer of the roman mosaic, which contains the tesserae. The black lines over the orthomosaic represent the interface between the blocks detected in DSM and the yellow lines are secondary guides corresponding to reflective elements detected on the GPR 3D slices up to 4 cm.

### Inferred main synopias for the Roman floor mosaic



### Nucleus layer for the Roman floor mosaic

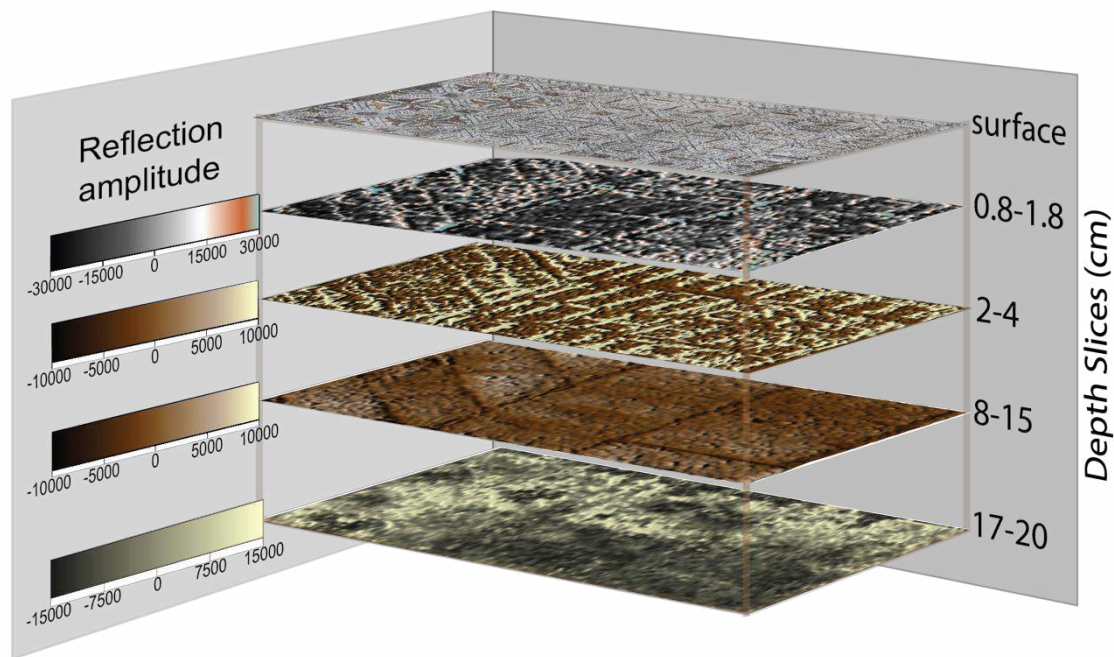


**Figure 12.** Upper images are the orthophoto (left) and two horizontal depth slices in the 3D-GPR model. Through the reflectors, we can infer the main sinopia of the Roman floor mosaic that is placed over the orthomosaic image (see discussion). Lower images are the digital surface model (DSM, left) and two horizontal depth slices cutting the nucleus: The first one is near the top of the nucleus, and the second integrates 7 cm of the nucleus body. Finally, the reflectivity correlates very well with the DSM model.

The lower GPR images in Figure 12 are the depth slice that correspond to the thin bedding layer of mortar (between 4–6 cm) just above the nucleus, where the sinopia are vanishing, and the slice that corresponds to the nucleus layer (between 8–15 cm).

### 3.3. Discussion

Figure 13 summarizes the detected levels up to the bottom of the rudus so that we have a complete study and documentation of the beautiful mosaic surface and its internal architecture.



**Figure 13.** Summary of the most significant levels detected in the 3D-GPR survey, collected with a 1600 MHz antenna. The color scales correspond to the amplitude of the reflections.

### 3.3.1. Surface thorough Photogrammetry

The orthomosaic resolution allows a detailed inspection of the mosaic surface. The gigapixel digital surface model (Figure 10b) accurately captured the surface relief of the mosaic, where subtle changes, not perceptible with the naked eye in the field or in the orthomosaic, could be noticed on the DSM. For example, the relief that defines the grid in Figure 10b is in the order of 1.9 mm and was interpreted as the boundaries of the bedding mortar sections, corresponding to different work units, which dried up in different time windows.

Notably, we cannot take all the information from the orthomosaic regarding the marks of the drawing planning (orientation and placement of the tesserae), which would be inscribed on the soft mortar layer. This is because the photogrammetry data are optical and only describe the small irregularities of the external surface (top) of the tesserae. Therefore, to further investigate the mosaic construction, it was necessary to penetrate the mosaic, i.e., to look at the surfaces beneath (bottom) the tesserae. For this purpose, we planned to use a high-resolution GPR (1600 MHz) that interferes with these design marks and penetrates into the interior of the tesserae.

### 3.3.2. Inner thorough GPR

The GPR images in Figure 11 show the main stratigraphic parts of the mosaic, which suggest that one could attempt a 3D inspection to analyze the conservation aspects (humidity, internal fractures, etc.) to make some preservation determinations. The top two layers of Figure 11 (up to 4 cm depth) are more special because they contain information about the artistic construction of the mosaic, and these layers can reveal interesting aspects from the patterns that help to further the knowledge of the mosaic. Thus, the radargrams and lower image in Figure 11 allowed us to establish the first interpretations of the mosaic stratigraphy: (1) the statumen basement layer is between 32 cm and 42 cm depths (on average), and this layer is characterized by a strong reflector at the top followed by a bed of coarse gravels that were well identified on the radargrams; (2) the rudus is a homogeneous layer with hardly any reflections, placed between 12 cm and 32 cm depths; (3) the nucleus, which is characterized by a double strong reflector, is located between 8–12 cm; and for (4) and (5), we could distinguish the

tesserae level, composed of a bedding mortar layer up to 2–4 cm, where designs marks were made and the tesserae were inserted (see also Table 3).

As expected from the previous considerations about the resolution and features identification from GPR data, the first considered layer in the 3D GPR model (between 0.8–1.8 cm, Figure 12) was a “diffuse” image that contained the base of the tesserae (bottom of layer 5 of Vitruvius description) and a part of the mortar that filled the interstices between the tesserae and fixed them. At the following level, represented in Figure 12 (between 2–4 cm depths), a set of geometric reflectors were detected, from whose arrangement the basic sinopia marked in the mosaic construction was inferred. The black lines drawn on the top left image of Figure 10 mark the main blocks detected in DSM and the attenuate segments in 2–4 cm depth-slice; while the yellow lines are the secondary guides that only detect a reflector segments in 2–4 cm depth slice. In the section of the floral motifs, the element that articulated the drawing was a mesh formed by squares with 36 cm sides that were arranged at 45° with respect to the direction of the corridor. For the section of geometric motifs, the basic element was a rectangular mesh with cells of 37 cm × 29 cm parallel to the corridor. The reflections that correspond to the nucleus layer (8–15 cm in Figure 12) correlate perfectly with the DSM, suggesting that in this mosaic, the nucleus was built with rectangular pieces of 1.2 m × 0.72 m distributed parallel, and at 45°, with respect to the corridor direction. Below the nucleus layer, the reflections in the rudus did not present significant distributions, except changes in signal amplitude that could be associated with areas of higher humidity, as mentioned in the previous section. Figure 11 is a summary of the detected levels up to the bottom of the rudus.

#### 4. Conclusions

Through this work we have presented a methodology to approach the study of mosaics from the point of view of their construction. Our objective was to demonstrate how the photogrammetry (UAV) allows us to document, with a submillimeter pixel resolution, the decorative image of a Roman mosaic; which is far below the tesserae dimensions (1 × 1 × 2 cm). In addition, the photogrammetry also allowed for obtaining a digital surface model of the Roman mosaic, also with a submillimeter sensibility in height, sufficient to detect the main units of the sinopia (base blocks), the superficial cracks, and the differential settlements of the subsoil.

On the other hand, the 3D-GPR survey with a 1.6 GHz antenna provided a tridimensional model of the mosaic interior with a resolution that made it possible to establish the main guidelines of the sinopia, the base blocks, and distinguish all constructive layers of the Roman mosaic (statumen, rudus, nucleus, and bedding); except the first undetectable tesserae surface layer.

For this reason, we propose that the best way to know a Roman mosaic is to cross both nondestructive techniques: The UAV photogrammetry to cover the most superficial information of the mosaic, and the 3D-GPR to access its internal parts, between the surface and approximately 30–40 cm depth. In addition to the structural aspects, it was also possible uncover the main grooves that define the sinopia design. Curiously, the study revealed that even in areas where the tessellatum failure had been changed to a regularizing mortar, the GPR pattern of the lower layers remains. The grooves in the sinopia continued to be visible on the radargrams, which proves that the mortar coating covers only the surface of the tesserae and did not interfere with the remainder of the mosaic structure or its preservation state.

The results of this study, which involved obtaining the internal structure of the mosaic, suggest that the model quality was achieved, particularly for the pathology diagnostics such as deformations, fracture zones, and humidity. The results of the present work did not clarify the humidity content because the studied mosaic is very stable and not affected by humidity, since the data acquisition was completed in July, which is an extremely dry season in Portugal. In any case, the methodology followed in this study allows for extensive diagnosis prior to preservation and restoration works, even in the lower layers of the mosaic structure, to prevent the increase of the pathological agents that promote its degradation.

In the future, we intend to carry out another study through multi-array GPR frequencies and recollect the data in two perpendicular directions to better resolve the accuracy reach ratios.

Finally, through this work, we showed that a Roman mosaic, in addition to the beautiful superficial drawings defined by the tesserae, is a complex archaeological structure. It is precisely the quality of this structure that allowed the mosaic to be preserved in all of its splendor to the present, nearly two thousand years after construction.

**Author Contributions:** Conceptualization T.T. and B.C.; methodology T.T., B.C., and R.H.; data processing T.T., R.H., and R.J.O.; data acquisition, R.J.O., J.A.P., R.H., T.T., J.F.B., and B.C.; original codes J.A.P., data analysis B.C., R.H. and T.T., writing—original draft preparation and edition, B.C. and T.T.; figures edition B.C., T.T. and R.H.; writing—review R.J.O., R.H., J.F.B., A.C., and J.A.P.; historical and archaeological specialist A.C.; supervision, B.C.

**Funding:** This work is co-financed by the INTERREG 2014-2020 Program, through the project, “Innovación abierta e inteligente en la EUROACE” with the reference 0049\_INNOACE\_4\_E; by the European Union through the European Regional Development Fund, included in the COMPETE 2020 through the ICT project (reference UID/GEO/04683/2019), and FCT project SFRH/BSAB/143063/2018. This research study was carried out using instruments acquired thanks to European Regional Development Fund (ERDF).

**Acknowledgments:** To the Action Plan to the Roman Villa of Pisões of the Évora University that manages the villa, by the delivery of the infrastructure; to the Institute of Earth Sciences, for the logistic support in the management of the resources affected to the development of this work and to D. Conceição, guard of the villa, for the warm reception of the team.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

- Alarcão, J. *Roman Portugal*, 1st ed.; Warminster: Aris & Phillips: London, UK, 1988; 480p.
- Pereira, C.; Soares, A.M.; Soares, R.M. Os mausoléus da villa romana de Pisões: a morte no mundo rural romano. *Revista Portuguesa de Arqueologia* **2013**, *16*, 303–321.
- Costa, M.L. Contribuições para o estudo de alguns dos mosaicos da Villa Romana de Pisões. *Arquivo de Beja (2ª Série)* **1983**, *2*, 95–122.
- Wrench, L. Transições de signos: os motivos representados num mosaico da Villa romana de Pisões. *Revista da FCSH*. 1998, pp. 247–255. Available online: [https://run.unl.pt/bitstream/10362/7339/1/RFCSH11\\_247\\_255.pdf](https://run.unl.pt/bitstream/10362/7339/1/RFCSH11_247_255.pdf) (accessed on 12 May 2019).
- Reis, M.P. *Las termas y balnea romanos de Lusitania, Vol. 1*, 1st ed.; Studia Lusitana-Museo Nacional de Arte Romano: Mérida, Spain, 2004; 205p.
- Couto, M. Balnevm da villa romana de Pisões, Análise Formal e Funcional. Master Thesis on History of Art, Fac. Social and Human Sciences of New University of Lisbon, Lisbon, Portugal, 2007.
- Caldeira, B.; Borges, J.F. Relatório de Geofísica Prévio à Construção do Centro de Interpretação e Acolhimento do Sítio Arqueológico da Villa Romana de Pisões, Report to obtain licence of archaeological and conservation Works. Personal communication, 2017.
- Peña, J.A.; Teixedó, T.; Carmona, E.; Suierra, M. 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). 2008. Repositorio Institucional de la Universidad de Granada. Available online: <http://hdl.handle.net/10481/23460> (accessed on 14 May 2019).
- Hinterleitner, A.; Seren, S.; Löcker, K.; Neubauer, W.; Bayirli, E. Data Processing and Image Enhancement of GPR Surveys of Roman Villas in Austria. *ArcheoSciences* **2009**, *33*, 299–302. [CrossRef]
- Borsoi, G.; Silva, A.S.; Menezes, P.; Candeias, A.; Mirão, J. Analytical characterization of ancient mortars from the archaeological roman site of Pisões (Beja, Portugal). *Const. Build. Mater.* **2019**, *204*, 597–608. [CrossRef]
- Caldeira, B.; Oliveira, R.J.; Borges, J.F. Combination of Georadar and Electromagnetic Induction of methods for mapping a karst cave in a protected area of the Arrábida- Portugal. In Proceedings of the 9ª Assembleia Luso Espanhola de Geodesia e Geofísica, Madrid, Spain, 28–30 June 2016.
- Brutto, M.L.; Garraffa, A.; Pellegrino, L.; Di Natale, B. 3D mosaic documentation using close range photogrammetry. In Proceedings of the 1st International Conference on Metrology for Archaeology, Benevento, Italy, 22–23 October 2015.

13. Santachiara, M.; Gherardini, F.; Leali, F. An Augmented Reality Application for the Visualization and the Pattern Analysis of a Roman Mosaic. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2018**, *364*. [[CrossRef](#)]
14. Andrews, D.; Beckett, N.; Clowes, M.; Tovey, S. A comparison of rectified photography and orthophotography as Applied to historic floors—with particular reference to Croughton roman villa. In Proceedings of the CIPA XX International Symposium, Torino, Italy, 26 September–1 October 2005.
15. Lachhab, A.; Bakadi, F.; Benyassine, M.; Rouai, M.; Dekayir, A. GPR and Ultrasonic surveys to Investigate the Deterioration of Roman Mosaics: A Case Study of Venus House, Volubilis, Morocco. In Proceedings of the 12th Conference of the International Committee for the Conservation of Mosaics, Sardinia, Italy, 27–31 October 2014.
16. Giunta, G.; Di Paola, E.; Previde, M. Diagnostics and surveys techniques applied to the Ercolano archaeological site: an integrated 3D information system for conservation and documentation. In Proceedings of the 10th Inter. Congress on Deterioration and Conservation of Stone, At Stockholm, Sweden, 27 June–2 July 2004; Kwiatkowski, D., Lofrendahl, R., Eds.; Volume II, pp. 723–730, ISBN 91-631-1458-5.
17. D'Aranno, P.J.; De Donno, G.; Marsella, M.; Orlando, L.; Renzi, B.; Salviani, S.; Volpe, R. High-resolution geomatic and geophysical techniques integrated with chemical analyses for the characterization of a Roman wall. *J. Cult. Herit.* **2016**, *17*, 141–150. [[CrossRef](#)]
18. Wrench, L. Looking at Two Patterns Inspired in Coffered Ceilings: Some Examples in the Portuguese Roman Mosaics. *J. Mosaic Res.* **2015**, *8*, 167–183. [[CrossRef](#)]
19. Kremer, M.D. Mosaicos romanos em Portugal. Expressão de uma cultura Universal no extremo ocidental do Império Romano. *Abeliterium* **2015**, *II-I*, 26–38.
20. Vitruvius. *Os dez livros de Arquitectura (Latin translation by M. Justino Maciel)*; IST Press: Lisboa, Portugal, 2006; 454p.
21. Mañas Romero, I. El pavimento musivo como elemento en la construcción del espacio doméstico. *Anales de Prehistoria y Arqueología* **2008**, *23–24*, 89–117.
22. Robotti, C. *Mosaico e Architettura: Disegni, Sinopie, Cartoni*, 1st ed.; Ferraro: Napoli, Italy, 1983; 119p.
23. Starinieri, V. Study of materials and technology of ancient floor mosaics' substrate. PhD Thesis, Doctoral dissertation, Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Bologna, Italy, 2009.
24. Pliny. *Natural History*; W. Heinemann Ltd.: London, UK, 1971; Book XXXVI.
25. Oliveira, C.F. A villa romana de Rio Maior: estudo de mosaicos, 1st ed. Instituto Português de Arqueologia: Lisboa, Portugal, 2003; 204p.
26. Gonçalves, J.A.; Henriques, R. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2015**, *104*, 101–111. [[CrossRef](#)]
27. Peña, J.A.; Teixidó, T. Cover Surfaces as a New Technique for 3D GPR Image Enhancement: Archaeological Applications. 2012. Available online: <http://hdl.handle.net/10481/22949> (accessed on 21 April 2019).
28. Harry, J. *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, 1st ed.; Elsevier Science: Amsterdam, The Netherlands, 2009; 544p.
29. Yilmaz, Ö. *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*; Doherty, S.M., Ed.; Society of Exploration Geophysicists: Tulsa, OK, USA, 2001; ISBN 1-56080-094-1.



## ANEXO A2: ALGORITMOS DESENVOLVIDOS

Os algoritmos elaborados no âmbito do presente trabalho, assim como os dados geofísicos usados, estão alojados na seguinte página eletrónica:

[http://home.uevora.pt/~ruio/tese\\_phd/material\\_suplementar](http://home.uevora.pt/~ruio/tese_phd/material_suplementar)

### Códigos fonte usados no Capítulo 3 relacionados com o algoritmo SVD

- A31\_testes\_lab.m
- A32\_teste\_deconv.m
- A33\_br\_fft\_lab.m
- A34\_teste\_componentes\_svd\_lab.m
- A35\_br\_fft\_svd\_k0\_lab.m
- A36\_br\_fft\_svd\_k0\_campo.m
- A37\_ht\_3d\_br\_fft\_svd\_k0.m

### Códigos fonte usados no Capítulo 4 relacionados com o algoritmo INT-FFT

- A41\_outputs\_artigo2.m
- A42a\_Interp\_MacOS.m
- A42b\_Interp\_Windows.m
- A43\_comparison\_gpr\_interp.m
- A44\_slices\_gpr\_turn\_uniform.m
- A45\_sharpness.m

### Códigos fonte usados no Capítulo 5 relacionados com o algoritmo FUSAO-GPR-MAG

- A51\_Good\_Data\_Fusion\_DTW2\_MSVD.m
- A52\_Less\_good\_data\_Fusion\_DWT2\_MSVD.m
- A53\_Bad\_data\_Fusion\_DWT2\_MSVD.m

### Códigos fonte usados no Capítulo 6 (algoritmos INT-FFT + SVD + FUSAO-GPR-MAG)

- A61\_Teste\_BR\_Pisoos.m
- A62\_Densificacao\_perfis\_Pisoos\_200.m
- A63\_PISOES\_3d\_br\_fft\_svd\_k0.m
- A64\_Pisoos\_A2\_data\_Fusion\_DWT2\_MSVD.m





