



Steffan Clent Ap Davies

## Dados de satélite como ferramenta de deteção e monitorização de sítios arqueológicos

Relatório de Estágio em Arqueologia e Território, em Arqueogeografia, orientada pela Doutora Maria da Conceição Lopes e coorientado pelo Prof. Ricardo Daniel Figueiredo Cabral, apresentado ao Departamento de História, Estudos Europeus, Arqueologia e Artes da Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra

2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# Dados de satélite como ferramenta de deteção e monitorização de sítios arqueológicos

## Ficha Técnica:

<b>Tipo de trabalho</b>	<b>Relatório de Estágio</b>
<b>Título</b>	<b>Dados de satélite como ferramenta de deteção e monitorização de sítios arqueológicos</b>
<b>Autor/a</b>	<b>Steffan Clent Ap Davies</b>
<b>Orientador/a</b>	<b>Maria da Conceição Lopes</b>
<b>Coorientador/a</b>	<b>Ricardo Daniel Figueiredo Cabral</b>
<b>Júri</b>	<b>Presidente: Doutora Helena Maria Gomes Catarino</b> <b>Vogais:</b> <b>1. Doutora Maria da Conceição Lopes</b> <b>2. Doutor Vasco Manuel Jorge Soares Mantas</b>
<b>Identificação do Curso</b>	<b>2º Ciclo em Arqueologia e Território</b>
<b>Área científica</b>	<b>Arqueologia</b>
<b>Especialidade/Ramo</b>	<b>Arqueogeografia</b>
<b>Data da defesa</b>	<b>23-10-2018</b>
<b>Classificação</b>	<b>17 valores</b>



# Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que me prestaram auxílio e apoio na elaboração deste trabalho:

À orientadora de estágio Professora Doutora Maria da Conceição Lopes, que é minha professora desde a Licenciatura e que possibilitou a realização deste estágio durante o Mestrado.

Ao meu coorientador Prof. Ricardo Daniel Figueiredo Cabral, que foi meu professor na Licenciatura e que não só possibilitou este estágio como também se mostrou disponível para partilhar comigo todos os seus conhecimentos.

Ao Mestre Martino Correia, que mostrou apoio e interesse no meu trabalho, e que me aconselhou durante o meu percurso académico.

Aos meus avós Barry Clent e Yvonne Clent, que me criaram e apoiaram durante todo o meu percurso de vida.

À minha alma gémea Andreia Ribeiro, que me apoiou nos altos e baixos da minha vida, e nunca desistiu de mim.

Obrigado a todos vós,

**Steffan**

## **Dados de satélite como ferramenta de deteção e monitorização de sítios arqueológicos**

### **Resumo**

O presente trabalho descreve as atividades realizadas no decurso do estágio de mestrado efetuada na empresa THEIA, no âmbito do qual foi aplicada tecnologia espacial à deteção e monitorização do património arqueológico. A utilização de tecnologia de satélite como ferramenta para o estudo da arqueologia tem-se desenvolvido de passo acelerado na última década. O património arqueológico é por natureza altamente vulnerável, e por este motivo é necessário tomar medidas que possam garantir a sua preservação face a eventos que possam comprometer a sua integridade. A prospeção e monitorização de sítios arqueológicos é um processo que necessita de um grande investimento, o que torna o acompanhamento em áreas extensas como o Alentejo uma tarefa complicada. Ao longo dos últimos anos, temos assistido à destruição irreversível de património arqueológico nesta região devido a trabalhos agrícolas intensivos. Neste trabalho foram aplicados dados de satélite de tipo ótico e radar como método de prospeção arqueológica e como um meio para a deteção automática de eventos destrutivos em Beja. As capacidades destas abordagens foram confirmadas, especialmente para monitorização com recurso a deteção de alterações e interferometria PSInSAR.

**Palavras-Chave:** Deteção Remota, Satélite, Arqueologia, Alentejo, Interferometria, PSInSAR, Deteção-de-Alterações, Monitorização

## **Satellite data as a tool for archaeological site surveying and monitoring**

### **Abstract**

The present work describes the activities carried out during the master's degree apprenticeship accomplished at the company THEIA, where space technology was applied to archaeological heritage surveying and monitoring. The use of satellite data as a tool for archaeological research has evolved at a very fast pace in the last decade. Archaeological heritage is by nature highly vulnerable, and for this reason it is necessary to put in place measures that can guarantee its preservation when faced with events that might compromise its integrity. Surveying and monitoring of archaeological sites are a process that requires a great deal of investment, which makes its surveillance in extensive areas such as Alentejo a complicated task. Over the last few years, we have witnessed the irreversible destruction of archaeological heritage in the region due to intense agricultural activity. In the present work optical and radar satellite data was applied as a method of archaeological surveying and as a means for automatic detection of destructive events in Beja. The potential of these approaches was confirmed, especially for monitoring with resort to change detection and PSInSAR interferometry.

**Keywords:** Remote Sensing, Satellite, Archaeology, Alentejo, Interferometry, PSInSAR, Change-Detection, Monitoring

# Índice

Introdução.....	1
Instituições e Organismos de Acolhimento e Suporte.....	2
THEIA.....	2
Instituto Pedro Nunes .....	4
ESA BIC Portugal.....	4
Estado da Arte .....	5
Fundamento Teórico.....	11
Ondas eletromagnéticas .....	12
Sensores Fotográficos e Imagem.....	16
<i>Formato Raster e Vector</i> .....	16
<i>Bit Depth</i> .....	16
<i>Dynamic Range</i> .....	19
Radar de Abertura Sintética (SAR) .....	20
Geometria e órbitas .....	26
InSAR.....	29
PSInSAR.....	34
Interpretação de Imagens de Satélite .....	37
<i>Crop Marks</i> .....	37
<i>Pansharpening</i> .....	40
Filtragem de imagens .....	42
Produtos de Satélite.....	43
Sentinel 1.....	43
Level 0.....	43
Level 1.....	43
Level 2.....	43
Sentinel 2.....	43
Level 0.....	43
Level 1-A.....	44
Level 1-B.....	44
Level 1-C .....	44

Level 2-A.....	44
TerraSAR-X.....	46
SSC – Single Look Slant Range Complex .....	46
MGD – <i>Multi Look Ground Range Detected</i> .....	47
GEC – <i>Geocoded Ellipsoid Corrected</i> .....	47
EEC – <i>Enhanced Ellipsoid Corrected</i> .....	47
Casos de Estudo .....	49
Tecnologia de satélite como método de prospeção .....	49
Lista de sítios .....	52
Resultados.....	55
Dados de satélite como ferramenta de monitorização .....	63
Deteção de alterações e PSInSAR .....	63
Introdução de dados em Sistema de Informação Geográfica.....	71
<i>WebSite</i> .....	72
Deteção de eventos destrutivos em sítios arqueológicos.....	73
Pisões .....	74
Fonte dos Cântaros 3 .....	88
Conclusão.....	93
Bibliografia.....	97

# Introdução

O presente trabalho consiste no Relatório de Estágio relativo às atividades de formação obtidas no estágio curricular enquadradas na vertente curricular de Arqueogeografia.

A escolha de realizar um Relatório de Estágio foi feita pelo motivo de oferecer certas vantagens face às outras opções, nomeadamente uma integração antecipada no contexto do mercado de trabalho e na experiência empresarial, e a possibilidade de aplicar o conhecimento teórico e académico adquirido durante este período a casos reais e dentro de um contexto de mercado.

O estágio foi realizado dentro da empresa THEIA, que está incubada em duas organizações distintas complementares: o Instituto Pedro Nunes e o ESA BIC PORTUGAL.

O estágio decorreu durante o ano letivo de 2017/2018, entre 02 de outubro de 2017 e 29 de julho 2018, e as atividades que decorreram foram orientadas pela Prof. Dra. Maria da Conceição Lopes e supervisionadas pelos diretores da empresa - Martino Correia e Ricardo Cabral. Este último assumiu inclusivamente a responsabilidade e papel de coorientador de estágio.

Este relatório não se limita apenas a uma descrição das atividades decorridas durante o período de estágio na empresa, pelo que inclui de forma complementar a fundamentação teórica que foi necessária adquirir, de maneira a que fosse possível executar a investigação e aplicação dos conhecimentos sobre a matéria em estudo. Após a introdução teórica, será feita a descrição das atividades realizadas dentro pela empresa na seção casos de estudo.

A disposição de imagens foi feita ao longo do texto ao invés de serem colocadas numa seção de anexos final, pois ajuda a fazer uma contextualização prática ao longo da leitura. As citações bibliográficas foram feitas de acordo com o modelo APA de 6ª edição.



# Instituições e Organismos de Acolhimento e Suporte

## THEIA

A THEIA é uma empresa que trabalha nos setores da arqueologia, património, multimédia e digitalização, tendo sido criada no Verão de 2017 pelos arqueólogos Martino Correia e Ricardo Cabral.

O seu foco prende-se principalmente em oferecer soluções digitais para contextos do património utilizando tecnologia de ponta. Sendo uma empresa enquadrada em tecnologias aplicadas à arqueologia e ao património, as suas atividades incorporam os seguintes temas:

- Fotogrametria
- *Laser Scanning*
- Modelação 3D
- Detecção Remota
- Fotografia aérea por Drone
- Realidade Virtual
- Reconstrução Virtual

A natureza do trabalho prestado na empresa esteve em constante fluxo consoante as necessidades exigidas ao longo do tempo, adaptando-se às circunstâncias que surgem e levando a que, em certas alturas, tenha havido a necessidade de alterar provisoriamente o rumo das atividades. A empresa, estando enquadrada no âmbito do património digital, deteção remota e reconstrução em ambientes 3D, requer um trabalho variado de diferentes especializações, estando quase sempre associada a um projeto do património histórico ou cultural, sem excluir necessariamente a capacidade de prestar serviços idênticos a outras áreas de estudo que também partilham um interesse por serviços digitais e de deteção remota, tal como a arquitetura, a construção e a agricultura.

A empresa tem, na sua posse, um leque diversificado de equipamentos que utiliza para fazer o levantamento de áreas de interesse, fazer o processamento desses dados e produzir resultados finais de acordo com as necessidades dos seus clientes ou dos projetos.

De entre os equipamentos disponíveis, salientam-se os mais significativos para a atividade geral da empresa:

- Laser Scanner Leica BLK360
- Máquina Fotográfica Sony Alpha a7 II

A utilização de equipamento avançado para levantamento e deteção remota requer, de igual categoria, equipamento com elevado poder de processamento de forma a produzir resultados adaptados às necessidades do projeto. De forma a tornar possível a transformação da informação de campo em produtos digitais, a empresa investiu em equipamento informático de tipo consumidor de alta gama, com especial atenção ao poder de processamento gráfico e na capacidade de memória volátil das máquinas. A empresa possui, neste momento, duas máquinas principais de processamento.

Computador	<i>Workstation 1</i>	<i>Workstation 2</i>
Processador Central	Intel i7-7820X	Intel i7-7800X
Processador Gráfico	2 x NVidia Geforce 1080ti	2 x NVidia Geforce 1080ti
Memória RAM	128 GB DDR4	32 GB DDR4
Armazenamento	SSD + HDD	SSD + HDD

Tabela 1 – *Hardware* de processamento

O processamento dos dados tem que ser feito através da utilização de *software* especializado adequado às diferentes tarefas e aos diferentes passos na cadeia de transformação digital. Este *software* inclui programas de edição de imagem e vídeo (Photoshop, Gimp), de modelação e tratamento ou edição de modelos (Blender, ZBrush), de fotogrametria e *laserscan* (Recap, Reality

Capture), de processamento de dados de satélite (SNAP, SARPROZ, QGIS), e motores de jogos para visualização tridimensional (Unity 2018, Unreal Engine 4).

## Instituto Pedro Nunes

O Instituto Pedro Nunes (IPN) é uma organização sem fins lucrativos criada pela Universidade de Coimbra em 1991, que fornece serviços de incubação de empresas, com o objetivo de servir de ponte de lançamento entre a tecnologia e inovação vinda do mundo académico com a aplicação destes conhecimentos e potencialidades no sector económico.

O IPN oferece às empresas um serviço de incubação que inclui diversas vantagens, das quais se incluem espaços de trabalho do tipo individual ou num formato *cowork*, a um preço reduzido face a alternativas tradicionais. Para empresas que não estão interessadas em incubação física, o IPN oferece uma incubação virtual que fornece às empresas um espaço para reunir com clientes, entre outras mais valias. Ao mesmo tempo a organização fornece serviços de logística, consultadoria financeira e legal, e uma rede extensa de contactos e informação que pode ser utilizada para auxiliar o desenvolvimento das ideias das empresas.

## ESA BIC Portugal

Foi nos finais de 2014 que se formou uma parceria entre o Instituto Pedro Nunes e a divisão de incubação da Agência Espacial Europeia - a ESA BIC Portugal. Esta incubadora oferece um montante às empresas de forma a possibilitar o desenvolvimento de soluções baseadas no uso de satélites em áreas distintas à esfera espacial. O financiamento permite às empresas uma margem de manobra para construir protótipos das suas soluções, adquirir propriedade intelectual e solicitar apoio técnico.

Em troca deste financiamento e apoio, as empresas têm o dever de fornecer relatórios regulares da sua atividade de forma a descrever as áreas financeiras e técnicas da sua atividade. Uma das minhas responsabilidades no âmbito do estágio realizado era a preparação de relatórios técnicos relacionados com a utilização de dados de satélite. Estes relatórios são denominados *Technical Note* e descrevem os procedimentos e os resultados dos trabalhos elaborados.

# Estado da Arte

No contexto da arqueologia, e com base no levantamento bibliográfico, os primeiros estudos que recorreram a uma metodologia com base em deteção remota de por satélite ou por radar de abertura sintética remontam aos inícios da década de 80 do século XX. Seria também por volta desta altura que outros sistemas semelhantes de geofísica à base de radar, como o famoso GPR (*Ground Penetrating Radar*), começavam a ser introduzidos no trabalho de campo devido aos aperfeiçoamentos e à redução de custos para sistemas orientados para ao mercado de consumo especializado. Arqueólogos recorriam, nesta altura, a especialistas de outras áreas como a física ou geologia para fazer os levantamentos de geofísica nos contextos arqueológicos (Conyers, 2010, p. 1). O lançamento do Landsat 1 (batizado *Earth Resources Technology Satellite 1*) em 1972 abriu as portas a um reino de novas oportunidades para a área da deteção remota aplicada aos campos da Geologia, Geografia, Meteorologia e Oceanografia. O Landsat 1 possuía capacidades multiespectrais a uma resolução espacial de 80 metros, cobrindo um total de 75% da superfície terrestre durante o seu período de vida. Nos inícios da década de 80 os arqueólogos recorreram às capacidades do satélite para mapear áreas de interesse arqueológico no Egito (Parcak, 2009, p. 22) através de uma abordagem arqueogeológica e paleoambiental.

A tecnologia SAR (*Synthetic Aperture Radar*), que utiliza um radar orientado lateralmente ao percurso de voo, também começou a marcar presença pouco tempo depois dos primeiros trabalhos com o Landsat 1. Em 1981 fez-se uma análise do comportamento de sistemas SAR no estudo de paleopaisagens em contextos tropicais e subtropicais da América do Sul (Adams, Brown, & Culbert, 1981). É necessário realçar que o sistema de radar utilizado neste estudo não estava associado a um satélite ou a um vaivém espacial, mas sim a um avião. O objetivo do estudo foi de tentar identificar, através de radar, estruturas associadas à cultura Maia que ajudassem a compreender a escala da sua economia agrária. Sistemas de drenagem pensava-se serem necessárias para desenvolver uma agricultura intensiva que conseguisse suportar uma população de larga escala, e foi escolhido o radar aéreo como a ferramenta indicada para a prospeção remota destes elementos da paisagem. O facto de se ter utilizado um avião permitiu uma resolução espacial relativamente alta quando comparado com missões espaciais da mesma altura como o SIR-A (*Shuttle Imaging Radar A*) que utilizava um vaivém espacial como veículo para o sensor.

Em 1982 foi publicado na um artigo Science um artigo (McCauley *et al.*, 1982) que analisou de um ponto de vista geológico os resultados de imagens adquiridas pela missão SIR-A de 1981,

sobre o Deserto do Saara Oriental. As questões principais discutidas na publicação lidavam, principalmente, com a identificação de locais de potencial habitat pré-histórico associados a elementos paisagísticos identificados pelo sistema de radar, e o seu enquadramento com a arte rupestre e artefactos presentes na área de interesse. Foi também discutido as capacidades de penetração do radar em solos hiperáridos como aqueles presentes no Deserto do Saara, e foi estimado pelos investigadores uma penetração máxima de aproximadamente 5 metros de profundidade para as ondas do SIR-A correspondentes à banda L.

O lançamento do satélite francês SPOT (Satélite Para Observação da Terra) em 1986 não teve um impacto significativo para a arqueologia (Lasaponara & Masini, 2011, p. 1995), apesar da sua maior resolução face ao anterior Landsat norte-americano. A causa seria, possivelmente, o facto da melhoria ser insuficiente para satisfazer as necessidades da arqueologia em conseguir identificar estruturas individuais, que apenas seria possível com resoluções que se aproximavam da escala submétrica e que só começaram a surgir na transição para o século XXI. Por outro lado, as imagens tinham um custo mais elevado do que as do Landsat 1, levando a uma redução da acessibilidade de um campo de investigação que já era extremamente especializado na altura.

Quase no virar da década, em 1989, foi publicado um artigo (Pope & Dahlin, 1989) que regressa à questão agrária da civilização Maia, mas desta vez recorre a imagens de radar de forma a identificar áreas territoriais que não possuíam paleocanais de irrigação de grandes dimensões. O estudo foi feito como crítica à teoria existente que afirmava que a civilização Maia estava dependente destes canais de irrigação em zonas pantanosas para conseguir sustentar a sua densidade populacional. A ausência de canais de irrigação em zonas centrais, suscetíveis a períodos de inundação e de seca, servia de evidência que as cidades não estavam inteiramente dependentes dos canais de irrigação construídos em zonas pantanosas de forma a assegurar o sustento alimentar da população.

Podemos observar que as publicações mais importantes entre os finais da década de 70 e 80 eram tudo menos eurocêntricas, focando principalmente em áreas de interesse da América do Sul e do Nordeste Africano. As razões são fundamentalmente materiais e paisagísticas, já que estas novas tecnologias teriam máximo potencial em zonas de copado denso que impossibilitaram a fotografia aérea tradicional ou zonas hiperáridas que permitiam boa identificação de descontinuidades geológicas e uma penetração de radar adequada. Por outro lado, a análise paisagística possibilitada pela introdução de novas ferramentas de deteção remota no plano metodológico da arqueologia permitiu reforçar a filosofia processual de estudar

a cultura através do ambiente. O Professor de Arqueologia Africana Merrick Posnansky reflete o paradigma processual amadurecido da Nova Arqueologia em 1982, quando salienta que há uma necessidade de pensar em termos comportamentais do passado, trabalhando com modelos fornecidos por economistas, ecologistas, linguistas, geógrafos e biólogos, em conjunto com os modelos processuais dos arqueólogos (Posnansky, 1982, p. 354).

A década de 90 marcou uma aceleração no uso da tecnologia de satélite para fins arqueológicos, com um aumento significativo de publicações em revistas indexadas. Finalmente, a arqueologia espacial começava a ter presença no discurso científico convencional, aliado a outras tecnologias que também começavam a ter movimento interno como os SIG (Sistemas de Informação Geográfica). O processo de democratização da tecnologia informática deve ter tido algum impacto na acessibilidade de ferramentas de estatística e processamento de dados para os arqueólogos, tal como melhoramentos na interface gráfica e de visualização de dados. Em simultâneo, houve um melhoramento tecnológico dos sensores, com a introdução de novas plataformas espaciais como o ERS-1 em 1991, SPOT 4 em 1998, e o Landsat 7 e o IKONOS 1999, ajudando a saciar parcialmente a necessidade dos investigadores em conseguir imagens mais nítidas e regulares. O fim da guerra fria e do conflito entre o primeiro e segundo mundo levou à desclassificação de imagens de satélite (como o sistema Corona) e de aeronave que até então seriam de uso restrito para entidades militares e serviços de inteligência. O acesso a estes dados por arqueólogos e pelo público tornou-se mais fácil e aberto, levando a um aumento substancial de materiais de estudo com resoluções adequadas (Lasaponara & Masini, 2011, p. 1995). Paralelamente ao estímulo do tópico da deteção remota no discurso arqueológico e à dissolução das suas barreiras de acesso, há o início da divulgação consciente das abordagens espaciais na arqueologia pelo público, através dos *media* (Parcak, 2009, pp. 29-31).

Com a chegada do século XXI, as bases de deteção remota que se desenvolveram durante a década de 90 começavam a dar fruto, com um aumento significativo de publicações que abordavam o uso de satélites na arqueologia. Por outro lado, o reconhecimento da tecnologia espacial como ferramenta de proteção e monitorização dos sítios arqueológicos e do património cultural começa a ser reconhecida por organizações governamentais e supragovernamentais como é o caso da UNESCO, que organizou uma série de programas e conferências com o objetivo de discutir e aplicar métodos de conservação não-invasivas a partir do espaço. O protagonismo dos Estados Unidos da América e da sua tecnologia espacial vai cedendo terreno a outras organizações como a ESA a partir dos anos 90, e mais recentemente com o virar do milénio, à China e aos seus programas espaciais e de deteção remota. De facto, a China tem-se

tornado um hospedeiro internacional de conferências e programas de detecção remota aplicada à arqueologia (Parcak, 2009, p. 32), colaborando com inúmeros investigadores e especialistas internacionais. O lançamento do satélite QuickBird II em 2001 forneceu aos investigadores uma plataforma ótica com capacidade submétrica, levando à publicação de estudos multiespectrais aplicados à arqueologia. Os investigadores italianos Rosa Lasaponara e Nicola Masini publicaram em 2005 um artigo (Lasaponara & Masini, 2005) que explora as capacidades do Quickbird II como ferramenta alternativa de prospeção em territórios logisticamente difíceis de trabalhar, chegando à conclusão que a utilização da técnica de fusão de dados aplicada à banda vermelha e pancromática, juntamente com um algoritmo de detecção de bordas, permitia fazer um mapeamento de estruturas arqueológicas a cotas negativas. Isto marca o início da utilização de imagens de satélite como ferramenta de identificação direta de edifícios à escala submétrica. Pela primeira vez, as imagens de satélite dispõem de resolução espacial suficiente para fazer frente à fotografia aérea como método de prospeção, e os reduzidos custos, aliados a uma visão sinóptica extensa começam a ser fatores aliciantes para os investigadores. Em 2007 os autores anteriores voltam a publicar (Lasaponara & Masini, 2007), desta vez recorrendo às capacidades multiespectrais do sensor do Quickbird II para fazer uma análise NDVI, com a intenção de identificar marcas de vegetação à superfície. O reconhecimento das possibilidades da análise multiespectral e da utilização de bandas de frequências abaixo do espectro de luz visível reforçou a importância dos sensores espaciais face às abordagens tradicionais de fotografia aérea, que seriam também capazes de produzir resultados semelhantes, mas apenas com recurso a equipamento fotográfico altamente especializado. No entanto, os custos associados à utilização do Quickbird II continuavam a ser maiores que a fotografia aérea tradicional (Lasaponara & Masini, 2007, p. 221). Em 2009 Sarah Parcak lança o seu importante livro introdutório *Satellite Remote Sensing for Archaeology*, que juntou uma linguagem acessível aos conceitos metodológicos básicos empregues no tratamento de imagens de satélite. A reportagem das suas descobertas por parte da BBC, através de documentários parcialmente vocacionados a um público leigo, permitiu a difusão das ideias fundamentais da arqueologia espacial pelo público interessado.

Em 2011 uma equipa liderada por Sandra Heleno publicou um estudo de interferometria de retrodifusores persistentes na zona de Lisboa para medir subsidência dos solos (Heleno et al., 2011). Apesar de não haver qualquer ligação com a arqueologia, é uma das pioneiras aplicações da metodologia de PSInSAR (*Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar*) em território nacional. Os autores já teriam iniciado o seu trabalho há alguns anos, pois estavam

integrados no projeto SUBSIn financiado pela FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia) em 2008. O PSInSAR teria, a partir desta altura, oficialmente penetrado a comunidade científica das engenharias no território nacional.

No mesmo ano, Lasaponara e Masini voltam a publicar (Lasaponara & Masini, 2011), desta vez fazendo um balanço da tecnologia espacial aplicada à arqueologia com considerações para o seu potencial no futuro. O aumento da resolução dos sensores, que se aproximam cada vez mais da qualidade da fotografia aérea, leva à possibilidade de desenvolver novas abordagens baseadas em aprendizagem-automática e deteção automatizada de elementos na paisagem. A capacidade submétrica de sensores pancromáticos, e mais recentemente dos sensores de radar de abertura sintética, permitem a monitorização de zonas arqueológicas em perigo de vandalização ou de escavação ilegal através da deteção de alterações na superfície, como crateras ou alterações súbitas da assinatura espectral.

Investigadores portugueses voltam a publicar um estudo de PSInSAR em 2014, novamente na zona de Lisboa (Roque, Fonseca, Henriques, & Falcão, 2014). Desta vez, a análise foi feita em zonas históricas para calcular os níveis de subsidência e posteriormente comparar com valores calculados por métodos tradicionais de nivelamento feitos na Praça do Comércio. Os resultados de abatimento medidos por PSInSAR estavam muito próximos das medidas de nivelamento tradicional, com uma divergência média de 1 milímetro por ano entre as duas abordagens.

Uma abordagem à base da deteção de alterações estruturais foi feita com sucesso na cidade de Homs na Síria e publicado no ano de 2015. A guerra civil que se desenrolou deixou marcas permanentes na cidade como consequência direta do conflito (Tapete, Cigna, Donoghue, & Philip, 2015). A comparação de imagens de radar que correspondem a datas que precedem e sucedem a guerra civil mostram as alterações causadas por explosivos à infraestrutura da cidade e aos edifícios de natureza civil, religiosa e cultural. Estas alterações estruturais manifestam-se diretamente como alterações na retrodifusão da onda eletromagnética, causando diferenças na intensidade do brilho dos difusores. A sobreposição das imagens anteriores com as imagens posteriores ao conflito, juntamente com a atribuição de cores diferentes, permite identificar facilmente regiões danificadas por crateras, estruturas e bairros desolados e outros marcadores destrutivos.

Os satélites equipados com sensores de radar de abertura sintética mostravam-se incapazes de ultrapassar uma resolução espacial de 1 metro, uma meta alcançada pelos sensores óticos já há algum tempo, até se dar a introdução do modo *Staring Spotlight* do TerraSAR-X. A identificação



de objetos de escala submétrica numa determinada cena tornou-se uma realidade e um passo importante para o campo da arqueologia, que lida constantemente com estruturas de escala reduzida. Brevemente após a introdução do novo modo de visada, foi publicado um artigo por Tapete e colaboradores (Tapete, Cigna, & Donoghue, 2016) que utilizou imagens de alta resolução do TerraSAR-X para estimar os danos causados por escavações ilegais em Apameia na Síria. As crateras causadas pelas escavações caóticas deixam formas circulares muito característica, identificáveis pelo comportamento da retrodifusão do feixe radar e dos efeitos de sombreamento. Aproveitando a sensibilidade do SAR à geometria, foi possível calcular a um mapa de textura das zonas afetadas pelas crateras, formando uma máscara de cor bem delimitada. Ao mesmo tempo, técnicas tradicionais de atribuição de cores individuais a cenas diacrónicas permite uma fácil inspeção visual de novos aparecimentos com base no realçamento de diferenças na intensidade de retrodifusão. Os autores salientam um problema ainda hoje sentido em relação a imagens SAR de resolução submétrica - o TerraSAR-X é a única plataforma que disponibiliza imagens de radar com esta resolução ao público, e o seu acesso comporta custos para o investigador ou, em alternativa, está dependente do estabelecimento de protocolos de colaboração.

Mais recentemente no ano de 2018, investigadores liderados por Chen (Chen et al., 2018) publicam uma síntese da tecnologia SAR aplicada à arqueologia, abordando novas metodologias experimentais como o TomoSAR (Tomografia por SAR) e a identificação de vestígios arqueológicos por microrelevo através da utilização de um MDT (Modelo Digital de Terreno) produzido por interferometria.

# Fundamento Teórico

Neste capítulo será feita uma revisão da teoria aplicada nos trabalhos efetuados durante o estágio. Esta leitura é determinante para que um investigador da área das ciências sociais seja introduzido às ideias principais presentes na área da deteção remota a partir de satélite aplicada à Arqueologia. De facto, esta área possui um grande nível de complexidade, em parte devido à sua natureza multidisciplinar, que concilia várias áreas de estudo diferentes. Podemos salientar que na deteção remota aplicada à arqueologia se faz uso extensivo das seguintes áreas:

- Geometria
- Física
- Telecomunicação
- Informática
- Fotografia
- Geologia

Será feita uma divisão em quatro temas principais: ondas eletromagnéticas, sensores fotográficos e imagem, radar de abertura sintética, e interpretação de imagens de satélite. A ordem foi escolhida com base na dependência de cada um dos tópicos sobre o anterior.

## Ondas eletromagnéticas

Uma onda eletromagnética é composta por um campo elétrico e um campo magnético, e a sua partícula elementar é o fóton, uma partícula subatômica que define o limite conhecido de velocidade no universo, devido à sua ausência de massa. Ondas e partículas eram consideradas entidades separadas nos modelos clássicos, um paradigma que se mostrou insuficiente em explicar o comportamento das ondas eletromagnéticas e outras partículas subatômicas, pois a luz comporta-se como ambos.

As ondas eletromagnéticas são consideradas ondas transversas, pois a oscilação, tanto da sua componente elétrica como magnética, é perpendicular à direção de propagação energética. Os seus campos elétricos e magnéticos oscilam de forma sincronizada, e estão também a um ângulo reto entre si.

Podemos descrever resumidamente os principais elementos da onda:

- **Fase** - A posição em que se encontra o ciclo da onda num determinado instante.
- **Período** - O tempo que a onda demora a repetir um ciclo.
- **Frequência** - O número de ciclos que a onda repete num segundo.
- **Comprimento de onda** - A distância entre ciclos.
- **Polarização** - Direção de oscilação do campo elétrico.

Como a luz viaja a uma velocidade constante no vácuo, a relação entre a frequência e o comprimento de onda é inversa - pois quanto maior a frequência, menor o comprimento de onda (Jordan, 1967, p. 185).

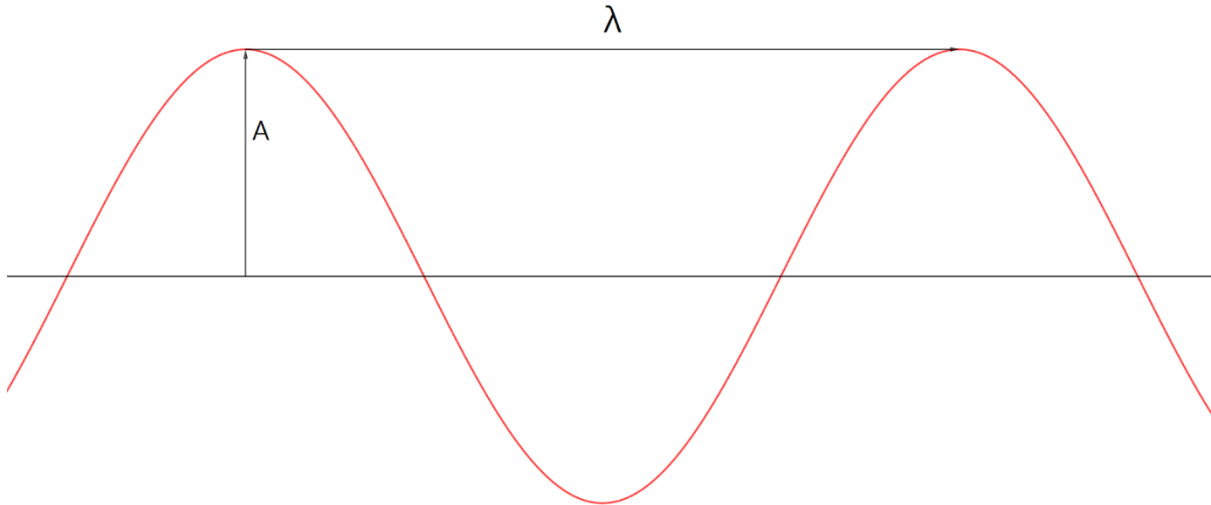


Figura 1.1 - Amplitude (A) e comprimento de onda ( $\lambda$ )

Uma revolução completa de uma onda sinusoidal equivale a  $2\pi$  radianos ou  $360^\circ$ , e este ciclo é representado em termos cronológicos pelo período ou pela frequência da onda, e em termos espaciais pelo comprimento de onda. O comprimento de onda tem correlação inversa com a frequência, pois quanto maior a frequência, menor será o comprimento de onda, devido à velocidade constante das ondas eletromagnéticas que obriga o comprimento de onda a encurtar à medida que se aumenta a velocidade de repetição da fase.

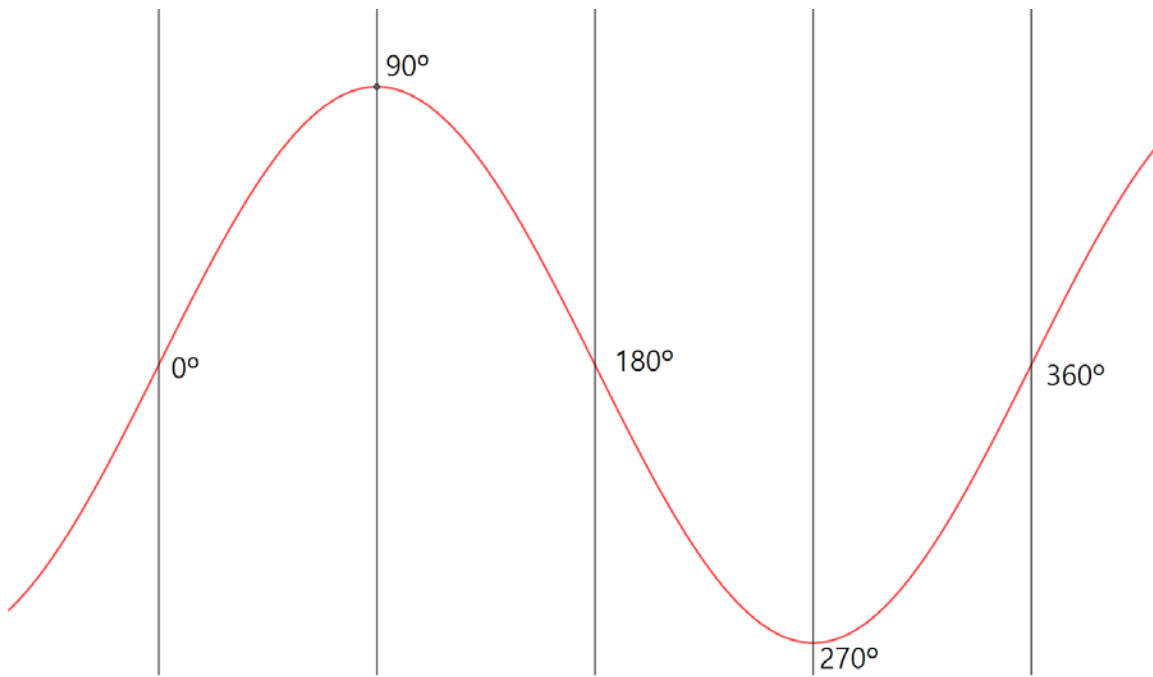


Figura 1.2 – Fase da onda expressa em graus

A polarização descreve a direção da oscilação do campo elétrico da onda eletromagnética (Jordan, 1967, p. 123). Esta pode ser em qualquer direção, e pode até mesmo possuir um movimento circular, como quando se combinam duas ondas de luz com polarizações opostas. A maior parte da luz que recebemos, vinda do Sol, não está polarizada. É possível transformar luz não polarizada em luz polarizada de várias maneiras, incluindo reflexão, refração e através de um filtro polarizador.

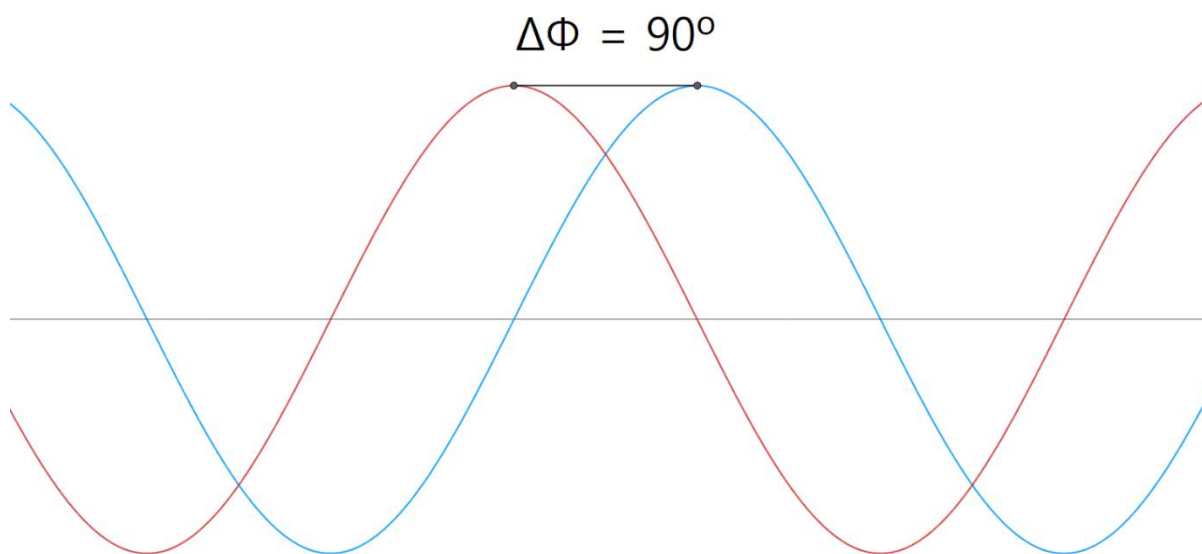


Figura 1.3 - Duas ondas  $90^\circ$  fora de fase

A escolha da polarização da onda eletromagnética em aplicações de radar é importante devido às diferenças no comportamento da retrodifusão da onda consoante os alvos na qual vai incidir. Uma combinação de polarizações diferentes pode ser utilizada no que se chama análise polarimétrica, de modo a conseguir uma diferenciação dos elementos à superfície consoante a sua interação diferenciada com ondas de polarizações diferentes. Esta abordagem acaba por ser limitada às capacidades polarimétricas do próprio sensor, que variam consoante o modo de aquisição. Sentinel-1, por exemplo, está limitado às polarizações VV e VH quando se trabalha com um dos modos de aquisição de mais alta resolução denominada *Interferometric Wide Swath* (Faixa Larga Interferométrica)

Ondas eletromagnéticas de intervalos de frequências (bandas) mais baixas têm, na maior parte das vezes, maior facilidade em percorrer grandes distâncias sem interrupção. Há certamente exceções, como é o caso de comprimentos de onda sensíveis à humidade (nuvens, vapor de água) ou a outros aerossóis, e estas particularidades podem ser exploradas pelo investigador

através de algoritmos, de forma a que consiga se extrair informações sobre, por exemplo, a qualidade do ar.

# Sensores Fotográficos e Imagem

## Formato *Raster* e *Vector*

As imagens em formato digital podem ser representadas principalmente de duas maneiras distintas: estas duas tipologias são o formato *raster* e o formato vetorial:

Gráficos *Raster* ou *Bitmap* (mapa de bits) representam uma imagem como uma matriz de pontos individuais chamados pixels. A quantidade de pixels contidos no eixo horizontal e no eixo vertical determina a resolução da imagem. Cada um destes pontos transporta consigo informação que determina, por exemplo, cor e transparência, e a quantidade de informação atribuída está determinada pelo chamado *bit depth* ou *color depth* (profundidade de bits/cor) dos pixels.

Gráficos *Vector* (Vetor) representam uma imagem através de pontos bidimensionais que estão interligados de forma a produzir figuras. Estas linhas transportam informações relativas à imagem, como cor, calibre e preenchimento, resultando numa imagem final completa e perceptível. A imagem vetorial é assim constituída por uma série de instruções matemáticas e geométricas, o que leva a que seja naturalmente escalável, ou seja, a amplificação da imagem não resulta em perdas ou degradação de informação face ao material original.

## *Bit Depth*

Quando se trata de qualidade de imagem, a resolução não é o único fator que devemos ter em conta. A profundidade de cor ou profundidade de informação (*Bit Depth*; *Colour Depth*) é também um elemento quantitativo que define os limites de captura do sensor. Essencialmente, a profundidade refere-se à quantidade de informação que pode ser contida em cada pixel. Esta quantidade é medida numa escala de bits, sendo o bit a unidade mais pequena de computação em sistemas informático. O bit é simplesmente um elemento binário que representa um de dois valores possíveis, normalmente representados por 0 e 1.

Isto significa que um pixel com profundidade de cor de 1 bit pode representar no máximo duas variações de cor possíveis ( $2^1 = 2$ ) enquanto que um pixel com profundidade de cor de 8 bits pode representar 256 cores possíveis ( $2^8 = 256$ ).

No entanto, uma imagem pode ser constituída por vários canais de cor, cada canal limitado a uma certa profundidade, para dar origem a uma imagem composta com uma profundidade total

exponencial. Uma imagem de 24 bits de profundidade de cor, considerada uma imagem de Cor Verdadeira (*True Colour*), é composta por três canais independentes de Vermelho, Verde e Azul (*Red-Green-Blue*; RGB) cada uma com 8 bits de profundidade. As possíveis combinações das 256 sombras de cada uma destas três cores dá origem a um total de mais de 16 milhões (16777216) de cores diferentes. Apesar de ainda haver um debate acerca da quantidade de cores discretas que o ser humano é capaz de distinguir, com estimativas entre aproximadamente 30 mil e 10 milhões (Masaoka, Berns, Fairchild, & Abed, 2013, p. 265), um investigador em concreto aponta para mais de 40 milhões numa publicação recente (Kuehni, 2016, p.6). A gama de 16 milhões de cores True Colour do modelo RGB de 24 bits é assim suficientemente grande para compreender pelo menos uma grande percentagem das cores visíveis a olho nu.

O espaço de cores RGBA é idêntico ao padrão RGB, mas possui um canal adicional denominado Alpha, que corresponde a informação referente à opacidade da cor. A adição deste canal de transparência de 8 bit resulta num total de 32 bit de informação em cada pixel.

Profundidades de cor mais baixas resultam, naturalmente, numa perda de informação cromática, mesmo que essa perda não seja perceptível aos nossos olhos. Uma profundidade de informação reduzida limita o potencial e a qualidade das imagens, pois grande parte da informação é desprezada de forma a que a adaptar às limitações técnicas do hardware, resultando em menor número de tonalidades. O fenómeno de formar artefactos visuais causados por profundidade de cor insuficiente é denominado *posterization*, e apresentam-se como a formação de bandas de cor, na qual o que deveria ser um gradiente contínuo de sombreamento de torna uma aparente separação discreta de cores.

Uma das vantagens de utilizar profundidades de informação/cor mais reduzidas é a conservação de espaço para armazenamento, pois o tamanho dos ficheiros torna-se mais reduzido devido à menor quantidade de informação guardada em cada pixel.

A maior parte dos computadores é incompatível com as imagens de 11 ou 12 bit que são utilizados por sensores modernos. De forma a contornar este problema, as imagens são convertidas ou num formato de 16 bit onde os bits restantes são preenchidos com 0, ou num formato de 8 bit que resulta na perda de informação.



Bit Depth	Número máx. de valores
2	4
4	16
6	64
8	256
10	1024
12	4096
14	16,384
16	65,536

Tabela 2 – Relação entre profundidade de bits e valores possíveis

## *Dynamic Range*

No campo da fotografia, o alcance dinâmico (*Dynamic Range*) é essencialmente um rácio de intensidade máxima e mínima de luz. O alcance dinâmico pode aplicar-se ao sujeito, na qual representa a variação de intensidade de luz numa determinada cena, ou ao sensor, na qual representa a grandeza da gama de diferenciação de intensidades de luz máxima e mínima.

As propriedades físicas do sensor que determinam o seu alcance dinâmico estão diretamente relacionadas com os seus fotorreceptores. Estas estruturas são elementos do sensor que são sensíveis à luz que capturam os fótons, permitindo gerar informação pictórica (Hinkler, Pedersen, Rasch, & Hansen, 2002) . Quanto maior for o tamanho destes fotorreceptores, maior será a gama de extensão do alcance dinâmico. Isto deve-se ao facto de fotorreceptores maiores terem a capacidade de capturar um maior número de fótons a níveis de ruído equivalentes a fotorreceptores mais pequenos, levando a uma relação de sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio*; SNR; S/N) muito mais favorável.

Quando um sensor atinge o limite máximo do seu alcance dinâmico, os fotorreceptores tornam-se saturados de fótons, levando à sua incapacidade de capturar mais. Por outro lado, o limite mínimo do alcance dinâmico está correlacionado com o patamar mínimo do sensor em conseguir diferenciar a informação do ruído, e quando se torna incapaz de o fazer, diz-se ter chegado ao fundo de ruído (*noise floor*).

Para produzir uma imagem, as máquinas fotográficas têm que converter fótons capturados em informação digital. Para isto, é necessário converter primeiro os fótons em corrente elétrica, através de um dispositivo chamado fotorreceptor. A conversão do fóton em corrente elétrica permite, por sua vez, a conversão da corrente elétrica produzida em informação digital através de um conversor analógico-digital (*Analog-to-Digital Converter*; ADC) (Debevec & Malik, 1997).

## Radar de Abertura Sintética (SAR)

O Radar de Abertura Sintética é um sistema de radar montado num veículo de forma a que a visada do sensor está configurada a ser na lateral. A antena sintética (ou sintetizada) é obtida através da transmissão pulsada de micro-ondas em direção ao alvo ao longo da trajetória de voo. O sensor depois recebe os ecos à medida que os pulsos eletromagnéticos são retrodifundidos (Bamler, 1999, p. 145), criando uma antena sintética com um comprimento equivalente à distância da trajetória na qual o alvo pulsado se manteve visível.

A correlação positiva entre a resolução e o comprimento da antena (Lee & Pottier, 2009, p. 9) obrigaria à utilização de antenas físicas de tamanhos pouco práticos para missões espaciais, no caso de se querer obter uma boa definição de imagem. A abordagem SAR resolve este problema ao gerar uma antena sintética (falsa) de grandes dimensões, com recurso a uma antena de dimensões reduzidas que se encontra em movimento. Esta abordagem permite, desta forma, obter imagens de alta resolução a partir do espaço (Linck *et al*, 2012a, p. 100).

Imagens de SAR de alta resolução permitem aos investigadores detetar elementos e estruturas que de outra forma seriam interpretados como ruído ou anomalias, especialmente quando se tratam de elementos pontuais como poços, covas ou cisternas (Gade & Kohlus, 2016, p. 5). O avanço tecnológico tem permitido um aumento constante da resolução dos sensores e uma diminuição do tempo de revisita dos satélites (Prati, Ferretti, & Perissin, 2010, p. 164). Isto é bom para a arqueologia, pois a resolução tem sido o obstáculo mais limitativo que a área tem enfrentado para conseguir uma completa incorporação da tecnologia espacial na sua metodologia (Chen, Lasaponara, & Masini, 2017, p. 1; Balz *et al.*, 2015, p. 528). Isto tem por base o facto de os elementos arqueológicos terem a tendência de serem sutis ou de uma escala demasiado pequena para serem detetadas pelos sensores dos equipamentos de satélite mesmo quando são reunidas todas as condições necessárias para extrair o máximo de informação possível de um determinado contexto. Existem certamente algumas exceções, que são de uma natureza mais monumental e paisagística, como é o caso dos indicadores indiretos de atividade humana, como uadis ou canais de irrigação, mas a vasta maioria da arqueologia permanece sob um véu de invisibilidade devido à sua escala. As capacidades do TerraSAR-X como ferramenta de prospeção arqueológica já eram aparentes desde o seu lançamento em 2007, devido à sua capacidade de produzir imagens de radar com 1 metro de resolução espacial (Linck *et al*, 2012a). Com o novo modo Staring Spotlight de 25 centímetros de resolução espacial, esse potencial torna-se ainda mais desenvolvido, devido à possibilidade de detetar estruturas que antes seriam

pouco nítidas e difíceis de identificar. Esta capacidade melhorada já se torna evidente na detecção de elementos arqueológicos pela identificação de anomalias na retrodifusão do feixe de radar (Chen, Lasaponara, Masini, & Yang, 2015, p.1).

O brilho de cada pixel numa imagem de radar corresponde à intensidade do eco da retrodifusão que resultou da interação da onda com o alvo. Vários fatores contribuem para a amplitude da onda retrodifundida, mas podemos agrupar em três grupos principais:

**Características do sistema** - Estão relacionadas com o sistema de radar, ou seja, com o veículo e com o sensor. Incluem características como a frequência do sinal, a polarização e a geometria de visada.

**Características da superfície** - Estão relacionadas com o ambiente e com os solos. Estão por norma fora do nosso controlo, e tendem a ser mutáveis com o tempo. Incluem fatores como vegetação, topografia, constante dielétrica, condutividade e humidade.

**Elementos da superfície** - Indicam as propriedades do solo e tendem a ser imutáveis com o passar do tempo. Incluem fatores como orientação, morfologia estrutural e rugosidade.

A capacidade de identificar elementos arqueológicas numa imagem de SAR é altamente dependente da qualidade da imagem em questão, nomeadamente da resolução e do rácio de sinal-ruído. Para que os elementos sejam bem definidos, tem que haver um contraste com os seus arredores, que vai depender do comportamento da retrodifusão da onda com o alvo (Chen, Lasaponara, & Masini, 2017, p. 4).

A humidade dos solos é um fator significativo para aferir o potencial de penetração da superfície por parte do radar. Inclusivamente, a porosidade do solo pode ser outro fator determinante devido à influência que pode ter no comportamento da onda incidente. A porosidade do solo é o fator que determina o volume de espaços que podem ser preenchidos por ar ou água num determinado volume de material, e é representado pela seguinte equação:

$$\varphi = \frac{V_v}{V_t}$$

em que  $V_v$  indica o volume do vazio e  $V_t$  indica o volume total do material. O resultado é sempre inferior a 1 e o valor pode ser multiplicado por 100 de modo a obter uma percentagem.

Testes na zona da Passagem de Yumen (Chen, Lasaponara, Masini, & Yang, 2015, p.1) mostram como condições de solo pouco favoráveis podem impedir quase por completo a penetração da onda eletromagnética. Alguns autores estimam que o grau de penetração para ondas de banda X que permitem a identificação de estruturas no subsolo ronda os 20 a 25 cm de profundidade em solos áridos sem vegetação (Linck *et al*, 2012a).

A prospeção geofísica tradicional com base em resistência elétrica requer solos húmidos de forma a permitir uma boa condutividade entre o solo e as estruturas cobertas, e por esta razão costuma ser feita em meses de precipitação mais elevada (Linck, Fassbinder, & Buckreuss, 2012b, p. 4). A abordagem SAR, por outro lado, requer solos mais secos, de forma a permitir a penetração das ondas de radar na superfície e evitar a absorção pela água (Albertz, 2009 cit. por Linck, Fassbinder, & Buckreuss, 2012b, p. 5).

A polarização possui um importante papel em sistemas de radar como aquele presente em sensores de satélite, que pode ser emitido em modo Vertical ou Horizontal. No entanto, pode ser feita uma abordagem mista, na qual a onda é emitida numa certa polarização, mas os recetores do satélite recebem o seu eco apenas na polarização ortogonal. Na abordagem tradicional, em que a emissão e receção da onda são feitas na mesma polarização, dá-se o nome de copolarização (co-polarization), e esta é normalmente representada como H-H (*horizontal emit, horizontal receive*) ou V-V (*vertical emit, vertical receive*). Quando trabalhamos com uma abordagem mista, em que a emissão e a receção são feitas ortogonalmente, dá-se o nome de polarização-cruzada (cross-polarization), e esta é normalmente representada como H-V (*horizontal emit, vertical receive*) ou V-H (*vertical emit, horizontal receive*).

As imagens de radar podem ser ortorretificadas com o auxílio de um MDT (Modelo Digital Terrestre). Existem várias opções disponíveis ao investigador quando este necessita de um MDT global ou semi-global, das quais algumas são de acesso livre enquanto que comportam custos de aquisição. O investigador tem que adequar a escolha do MDT aos objetivos do trabalho em questão, mas custos de acessos significativos limitam a grande maioria dos projetos aos MDT disponíveis de forma aberta. De entre estes MDT de acesso livre salientam-se três opções:

- SRTM Plus (SRTM V.3)
- Aster GDEM2
- ALOS World 3D

Existe um fator principal de diferenciação entre o SRTM e as duas alternativas listadas, que é o facto do SRTM ser um produto de interferometria de SAR, enquanto que o Aster GDEM e o ALOS são produtos de estereoscopia ótica. Esta grande diferença vai ter um impacto nas anomalias presentes nos produtos finais, que serão de natureza diferente devido às diferenças inerentes entre os sistemas de radar ativo e ótico passivo. Algumas assincronias presentes podem ser derivadas, por exemplo, do comportamento das sombras em áreas com elevação acentuada, ou da presença de nuvens.

O SRTM V.3 é a versão mais recente da missão SRTM, tendo sido aperfeiçoada para 1 arco-segundo (cerca de 30m de resolução) e calibrado mais profundamente de acordo com os dados disponibilizados pelo Aster GDEM 2. O facto de ser um produto radar permite um bom comportamento em zonas de cobertura vegetal densa devido à sua capacidade de penetração dos copados.

Para modelos digitais de mais alta precisão, os investigadores podem optar por duas alternativas - soluções comerciais ou soluções de tecnologia LIDAR.

Soluções comerciais incluem o recente projeto WorldDEM da Airbus Defence and Space produzida pelos satélites TerraSAR-X e TanDEM-X a partir de interferometria SAR de alta resolução, atingindo um nível de detalhe vertical abaixo de a 10 metros inserido num raster de 12 metros quadrados.

Caso as soluções comerciais não sejam apelativas, a única alternativa é a utilização de produtos LIDAR, que conseguem oferecer um nível de detalhe superior aos satélites. Normalmente, estes produtos são conseguidos por recurso a aeronaves equipadas com sensores LIDAR, e por este motivo têm uma cobertura geográfica extremamente limitada. Muitas vezes, estes dados são fornecidos de forma gratuita ao público por serem derivadas de projetos públicos. Esta tecnologia já foi aplicada às zonas costeiras do território Português, e é possível aproveitar áreas parciais de fronteira com Espanha que são abrangidas pelo levantamento castelhano. Exemplos de dados LIDAR disponíveis de forma gratuita ao público são o projeto 3DEP (*3D Elevation Program*) dos Estados Unidos da América e o *Environment Agency Lidar* que incorpora mais de metade do território do Reino Unido.

## Vantagens do SAR a partir do espaço

A prospeção geofísica é de grande importância na intervenção arqueológica contemporânea, especialmente em operações de grande escala, pois fornece aos investigadores a capacidade de localizar áreas de interesse de forma eficiente (Linck, Fassbinder, & Buckreuss, 2012b, p. 1).

Um levantamento a partir de dados de satélite pode ter várias vantagens em relação a abordagens mais tradicionais efetuadas *in situ*:

- Fornece resultados muito mais rápidos
- Abrange áreas muito maiores
- Permite uma melhor contextualização com a área envolvente
- Não apresenta obstáculos físicos
- Pode ser utilizado com segurança em áreas de perigo (Linck, Fassbinder, & Buckreuss, 2012b, pp. 1-2)
- Tem custos tendencialmente mais acessíveis

Como os sistemas de Radar e de Lidar fornecem a sua própria fonte de iluminação, é possível adquirir informação independentemente da hora do dia, sem que seja necessário depender da luz proveniente do Sol, e possibilita um ambiente mais controlado que garante uma menor vulnerabilidade às condições meteorológicas (Lee & Pottier, 2009, p.2). Ao contrário de sensores fotográficos convencionais que dependem da luz do Sol refletida nas superfícies, os sistemas de Radar e de Lidar emitem as suas próprias ondas eletromagnéticas que são posteriormente refletidas de volta ao sensor, tornando-os independentes de fontes externas de iluminação.

O valor que confere uma abordagem de deteção remota baseada em SAR como ferramenta de prospeção arqueológica está dependente do contexto ambiental na qual as evidências arqueológicas se encontram (Chen, Lasaponara, & Masini, 2017, p. 3):

- para regiões tropicais, a habilidade em penetrar nuvens pode tornar-se uma mais valia em contraste com a inaptidão das abordagens de deteção ótica em condições nebulosas.
- para regiões Mediterrâneas mais temperadas, a deteção de anomalias de origem antrópica pode ser feita com base na humidade e nas marcas de vegetação.

- em zonas áridas ou arenosas, a penetração dos solos e a deteção de estruturas a cotas negativas torna-se uma forte possibilidade.

Imagens produzidas a partir de ondas rádio são diferentes daquelas produzidas por sensores óticos, e permitem extrair informação diferente da fotografia tradicional. O radar tem, por exemplo, uma capacidade de penetrar objetos que se mostrariam ser, em contrapartida, obstáculos à luz visível, tal como é o caso das nuvens (Linck, Fassbinder, & Buckreuss, 2012b, p. 2). Ondas de rádio de bandas inferiores têm por sua vez uma maior capacidade de penetração. No entanto, existem fatores que podem pôr em causa ou limitar a habilidade das ondas rádio em penetrar obstáculos, tal como por exemplo propriedades da superfície dos alvos e a geometria de aquisição das imagens (Chen, Lasaponara, & Masini, 2017, p. 4).

O SAR, como sensor ativo, tem a capacidade de recolher informação a qualquer hora, seja dia ou noite. As suas micro-ondas têm também a capacidade de penetrar de forma limitada a vegetação ou o solo. O grau de penetração possível por sistemas SAR depende de uma série de fatores, que incluem características de superfície e tipo de material do alvo como também particularidades inerentes à onda eletromagnética emitida, como o comprimento de onda (Chen, Lasaponara, & Masini, 2017, pp. 1-3) ou o ângulo de incidência.

A capacidade do sistema SAR em trabalhar dia e noite reside no facto de ser um sensor ativo, emitindo a sua própria fonte de luz. Parte do pulso eletromagnético que é enviado pelo emissor é posteriormente refletido de volta ao sensor após atingir o alvo. A este comportamento damos o nome de retrodifusão (Chen, Lasaponara, & Masini, 2017, p. 3).

As aplicações da tecnologia SAR na área do património não se limitam apenas à identificação de estruturas arqueológicas no subsolo. Como ferramenta para o arqueólogo, os dados de SAR fornecem muitas contribuições diferenciadas ao estudo da arqueologia, tais como as informações associadas às paleopaisagens, paleoambientes, a deteção de sítios e contextos arqueológicos, e a monitorização e avaliação do estado de conservação de sítios patrimoniais e edifícios do património (Chen, Lasaponara, & Masini, 2017, p. 1). Uma abordagem de monitorização é conseguida através da comparação de cenas ao longo de uma diacronia alargada, ou seja, pela comparação de imagens de SAR de uma mesma área de interesse ao longo de diferentes aquisições.



## Geometria e órbitas

A Geometria dos sistemas de satélite é um aspeto fundamental a ter em conta, pois afeta diretamente o resultado final do processo de aquisição. Há um grande número de fatores a ter em atenção, e incluem aspetos como o ângulo de incidência, as distâncias ou linhas de base entre satélites, a direção da órbita do satélite, o alcance e azimute, e a largura de faixa.

Podemos realçar dois tipos de linhas de base importantes para a abordagem InSAR - a linha de base interferométrica e a linha de base perpendicular:

- A linha de base interferométrica (*interferometer baseline*) corresponde à distância entre as duas órbitas dos sensores utilizados na construção de um produto interferométrico.
- A linha de base perpendicular corresponde ao comprimento da projeção perpendicular entre duas linhas de visada

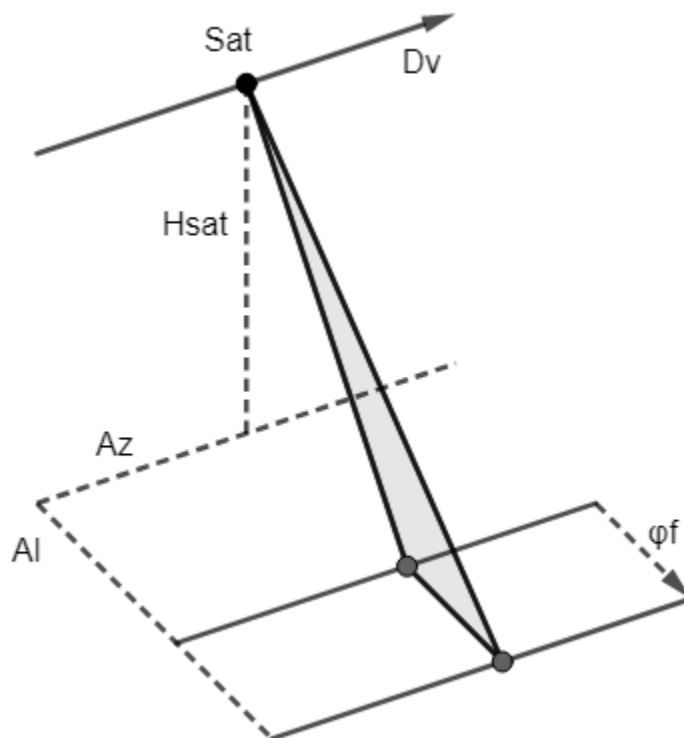


Figura 2.1 - Geometria do satélite I

Sat (Satélite); Dv (Direção de Voo); Hsat (Altura do Satélite); Az (Azimute); Al (Alcance);  $\phi f$  (Largura de Faixa)

O azimute refere-se à linha imaginária que se projeta na superfície e é perpendicular à direção de voo do aparelho. O alcance pode ser oblíquo, quando parte do sensor, ou terrestre, quando é projetado na superfície de forma perpendicular ao azimute. Os ângulos de visada e de incidência estão relacionados, e referem-se à geometria do feixe de iluminação produzido por sensores ativos.

De forma a que um satélite consiga permanecer numa órbita estável, é necessário que tenha uma velocidade suficiente para contrariar a força gravitacional da terra. À medida que o satélite sofre do atrito atmosférico, perde energia e velocidade, levando a uma perda de altitude. A velocidade mínima necessária para que o satélite se consiga manter numa órbita estável varia de acordo com a altura orbital, ou seja, a distância a que está do centro da Terra. Quando mais baixo for a altura orbital, maior será a velocidade requerida para consagrar estabilidade ao objeto. É por este motivo que os satélites a voar em órbitas terrestres baixas necessitam de manutenção constante de forma a evitar deterioração das suas órbitas. A deterioração orbital é um processo na qual há uma redução gradual da distância entre a Terra e o satélite em voo. Esta decadência é causada por fatores a que se dá o nome de perturbações, que correspondem a forças que influenciam a órbita Kepler matematicamente ideal do satélite (Hintz, 2015, p. 201). Estas forças podem ser de várias tipologias, como por exemplo as forças de gravitacionais causadas por outros corpos celestes como o Sol ou a Lua, variações na força gravitacional da Terra devido à sua esfericidade imperfeita, ou atrito atmosférico devido a uma órbita terrestre baixa (*Low Earth Orbit*, LEO).

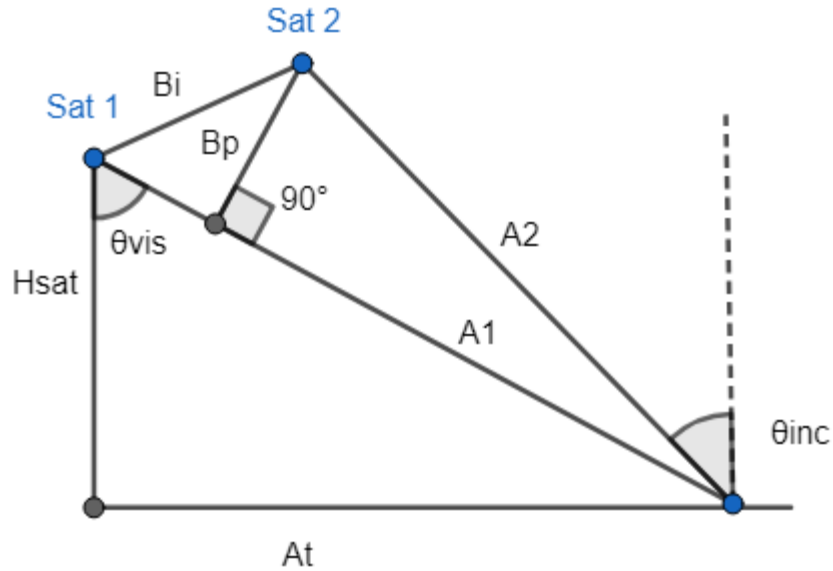


Figura 2.2 - Geometria de satélite II

Sat (Satélite);  $H_{sat}$  (Altura de Satélite);  $A_t$  (Alcance Terrestre);  $B_i$  (Base Interferométrica);  $B_p$  (Base Perpendicular);  $A$  (Alcance Ortogonal);  $\theta_{vis}$  (Ângulo de Visada);  $\theta_{inc}$  (Ângulo de Incidência)

A geometria de aquisição de um satélite não se mantém constante devido a alterações à sua órbita ao longo do tempo, causadas por fricção atmosférica ou outros fenómenos como ventos solares (Prati, Ferretti, & Perissin, 2010, p. 162). Em situações excepcionais, uma deterioração suficiente da órbita do satélite pode resultar em imagens mais nítidas devido à proximidade à superfície terrestre, como foi no caso do satélite Quickbird, já descomissionado, que conseguiu superar a sua resolução máxima de 0.61m para imagens pancromáticas na sua órbita final em dezembro 2014. A sua órbita deteriorou para os 300 Km altura, e foi possível uma aquisição final com uma resolução de 0.41m.

## InSAR

O radar é conhecido pelas suas capacidades telemétricas, ou seja, pela sua capacidade de identificar a posição de objetos dentro da sua linha de vista. Uma das técnicas mais simples de medir distâncias com o Radar é através do cálculo do tempo de voo - nesta abordagem mede-se o tempo entre a emissão do pulso de rádio e o regresso do seu eco. A velocidade da luz é constante e, sabendo o tempo de voo, calcula-se a distância ao alvo. No entanto existem técnicas que permitem medir com alta precisão a variação entre a distância do sensor e o alvo ao longo do tempo. Como as ondas eletromagnéticas produzidas por sistemas SAR são sinusoidais, sofrem de uma deslocação previsível da sua fase ao longo do tempo, permitindo que seja possível a medição telemétrica de distâncias com uma escala extremamente pequena, através da comparação da posição da fase entre diferentes aquisições. O InSAR é uma técnica de interferometria baseada na comparação da fase da onda eletromagnética entre diferentes aquisições, que podem ter sido feitas num mesmo instante ou em alturas diferentes, e que possuem geometrias e ângulos de visada ligeiramente diferentes entre si (Prati, Ferretti, & Perissin, 2010, p. 161). Sendo a interferometria um método de quantificação da divergência da fase entre duas visadas, a sua escala de medição e a sua sensibilidade estão diretamente correlacionadas com o comprimento da onda eletromagnética em estudo. No caso dos satélites contemporâneos equipados com sensores SAR, esta escala situa-se na ordem milimétrica. Isto deve-se ao facto das balizas de diferenciação de fase se situarem no início e fim de um ciclo de onda, com uma resolução que correspondente a uma fração do comprimento de onda total.

Um dos mais marcantes atributos da interferometria SAR é a sua capacidade de conjugar a alta precisão centimétrica ou milimétrica com grandes áreas de estudo. O tamanho destas áreas varia consoante o sensor com que trabalhamos, e também consoante o tipo de produto de radar que necessitamos, correspondendo diretamente à área que foi iluminada pelo sensor do satélite. Foi esta característica imbatível dos sensores espaciais em fornecer ao investigador uma vista aérea extensiva aliada com uma precisão submétrica que catapultou do InSAR no estudo e monitorização de fenómenos geológicos de emergência como a atividade vulcânica e sísmica e em estudos e análise de deslocação e instabilidade dos solos (Prati, Ferretti, & Perissin, 2010, p. 161).

Enquanto que o termo InSAR se decompõe num significado abrangente de *Interferometria SAR*, o termo é normalmente utilizado como referência a processos de construção de MDT a partir da conversão da fase da onda em informação altimétrica. Para trabalhos que envolvam a extração

de informação referente à deslocação e subsidência a partir da comparação da fase da onda, é vulgarmente utilizado o termo DInSAR (*Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar*), que enfatiza o significado do termo *diferencial* para indicar trabalhos que envolvam o cálculo das diferenças de fase ao longo do tempo que se traduzem em deformação da superfície (Weissgerber, Colin-Koeniguer, Nicolas, & Trouvé, 2017, p.2).

No DInSAR procede-se à comparação diferencial entre a fase de ondas em dois tempos discretos, ou seja, trabalha-se com imagens diacrónicas. Existe a abordagem mais simples que trabalha com apenas um par de imagens adquiridas em tempos diferentes numa órbita semelhante, a que se dá o nome de dupla passagem (*two-pass interferometry*). O resultado é um interferograma que apresenta as diferenças entre as fases das ondas através de uma gama de cores, que formam bandas correspondentes a movimentos numa escala de uma fração do comprimento de onda. A repetição de uma banda de cor representa a repetição de um ciclo de onda completo, que nos indica que a deslocação foi aproximadamente igual ao comprimento de onda utilizado. A deslocação é sempre calculada do ponto de vista do satélite, ou seja, não corresponde movimentos em eixos horizontais paralelos à superfície, mas sim a um afastamento ou aproximação da linha de vista do sensor (*line-of-sight*, LOS). Como o sensor está posicionado de forma lateral ao satélite, o DInSAR é pouco sensível a deslocamentos que se sejam paralelos ao percurso de voo do sensor, que no caso dos satélites Sentinel e TerraSAR corresponde a uma órbita quase-polar e heliosíncrona. Isto significa que deslocamentos no eixo Sul-Norte e Norte-Sul se tornam relativamente impercetíveis por serem paralelos à órbita polar.

Como no estudo interferométrico se trabalha quase sempre em relação a referências espaciais, uma das imagens radar é definida como *Master* (mestre) e a outra como *Slave* (escravo). A informação de fase da onda da imagem mestre é utilizada como ponto de referência para comparação com informação de fase da onda da imagem escrava.

Em relação à abordagem de dupla passagem, esta fornece dados de deslocação, mas não consegue extrapolar dados de aceleração que representem o aumento ou a diminuição da velocidade ao longo do tempo, pois partimos apenas da informação contida em dois momentos cronológicos específicos. Para calcular valores de aceleração, é necessário estudar uma série temporal (*time series*) que contém várias amostras de radar ao longo de um determinado período de tempo.

A solução a este problema está numa abordagem denominada empilhamento interferométrico (*interferometric stacking*), que requer necessariamente de um grande volume de imagens

(Pasquali et al., 2014), conseguindo fornecer ao investigador não apenas informações extrapoladas pelos pares interferométricos, como também dados relativos à aceleração da deformação superficial. Por outro lado, a compilação de um grande número de imagens de uma mesma área de interesse permite atingir uma nitidez melhor nas imagens de radar, devido a um aumento do rácio de sinal-ruído (*SNR*), através de um método simples de cálculo de média de intensidade dos pixéis. O empilhamento interferométrico abrange uma série de técnicas diferentes, na qual se inserem o PSInSAR (*Persistent Scatterer InSAR*), o SBAS (*Small Baseline Subset*) e outras técnicas derivadas.

Apesar de todas as suas virtudes, o InSAR sofre também de algumas limitações associadas à sua tecnologia. Um dos problemas imediatos é a chamada ambiguidade do ciclo (*Cycle Ambiguity*), que significa a impossibilidade de concluir, apenas a partir de dados da fase, a quantidade total de ciclos que a onda repetiu durante o seu percurso. Este problema pode ser resolvido através da técnica de desembrulho da fase (*Phase Unwrapping*), um procedimento aplicado aos resultados da interferometria antes da criação de um MDT (Modelo Digital de Terreno). O InSAR é também afetado pelos fenómenos de descorrelação, que são variações nas assinaturas de alvos que ocorrem por diferenças que se desenvolveram ao longo tempo passado entre duas aquisições (descorrelação temporal), ou por alterações na forma como o alvo vai afetar a onda consoante o ângulo de incidência (descorrelação geométrica) (Prati, Ferretti, & Perissin, 2010, p. 161). Tendo em conta que a geometria tem um efeito determinante na interação com o alvo, os valores das linhas de base tornam-se essenciais na construção de um produto interferométrico, pois influenciam o resultado da interferometria devido às variações na geometria de aquisição que produzem. As técnicas de empilhamento interferométrico tentam resolver os problemas de descorrelação de várias maneiras. O PSInSAR identifica retrodifusores estáveis ao longo de toda a diacronia da série temporal de imagens, e utiliza apenas estes retrodifusores persistentes para o cálculo de deformação e aceleração, e o SBAS gere um gráfico de pontos interconectados com linha de base reduzida de forma a mitigar a descorrelação geométrica.

A maior resolução e o menor comprimento de onda da banda X consegue fornecer resultados interferométricos comparativamente mais precisos em relação a sensores que utilizem as bandas de frequência L ou C, mas em contrapartida tem um pior comportamento em condições climáticas adversas, como por exemplo na presença de humidade.

A descorrelação do sinal por motivo temporal ou geométrico pode levar a problemas com os resultados da interferometria. Alterações bruscas na geometria da superfície, como é no caso de

superfícies instáveis, deslizamentos de terra ou presença de vegetação, leva a complicações na extração de dados fiáveis. Alterações atmosféricas, tais como alterações críticas na humidade da troposfera podem resultar em atrasos na fase da onda, pois o sinal demora mais tempo a percorrer a água do que o ar seco. Estas alterações na fase podem ser interpretadas incorretamente como mudanças à superfície, e tornam-se conseqüentemente uma das principais limitações do uso da interferometria em zonas tropicais.

A descorrelação temporal pode ser entendida como a mudança na coerência interferométrica da onda eletromagnética devido a alterações que afetem o alvo do feixe ao longo do tempo, como acontece no caso de haverem alterações na vegetação ou na estrutura dos solos ou de uma dada superfície. Este fenómeno leva a uma perda na nitidez e na precisão quando recorremos a abordagens que façam uso de passagens repetidas do sensor sobre o mesmo sítio em alturas diferentes. No entanto, certos elementos da paisagem têm a tendência de manter uma estabilidade necessária para provarem ser, muitas vezes, imunes a fenómenos de descorrelação temporal que possam ocorrer nas suas redondezas, como é o caso de edifícios, que conservam a sua visibilidade ao longo do tempo (Balz et al., 2015, p. 531).

A descorrelação geométrica ocorre quando a geometria de aquisição varia entre sensores, levando a uma diferença na perspectiva dos sensores para um mesmo alvo à superfície. Como consequência direta desta diferença geométrica, há uma alteração na fase e no tempo de chegada do eco do pulso eletromagnético.

A interferometria SAR permite a criação de MDT através do cálculo da diferença de alcance entre dois ou mais sensores e um alvo iluminado. Esta diferença manifesta-se em informações assimétricas relativamente à fase da onda, que permitem extrair dados relativos à elevação através da radargrametria. Esta assimetria pode ser calculada através de um único satélite, numa abordagem chamada passagem-repetida (repeat-pass), na qual a estereoscopia é conseguida artificialmente, pela pequena variação geométrica na órbita do satélite entre passagens sucessivas. Por outro lado, pode ser feito de imediato, através do uso de sensores em paralelo, à qual se dá o nome de passagem-única (single-pass) (Bamler, 1999, p. 146)

A vantagem de uma abordagem de passagem única (*single pass*) é a capacidade de fornecer informação altimétrica de forma instantânea sem necessitar esperar pela repetição da órbita do satélite. Por outro lado, pode fornecer resultados melhores pois não sofre de efeitos de descorrelação temporal e mudanças de atmosfera (Bamler, 1999, p. 147).

Mudanças na coerência do sinal podem ocorrer quando acontecem alterações na superfície do alvo iluminado. Rochas são bons exemplos de elementos que apresentam uma boa estabilidade, enquanto que outras superfícies como terra ou neve podem ser mais problemáticas. Nos contextos arqueológicos, estruturas que façam uso extensivo de pedra como *tumuli* ou fortificações podem ser cronologicamente conspícuas em imagens de radar de aquisições sucessivas. Isto deve ser tido em conta na análise de uma área na qual se espera encontrar vestígios arqueológicos (Balz et al., 2015, pp. 531-532).

A orientação do voo do satélite, ascendente em direção a Norte ou descendente em direção a Sul, pode afetar a visibilidade de elementos numa área de interesse devido à alteração da geometria da visada. Alguns elementos podem desta forma tornar-se invisíveis ou altamente impercetíveis na paisagem consoante a direção do voo. Um estudo arqueológico de estruturas funerárias nas Montanhas Altai (Balz et al., 2015, p. 530) exemplifica bem este fenómeno.

Uma linha de base entre sensores para aquisições diferentes é essencial para que se consiga ter uma noção de profundidade e deste modo efetuar a construção de um MDT através da radargrametria. Para a interferometria, é necessário corrigir esta deslocação geométrica para que se consiga um alinhamento adequado dos pixéis. Para isto recorre-se a uma técnica chamada correção (*coregistration*), que efetua o alinhamento das imagens de forma a que se consigam sobrepor. O método mais preciso recorre à utilização de órbitas precisas ou restituídas que fornecem dados altamente precisos das órbitas dos satélites que transportam os sensores. Caso as órbitas não estejam disponíveis, é possível recorrer a um método menos preciso de cruzamento de pixéis estáveis entre as duas imagens. Para os produtos Sentinel, órbitas restituídas são disponibilizadas quase de imediato, mas órbitas precisas demoram aproximadamente 21 dias a partir do momento de aquisição das imagens.

Deve-se ter também atenção à polarização dos produtos para processamento interferométrico, pois uma abordagem de polarização cruzada pode levar a problemas devido a diferenças no comportamento de retrodifusão entre diferentes polarizações.



## PSInSAR

O PSInSAR (*Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar*) é uma técnica de empilhamento interferométrico que consiste na identificação de retrodifusores estáveis, denominados difusores permanentes (Peltier et al., 2010, p. 1), de modo a conseguir extrair informações de alta precisão relacionadas com a subsidência dos solos em que os retrodifusores permanentes estão instalados. Os Difusores Permanentes são alvos terrestres que mantêm um alto nível de coerência derivada de uma geometria bem definida e uma alta estabilidade temporal (Pasquali et al., 2014, p. 234) e se mostram ser imparciais aos efeitos de descorrelação temporal e descorrelação espacial (Prati, Ferretti, & Perissin, 2010, p. 163). Podem possuir uma tipologia variada, desde rochas da paisagem a elementos antrópicos como antenas, telhados e barragens. A mudança da relação espacial entre estes difusores permanentes ao longo do tempo pode ser traduzido em deslocação do terreno na qual assentam, permitindo a identificação de movimento à superfície a uma escala milimétrica.

Candidatos a difusores permanentes (*Persistent Scatterer Candidates*; PSC) são selecionados para processamento de acordo com a dispersão da amplitude, que é um método de seleção baseada na estabilidade e intensidade da amplitude de retrodifusão ao longo do tempo. Esta premissa assenta na ideia de que o valor da amplitude está inversamente correlacionado com os efeitos de ruído na cena, pois em termos de escala, quanto maior a amplitude menor a significância do ruído (Osmanoğlu, Sunar, Wdowinski, & Cabral-Cano, 2016, p. 94).

A precisão dos dados respeitantes ao deslocamento dos alvos vai depender de uma série de fatores, na qual se incluem as seguintes:

- Número total de imagens
- Condições climáticas
- Densidade de pontos
- Distância ao ponto de referência
- Frequência e resolução do sensor de radar

Um número elevado de imagens permite obter um rácio de sinal-ruído superior da cena em estudo face a um número reduzido de amostras. Por outro lado, permite identificar difusores

permanentes que se mantêm estáveis durante um período de tempo maior, o que vai refletir a qualidade destes alvos como candidatos ao estudo interferométrico.

Investigação feita em território nacional mostra que a velocidade de deslocamento anual calculada a partir do espaço consegue ser altamente preciso quando comparado com estudos de nivelamento tradicionais, demonstrando uma diferença média entre abordagens de aproximadamente 1 milímetro por ano, para alvos com um alto grau de coerência de sinal (acima de 0,87) (Roque, Fonseca, Henriques, & Falcão, 2014, p. 291).

Apesar do radar ser reconhecido pela sua capacidade de ser utilizado em condições que seriam impossíveis para sensores passivos do espectro ótico, como a existência de nuvens, a falta de luz ou o clima não favorável, o SAR não deixa de ser ligeiramente afetado por condições atmosféricas, especialmente quando se trabalha com informação derivada da fase da onda. A humidade, por exemplo, causa atrasos de viagem na onda eletromagnética, o que se reflete num valor de fase alterado face a outra aquisição em tempo seco pouco nublado.

A densidade de pontos necessária vai depender do objetivo do estudo. Para a arqueologia, normalmente basta conseguir pontos que sejam diretamente relacionados com estruturas antrópicas. No entanto, é possível que o sensor não consiga identificar uma estrutura como ponto estável de retrodifusão, e nesse caso há duas soluções: ou se utiliza um sensor de maior definição (por exemplo, migrar do Sentinel 1 para o TerraSAR-X), ou então recorre-se à instalação de refletores nas zonas em que se pretende fazer a monitorização, pois oferecem a melhor estabilidade e brilho possível. Sensores que utilizam comprimentos de onda mais curta, como a banda-X do TerraSAR-X, permitem uma maior precisão e sensibilidade à deslocação dos alvos (Prati, Ferretti, & Perissin, 2010, p. 164). A utilização de sensores de resoluções mais altas, normalmente associadas ao uso de comprimentos de onda mais curtos, permite um potencial aumento da densidade de Difusores Permanentes numa determinada cena, especialmente em zonas com alta densidade de alvos antrópicos como estruturas. Estima-se que um aumento de resolução num fator de 10, resulta numa densidade de difusores permanentes 5 vezes maior (Prati, Ferretti, & Perissin, 2010, p. 169). Em contrapartida, há um aumento da sensibilidade a fenómenos de descorrelação temporal em zonas rurais quando comparado a abordagens que façam uso de bandas alternativas com comprimentos de onda maior, como no caso de frequências de banda L e C (Prati, Ferretti, & Perissin, 2010, p. 166).

A distância ao ponto de referência também pode, nalgumas situações, afetar a validade dos retrodifusores permanentes. Nestes casos deve-se escolher um GCP (*Ground Control Point*) o mais estável e próximo possível do local de estudo.

Na abordagem tradicional de Difusores Permanentes há a necessidade de identificar alvos estáveis que interfiram de forma coerente com a aquisição mestre, e ao mesmo tempo são temporalmente estáveis no percorrer de todo o intervalo de aquisição. Devido a este constrangimento, têm sido propostas alternativas de forma a relaxar as limitações do PS-InSAR. Um exemplo destas abordagens alternativas é o Small BAseline Subset (SBAS), que divide o portfólio de imagens SAR em subconjuntos com pequenas linhas de base e procede à sua interligação. Existem, no entanto, limitações a esta abordagem, sendo que por vezes se torna impossível aproveitar todas as aquisições numa única análise multi-temporal, levando a instantes de aquisição desconectados do gráfico final (Prati, Ferretti, & Perissin, 2010, p. 168).

A técnica de SBAS permite a combinação de múltiplos interferogramas de modo a melhorar a precisão e a qualidade da fase do sinal, e simultaneamente mitigar efeitos de descorrelação que possam haver, sejam de natureza temporal ou geométrica, levando ao aumento de pixéis coerentes disponíveis para análise (Confuorto, Plank, Novellino, Tessitore, & Ramondini, 2016, p. 232).

Devido ao facto da abordagem de PSInSAR necessitar de difusores permanentes temporalmente coerentes, uma análise de zonas pouco edificadas ao longo de diacronias mais compridas pode ser problemático devido ao curto tempo de vida dos pontos candidatos, levando à sua desqualificação como difusores permanentes na análise. Uma alternativa é a de utilizar pontos semipermanentes ou de média-vida como parte de análises interferométricas com múltiplas imagens mestre e prosseguir com uma estratégia de alvos parcialmente coerentes. Uma dada cena poderá conter múltiplos retrodifusores com um tempo de vida médio, mas com períodos de nascimento e de morte bem definidos, o que seria um fator desqualificativo para o PSInSAR, mas não para uma abordagem que combine difusores de duração de vida temporária, mas com boa coerência. Uma abordagem deste tipo, como no caso do SqueeSAR, permite combinar vários difusores temporários de forma a extrair informação relativa ao deslocamento do solo que engloba a área que ocupam (Prati, Ferretti, & Perissin, 2010, p. 168-169).

## Interpretação de Imagens de Satélite

Tendo em conta que as ondas rádio se comportam de forma variada conforme a superfície com que interagem, a interpretação das imagens que delas resultam não pode ser feita da mesma maneira que as imagens óticas tradicionais a que possamos estar habituados (Chen, Lasaponara, & Masini, 2017, p. 3).

### *Crop Marks*

A antropização da paisagem é um processo na qual ocorrem alterações na paisagem como consequência direta da atividade humana, sendo estas alterações por norma bastante súteis (Chen, Lasaponara, & Masini, 2017, p. 3), mas com o potencial de persistir no território ao longo do tempo, e a possibilidade de serem reconhecidas pelo olho treinado. A deteção destas anomalias, que produzem padrões na vegetação que cobre as superfícies do campo, continua a ser uma das mais eficientes formas de utilizar imagens de satélite na investigação e prospeção arqueológica com base na deteção remota.

As marcas de vegetação formam-se devido a incoerências na química dos solos, causado pela presença de estruturas ou pela alteração da composição dos próprios solos. A presença de muros, valas ou outras descontinuidades na morfologia dos solos traduz-se na alteração dos seus valores de nutrição e humidade (Chen, Lasaponara, & Masini, 2017, p. 3). Estes fatores resultam numa aparente heterogeneidade no crescimento e desenvolvimento das plantas, que pode ser detetado através da fotografia ou através de imagens de satélite.

A existência de estruturas enterradas afeta diretamente as capacidades de drenagem dos solos, resultando em marcas de humidade em zonas onde foram implantadas estruturas (Chen, Lasaponara, & Masini, 2017, p. 3). Estas marcas são visíveis nas imagens óticas na forma de alterações na cor, e nas imagens SAR como alterações na intensidade dos pixéis, devido às mudanças que ocorrem na retrodifusão da onda.

Quando se utilizam imagens multiespectrais para a deteção de arqueologia subterrânea ou marcas de vegetação, devem ser incorporadas todas as bandas de frequência disponíveis para análise, e devem inclusivamente ser analisadas tanto em conjuntos de cor falsa como de forma individual, devido à variabilidade da interação de alvos com diferentes comprimentos de onda. Tendo isto em conta, é seguro dizer que o infravermelho próximo (*Near Infrared*; NIR) é a banda

que mais consistentemente produz resultados com vegetação saudável (Lasaponara & Masini, 2007, p. 215), possuindo um comprimento de onda de 0.75–1.4  $\mu\text{m}$ .

A vegetação pode exibir uma assinatura espectral variável consoante a influência de diversos fatores, dos quais se destacam os mais graves - o stress e a patologia. Cultivos que estejam sob efeito da doença ou do stress tendem a apresentar uma assinatura espectral que se intensifica na refletividade da banda do vermelho (620–750 nm), o que leva a uma cor cada vez mais próxima do castanho para o olho humano. Em contrapartida, há uma diminuição da refletividade na banda do infravermelho próximo (750–1400 nm), levando a uma perda de brilho em imagens de satélite que sejam adquiridas com sensibilidade a neste comprimento de onda (Lasaponara & Masini, 2007, p. 215).



Figura 3 - Marcas de vegetação no sítio de Matabodes (Beja, Portugal)

A vegetação sobressai em imagens sensíveis à banda do infravermelho próximo porque as plantas saudáveis refletem uma grande quantidade de radiação incidente que corresponda a este comprimento de onda, quando a energia radiante atinge o mesofilo (Lasaponara & Masini, 2007, p. 215). Esta estrutura vegetal corresponde à zona mais interior dos tecidos, localizado entre as camadas superiores e inferiores da epiderme, e o mesofilo é a área responsável pela maior parte da atividade fotossintética que ocorre na planta. Isto é devido ao facto de o mesofilo conter a

mais alta concentração de cloroplastos, que são os organelos que regem a fotossíntese pelo uso de clorofila.

Outros métodos, que combinam dados que foram fornecidos por múltiplas bandas de frequências, podem ser utilizados para realçar a visibilidade das marcas de vegetação. O índice de vegetação de diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI), combina dados fornecidos pelas bandas vermelho e infravermelho próximo de modo a produzir um resultado final. A metodologia consiste em colocar em contraste a banda correspondente ao vermelho visível, que é altamente absorvida pela clorofila, com a banda de infravermelho próximo, que por oposição é altamente refletida pelo mesofilo (Masini & Lasaponara, 2006, p. 231). Estes valores são posteriormente normalizados de acordo com a seguinte equação:

$$NDVI = \frac{[NIR - RED]}{[NIR + RED]}$$

O NDVI serve de indicador indireto de numerosas variáveis que afetam o crescimento das plantas e o seu vigor, incluindo deficiências a nível de nutrientes e escassez de água. Pela sua natureza indireta, a análise NDVI muito dificilmente desvenda a causa primária de problemas associados aos cultivos (Govaerts & Verhulst, 2010, p. 1), mas serve sim de indicador da saúde geral das plantas. Para o arqueólogo o NDVI é útil porque tem a possibilidade de revelar a existência de algo (possivelmente vestígios arqueológicos imediatamente abaixo das plantas) que esteja indiretamente a afetar a vegetação, e que se revela na alteração da sua assinatura espectral. Um exemplo prático seria uma muralha imediatamente abaixo de um cultivo, que conseqüentemente limita às raízes o acesso a nutrientes devido à incapacidade de se aprofundarem satisfatoriamente. O oposto também se pode ter em conta, com a existência de uma fossa imediatamente abaixo do cultivo, que providencia as raízes das plantas imediatamente acima uma terra mais fácil de penetrar ou talvez mais rica em nutrientes ou material orgânico. Estas realidades teriam, se suficientemente consideráveis, um efeito nos resultados de uma análise NDVI, com uma aproximação ao valor 1 com um aumento de vigor, ou aproximação do valor de -1 com a perda de saúde da planta.

## *Pansharpening*

Em muitas situações, a fusão de dados pode ser a solução para obter imagens de satélite a cor de alta resolução. Isto é possível através da combinação de uma imagem pancromática de alta resolução com uma imagem multiespectral de resolução mais baixa. Isto permite aproveitar a clareza da imagem pancromática devido à sua resolução espacial mais precisa, e aproveitar a informação multibanda de diferentes comprimentos de onda da imagem multiespectral.

A fusão de dados, chamado em inglês *data fusion* ou *pansharpening*, é uma técnica que combina várias imagens de uma mesma área de modo a produzir uma única imagem composta, que beneficia de um nível de detalhe mais elevado (Masini & Lasaponara, 2006, p. 232). Normalmente este passo é conseguido através da combinação de uma imagem pancromática a escala de cinza com um nível de detalhe superior, com imagens multiespectrais de várias bandas correspondendo a diferentes comprimentos de onda (por exemplo, RGB - vermelho, verde e azul) de detalhe inferior. O resultado é uma imagem de alta resolução que exhibe ao mesmo tempo informação cromática (Lasaponara & Masini, 2007, p. 216).

A fusão de dados é muitas vezes necessária porque os sistemas de satélite têm que se conformar às restrições físicas de volume e às limitações de largura de banda. É muito mais difícil conseguir sensores que comportam soluções multiespectrais de alta resolução, do que sensores homólogos que portam soluções pancromáticas de alta resolução. Isto porque os sensores pancromáticos são sensíveis a uma largura de banda vastamente mais abrangente, e conseguem conseqüentemente receber uma consideravelmente maior quantidade de energia radiante dado um determinado tamanho de sensor. Também requerem um muito menor volume de dados do que os sensores multiespectrais quando comparados a uma dada resolução. Tendo estas observações em conta, é fácil de compreender como é simplesmente mais eficiente emparelhar imagens pancromáticas de alta resolução com imagens de várias bandas que transportam resoluções mais baixas (Zhang, 2004, p. 657).

Existem várias técnicas de fusão de dados, uma das quais se denomina substituição de componentes (*component substitution*). Aqui, procede-se a uma série de passos de forma a produzir uma imagem aperfeiçoada (Padwick *et al*, 2010, p. 1). As medidas aplicadas aos dados incluem as seguintes:

- superamostragem (*upsampling*)
- alinhamento (*alignment*)

- transformação anterior (*forward transform*)
- transformação posterior (*reverse transform*)
- emparelhamento de intensidade (*intensity matching*)
- substituição de componentes (*component substitution*)

O objetivo deste processo é o de transformar informação multiespectral em cores e consecutivamente sobrepô-la à informação pancromática em escala de cinza. Tradicionalmente recorre-se ao modelo aditivo de cores RGB, na qual são utilizadas as bandas correspondentes às cores vermelho, verde e azul. Isto permite uma aproximação da cena à cor natural, ou seja, aquela observada pelo olho humano.

Existem vários algoritmos para conseguir uma fusão de dados de imagem. Uma das mais simples é a conversão do espaço de cores RGB em HIS (*Hue-Intensity-Saturation*), na qual a intensidade do pixel é simplesmente um terço da soma de cada componente RGB, que pode ser representado pela seguinte função:

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B)$$

na qual I refere-se à intensidade final, R à banda correspondente ao vermelho, G à banda correspondente ao verde, e B à banda correspondente ao azul.

A principal vantagem a técnica HIS é o facto de tratar cada componente de forma discreta, ou seja, a alteração do valor de uma das componentes não afeta diretamente os outros. Apesar da sua simplicidade, a abordagem HIS possui algumas limitações. A intensidade resultante da conversão de RGB para HIS não é representativa da intensidade da imagem pancromática, levando a distorção cromática. Isto ocorre devido à utilização de bandas discretas de intervalos apertados para cada um dos componentes RGB, que podem não ter uma escala de comprimento de onda tão alargada como a banda pancromática.

Existem outras alternativas ao HIS que podem apresentar uma melhor calibração cromática, como por exemplo o HCS (*Hyperspherical Color Sharpening*), que é compatível com múltiplas combinações de bandas (Padwick *et al.*, 2010, p. 2) e tem uma melhor precisão cromática e espacial do que a abordagem HIS, mas é baseado em algoritmos muito mais complexos.



## Filtragem de imagens

A filtragem de manchas (*Speckle Filtering*) é uma técnica baseada em algoritmos matemáticos que permite uma redução de manchas de ruído em troca de uma perda parcial de definição de imagem. Os resultados variam consoante o algoritmo utilizado, especialmente no que consta à preservação de elementos lineares e cantos. Esta particularidade pode ser um fator importante a ter em consideração para contextos arqueológicos devido à natureza linear e geométrica de construções antrópicas. Desta forma, a utilização de um filtro que tenha um mínimo de interferência com cantos e arestas de estruturas pode facilitar a extração visual de elementos por parte do investigador, se a redução de definição da imagem não se provar ser um fator limitativo. Alguns dos filtros mais utilizados são:

- Boxcar
- Median
- Frost
- Gamma Map
- Lee
- Lee Sigma

Podem ser aplicados filtros multi-temporais, que consistem na utilização de uma série de imagens de radar sobre uma mesma área de interesse, permitindo um aumento do rácio de sinal-ruído, resultando numa menor perda de informação e em contrapartida na preservação de elementos na imagem de radar.

# Produtos de Satélite

## Sentinel 1

### Level 0

Dados de radar comprimidos e desfocados (não processados), não destinados a utilizadores comuns.

### Level 1

Disponíveis nas variedades SLC (*Single Look Complex*) e GRD (*Ground Range Detected*), é o nível de processamento mais adequado para a maioria dos utilizadores e finalidades.

As imagens em formato SLC conservam informação relativa à fase da onda, mas estão projetadas em alcance oblíquo devido à geometria de visada do sensor. Imagens SLC são utilizadas em análises interferométricas como no caso do PSInSAR.

A variedade GRD fornece imagens com correções geométricas com base na elipse terrestre, e são apresentadas com pixéis equidistantes de formato retangular projetadas sobre a superfície. O processamento adicional leva a uma perda de resolução espacial.

### Level 2

Estes produtos são destinados a estudos oceanográficos e fornecem informação associada às correntes de água e ventos marítimos.

## Sentinel 2

### Level 0

Este produto corresponde ao nível de processamento mais baixo e não é disponibilizado aos utilizadores finais. Corresponde a uma imagem comprimida em formato ISP (*Instrument Source Packet*) acompanhado de metadados.

## Level 1-A

Este produto não está disponível aos utilizadores finais. É o resultado da descompressão do produto Level 0 e da georreferenciação dos pixéis da imagem.

## Level 1-B

Este produto não está disponível aos utilizadores finais. É composto por um conjunto de mosaicos com um tamanho de 25 x 23 km com correções radiométricas.

## Level 1-C

O produto de mais baixo nível de processamento disponível aos utilizadores finais. Consiste numa série de mosaicos ortorretificadas com uma área de 100 x 100 km<sup>2</sup>. A transformação em geometria cartográfica é efetuada através da utilização de um MDT (Modelo Digital de Terreno). As cores são calibradas de modo a representarem uma visada TOA (*Top Of Atmosphere*), ou seja, as são ligeiramente distorcidas comparativamente com uma visada abaixo da linha de atmosfera.

## Level 2-A

Disponível desde 28 de março de 2017 (data de aquisição) diretamente do repositório da Copernicus, o produto de nível 2 é um produto de nível 1 na qual foram aplicadas correções atmosféricas, terrestres e de nuvens cirro. Estes parâmetros permitem uma correção da cor da imagem e a remoção parcial de nuvens, de forma a simular uma vista da terra em baixa atmosfera. Sem estas correções, a imagem seria afetada por uma tonalidade azul característica de pontos de vista a partir da alta atmosfera. As nuvens cirro são detetáveis através da banda 10 (1375 nm) do Sentinel 2, que não fornece informação relativamente à superfície e é consequentemente usada como máscara de omissão.

Resolução Espacial (m)	Banda	S2A		S2B	
		Comprimento de onda central (nm)	Largura de Banda (nm)	Comprimento de onda central (nm)	Largura de Banda (nm)
10	2	496.6	98	492.1	98
	3	560	45	559	46
	4	664.5	38	665	39
	8	835.1	145	833	133
20	5	703.9	19	703.8	20
	6	740.2	18	739.1	18
	7	782.5	28	779.7	28
	8a	864.8	33	864	32
	11	1613.7	143	1610.4	141
	12	2202.4	242	2185.7	238
60	1	443.9	27	442.3	45
	9	945	26	943.2	27
	10	1373.5	75	1376.9	76

Tabela 3 – Bandas disponibilizadas pelo sensor do satélite Sentinel 2

# TerraSAR-X

O sistema TerraSAR-X fornece quatro tipos de produtos baseados na projeção geométrica e na representação dos dados: *Single Look Slant Range Complex* (SSC), *Multi Look Ground Range Detected* (MGD), *Geocoded Ellipsoid Corrected* (GEC) e *Enhanced Ellipsoid Corrected* (EEC) (Airbus Defence and Space, 2015, pp. 8-10).

## SSC – Single Look Slant Range Complex

Sendo o produto mais básico, o SSC consiste numa imagem derivada do feixe de radar focado, obtido através do processamento de dados brutos. O produto SSC é o tipo de produto SAR que contém a maior resolução espacial, a maior largura de banda e inclusivamente conserva informação complexa correspondente à amplitude e à fase da onda eletromagnética. A informação contida no produto SSC que está associada à fase da onda permite que seja um produto adequado a um posterior tratamento para aplicações interferométricas e polarimétricas. Por outro lado, sendo o produto de mais baixo nível de processamento, o utilizador pode evitar potenciais artefactos radiométricos que podem ser introduzidos com níveis de processamento superiores. Num produto SSC, os pixéis são apresentados de forma equidistante em azimute, que depende do intervalo de repetição entre pulsos de emissão da onda eletromagnética por parte do emissor do satélite, e também se encontram equidistantes em alcance oblíquo, que depende da frequência de amostragem do sinal.

As imagens fornecidas neste formato são frequentemente afetadas por problemas graves de ruído, e são difíceis de interpretar sem recurso a pós-processamento e correção geográfica. Parte desta dificuldade em interpretar as imagens reside no facto de estarem projetadas em alcance oblíquo, pois as distâncias relativas ao alvo são obtidas relativamente à antena. Devido ao posicionamento da antena SAR, que se encontra na perpendicular em relação ao percurso do voo do satélite, existe um efeito de distorção na perspetiva do alcance da onda, que se apresenta como um alongamento dos pixéis à medida que se distanciam da antena. Este fenómeno é resolvido através da correção geométrica dos pixéis para um plano de superfície terrestre.

## *MGD – Multi Look Ground Range Detected*

Um produto MGD é obtido através do processamento de um produto SSC, que foi subdividido em múltiplas visadas e reprojetoado sobre uma matriz de superfície. Assim, os pixéis do produto MGD são equidistantes tanto em azimute como em alcance, tornando a interpretação mais intuitiva ao olho humano. A conversão dos pixéis de alcance oblíquo em alcance terrestre é conseguida através da utilização da elipse de referência WGS84 (WGS 1984; EPSG:4326) e do uso de uma elevação média de superfície. Tendo sido dividido proporcionalmente em múltiplas visadas e posteriormente processado, o produto MGD sofre de menor ruído quando comparado com um produto SSC. Em contrapartida, há a perda de alguma nitidez, que se reflete numa resolução espacial ligeiramente comprometida.

## *GEC – Geocoded Ellipsoid Corrected*

Um produto GEC é um MGD a qual foram aplicadas correções correspondentes à elipse terrestre. Deste modo, pode ser fornecido nos sistemas de coordenadas UTM (Universal Transversal Mercator) e UPS (Universal Polar Stereographic). A principal vantagem do produto no formato GEC é a capacidade de permitir que o observador se oriente rapidamente no contexto espacial do sítio. Em termos de precisão, produtos em GEC fornecem resultados satisfatórios em superfícies com pouca elevação, mas terrenos com elevação significativa ou variável podem apresentar alguns problemas devido ao facto de ainda não ter sido aplicada correção de altimétrica.

## *EEC – Enhanced Ellipsoid Corrected*

O produto em formato EEC representa o mais alto nível de processamento disponível de imediato ao utilizador para imagens do TerraSAR-X. Corresponde a um produto GEC à qual foi aplicada ortorretificação através do uso de um MDT (Modelo Digital de Terreno) externo. Desta forma é garantida aos pixéis uma precisão geográfica maior, especialmente em zonas com elevação complexa ou significativa. O grau de precisão possível está correlacionado com a resolução do MDT utilizado na ortorretificação, e também no ângulo de incidência do feixe radar.

<b>Modo de Aquisição</b>	<b>Área (km)</b>	<b>Res. Alcance Oblíquo (m)</b>	<b>Resolução de Azimute (m)</b>	<b>Polarização</b>	<b>Ângulo de Desempenho Total</b>
<b>Staring SpotLight (ST)</b>	4 x 3.7	0.6	0.24	Single (VV, HH)	20° a 45°
<b>HighRes SpotLight 300 MHz (HS300)</b>	10 x 5	0.6	1.1	Single (VV ou HH)	20° a 55°
<b>HighRes SpotLight (HS)</b>	10 x 5	1.2	1.1	Single (VV, HH)	20° a 55°
			2.2	Dual (HH & VV)	
<b>SpotLight (SL)</b>	10 x 10	1.2	1.7	Single (VV, HH)	20° a 55°
			3.4	Dual (HH & VV)	
<b>StripMap (SM)</b>	30 x 50	1.2	3.3	Single (VV, HH)	20° a 45°
	15 x 50		6.6	Dual (HH & VV, HH & HV, VV & VH)	
<b>ScanSAR (SC)</b>	100 x 150	1.2	18.5	Single (VV, HH)	20° a 45°
<b>Wide ScanSAR (WS)</b>	270 x 200	1.7 - 3.3	40	Single (VV, HH, HV, VH)	15.6° a 49°

Tabela 4 – Modos de aquisição disponíveis no satélite TerraSAR-X

# Casos de Estudo

Durante o período de estágio na empresa THEIA, foram elaboradas diversas atividades experimentais com o objetivo de testar a viabilidade de produtos baseados em novas tecnologias aplicadas à área da arqueologia e do património. Sendo uma empresa que fornece variados tipos de serviços, a experiência de trabalho foi plural e inserida em diversas áreas de trabalho. Podemos agrupar as atividades em três temas principais:

- Utilização de tecnologia espacial para monitorização do património
- Reconstrução Virtual de património histórico e cultural
- Modelação 3D, fotogrametria e varrimento *laser*

Como estagiário, a minha responsabilidade principal foi de averiguar o potencial de tecnologia espacial aplicada à arqueologia e a sua potencialidade como produto de mercado. Por outro lado, também me foram transmitidas responsabilidades de assistência na prestação de serviços com base na fotogrametria, e na reconstrução virtual de vários sítios do património em motores de videojogo em conjunto com tecnologia de realidade virtual.

## Tecnologia de satélite como método de prospeção

A primeira abordagem tida na empresa em relação à tecnologia espacial aplicada à arqueologia foi a de testar o potencial de sensores de radar apoiados por sensores óticos na prospeção de deteção de sítios arqueológicos em diferentes contextos. As capacidades da tecnologia de satélite na prospeção arqueológica já foram bem documentadas na bibliografia (Chen *et al*, 2017), com estudos feitos principalmente em zonas de solo hiperárido como no caso do Próximo Oriente (Linck *et al*, 2012a). Estudos feitos com recurso a tecnologia ótica no contexto europeu também mostram o potencial para a identificação de zonas com potencial arqueológico através de marcas de vegetação, mas abordagens com recurso a radar são mais escassas devido principalmente à conhecida dificuldade de penetração de ondas de radar em solos húmidos ou cobertos em vegetação, especialmente para bandas de frequências mais altas como a banda X.

Tendo isto em conta, foi decidido testar imagens de satélite do aparelho TerraSAR-X em modo *Staring Spotlight* com resolução máxima de 25 cm em diversos sítios na qual já se sabia existir elementos arqueológicos através de outros métodos de deteção remota como a magnetometria



ou GPR. O objetivo do estudo seria de identificar a capacidade de penetração da banda X em diferentes solos e comparar os resultados com métodos mais tradicionais de detecção remota. Para ter acesso às imagens de radar alta resolução foi feito um protocolo com a Airbus Defence and Space. A Airbus Defence and Space comprometeu-se a fornecer um total de 6 imagens de TerraSAR-X em modo *Staring Spotlight* para atividades de investigação e desenvolvimento, e a THEIA estaria encarregue de trabalhar com estes dados e fornecer os resultados da sua análise.

Como seria necessário definir uma área de interesse específica para cada aquisição de satélite, foi elaborado um guia de critérios que se achavam importantes para o estudo preliminar:

1. O sítio arqueológico já teria sido estudado por outros métodos de detecção remota, sejam de natureza geofísica ou fotográfica.
2. Os métodos anteriores revelaram potenciais estruturas ou elementos arqueológicos debaixo da superfície.
3. Os sítios não podem ter cobertura vegetal densa ou copado florestal.
4. Os sítios devem ter preferencialmente diferentes tipos de solo.
5. O contexto geográfico deve ser plural.

O primeiro ponto permite que se faça uma comparação dos métodos de satélite com outros métodos mais comuns de prospeção arqueológica. Os métodos de prospeção geofísica podem ter custos elevados, e a utilização de imagens de satélite teria o potencial de servir de alternativa de custo reduzido face aos métodos tradicionais. Por outro lado, abdica de problemas associados à logística, pois não há necessidade de se estar presente no local para se fazer a prospeção.

O segundo ponto reflete a necessidade de saber da existência preliminar de estruturas no local em que se faz a prospeção por satélite, de modo a permitir a comparação dos resultados com os métodos de geofísica, e permitir reconhecer o aspeto de estruturas arqueológicas ou outras marcas nas imagens de radar.

O terceiro ponto é de grande importância devido à incapacidade das ondas de rádio de banda X em penetrar vegetação densa e copado. Mesmo a existência de vegetação rasteira pode afetar de forma negativa os resultados, mas é complicado encontrar sítios com potencial que não sejam afetados por este tipo de cobertura vegetal, especialmente em contextos europeus.

O quarto e o quinto ponto refletem o nosso interesse em compreender a interação das ondas de banda X em diferentes tipos de solo. Como foi referido, já foram feitos estudos em solos hiperáridos, mas o comportamento do SAR em solos mais difíceis não está bem definido no campo da arqueologia. Em solos secos e arenosos, é previsível uma boa capacidade de penetração de até vários centímetros, mas em solos húmidos e finos é difícil prever os resultados. Em solos limosos, é expectável que se tenha uma capacidade de penetração reduzida (Boverie, Brock, Doerry, 1994, p. 4).

## Lista de sítios

Com base nos critérios anteriores, foi elaborada uma lista de sítios com potencial para testar as capacidades de SAR em banda X, seguido de uma breve descrição de cada local. Toda a informação derivada da classificação dos solos no Reino Unido foi resgatada da carta dos solos disponível no portal online UKSO (*United Kingdom Soil Observatory*).

Sítio	Local	Período	Coordenadas
Mata Bodes	Beja, Portugal	Romano	38°4'14.48"N, 7°53'46.29"W
Tourega	Évora, Portugal	Romano	38°30'6.86"N, 8°1'41.32"W
Troia	Grândola, Portugal	Romano; Medieval	38°29'10.35"N, 8°53'5.20"W
Verulamium	Hertfordshire, Reino Unido	Romano	51°45'12.75"N, 0°21'33.37"W
Ashwell End	Hertfordshire, Reino Unido	Idade do Ferro, Romano; Medieval	52°2'45.59"N, 0°9'59.33"W
Chisbury	Wiltshire, Reino Unido	Idade do Ferro	51°23'31.34"N, 1°36'4.68"W
Durobrivae	Cambridgeshire, Reino Unido	Romano	52°33'30.51"N, 0°20'52.38"W
Hogshaw	Buckinghamshire, Reino Unido	Medieval	51°53'46.88"N, 0°55'45.45"W
Al-Rawda	Distrito de Hama, Síria	Idade do Bronze	35°10' 51.6" N, 37°37' 58.8" E

Tabela 5 – Lista de sítios propostos para estudo

### Verulamium

Cidade romana fundada nas terras da tribo *catuvellauni*. Encontra-se parcialmente escavada, no entanto a sua importância histórica revela-se na presença de vários edifícios de carácter público, como o fórum, a basílica e o teatro. Estes edifícios sofreram danos, durante o período romano, devido a dois incêndios, e a cidade sofreu várias fases de reconstrução até ter sido abandonada durante a primeira metade do século V (White, 2018).

Prospecção geofísica do local, efetuada em 2016 e 2017, revela várias estruturas complexas e com múltiplas divisões, e também uma série de fossos dispostos de forma alinhada ("Verulamium | Sensing the Iron Age and Roman Past: Geophysics and the Landscape of Hertfordshire", 2018).

**Solos:** boa drenagem, ligeiramente ácidos, mas ricos em bases.

### Ashwell End

Em 2002 foi encontrado nesta zona, um sítio de culto religioso de época romana à qual estava associado um depósito de carácter votivo, composto por uma série de objetos de metais preciosos, datados do século III e IV d.C. (Jackson *et al*, 2018). Nas redondezas deste templo foi feita prospecção geofísica, que revelou possíveis marcas características de uso de arado medieval não-reversível em percurso de sentido horário (*ridge and furrow*), estruturas retangulares de período romano, e estruturas circulares da Idade do Ferro ("Ashwell End | Sensing the Iron Age and Roman Past: Geophysics and the Landscape of Hertfordshire", 2015).

**Solos:** boa drenagem, ricos em cal, com textura equilibrada.

### Chisbury

Um monte fortificado que contém uma capela do século XIII, e cuja prospecção geofísica revelou nas suas redondezas uma série de alinhamentos paralelos e o que aparentam ser pequenas fossas e estruturas circulares que correspondem à Idade do Ferro ("Chisbury | Sensing the Iron Age and Roman Past: Geophysics and the Landscape of Hertfordshire", 2017).

**Solos:** fraca drenagem, ligeiramente ácidos com textura equilibrada ou argilosa.

### Hogshaw

Aldeia medieval associada à Ordem de São João, documentada no censo de *Domesday*. Sabe-se da existência de uma igreja construída por volta dos finais do século XII, que foi demolida

mais tarde em 1730. Hogshaw terá sido abandonado nos finais do século XV para ser transformado num espaço de pecuária. Prospeção geofísica e de satélite mostram anomalias associadas a estruturas presentes na zona ("Hogshaw, Bucks", 2015).

**Solos:** drenagem lenta, sazonalmente húmidos, ácidos e de textura equilibrada (*loam soils*).

### **Durobrivae**

Inserido no antigo território da tribo Corieltauvi, Durobrivae foi durante a época romana um povoado muralhado construído nas proximidades de um forte (*castrum*) que servia de ponto de controlo entre vias. A sua importância é aparente por ser um centro de produção de um tipo de cerâmica de luxo, cuja tipologia é conhecida pelo nome Nene Valley Colour Coated Ware (NVCC) ("Durobrivae", 2017).

**Solos:** boa drenagem, ligeiramente ácidos, mas ricos em substâncias alcalinas.

### **Matabodes**

O sítio de Matabades é localizado no distrito de Beja em Portugal. É caracterizado por uma mancha de ocupação visível através de fotografia aérea ou por imagem ótica de satélite. Com base nos vestígios arqueológicos presentes à superfície, pensa-se ser de período romano, possivelmente de natureza militar (fortificação), e possui uma área de cerca de 1 hectare (Portal do Arqueólogo, 2018).

### **Al-Rawda**

O sítio arqueológico de Al-Rawda, localizado na Síria, foi escavado por uma equipa franco-síria com primeiras intervenções em 2002. Prospeção geofísica do local revelou uma complexa estrutura urbana de natureza circular enquadrada na Idade do Bronze Antigo. Estudos arqueológicos indicam que o povoamento seria de natureza multifuncional, satisfazendo as necessidades defensivas, residenciais, económicas e religiosas da população local (Gondet & Castel, 2004).

## Resultados

Devido a questões geopolíticas e de segurança, a utilização de imagens de alta resolução em zonas de risco foi impedida pela legislação alemã que regulamenta a Airbus Defence and Space. Seria possível um apelo, mas não havia garantias de execução do pedido. Por este motivo, o sítio candidato de Al-Rawda na Síria foi excluído da lista numa fase posterior. Devido ao constrangimento do número de imagens, foram selecionados três sítios para serem analisados: Matabodes, Verulamium e Ashwell End.

### Matabodes

Para o sítio arqueológico de Matabodes, as imagens de radar não apresentavam sinais evidentes de elementos arqueológicos no subsolo. Já se sabia, no entanto, da existência de uma estrutura arqueológica abaixo do solo através de imagens óticas. Veio-se posteriormente saber que a causa da invisibilidade desta estrutura estava associada à presença de uma cultura agrícola na superfície (provavelmente de tipo cereal) numa imagem de satélite de alta resolução mais atualizada correspondendo à data de 23 de abril de 2018, disponível no Google Earth.

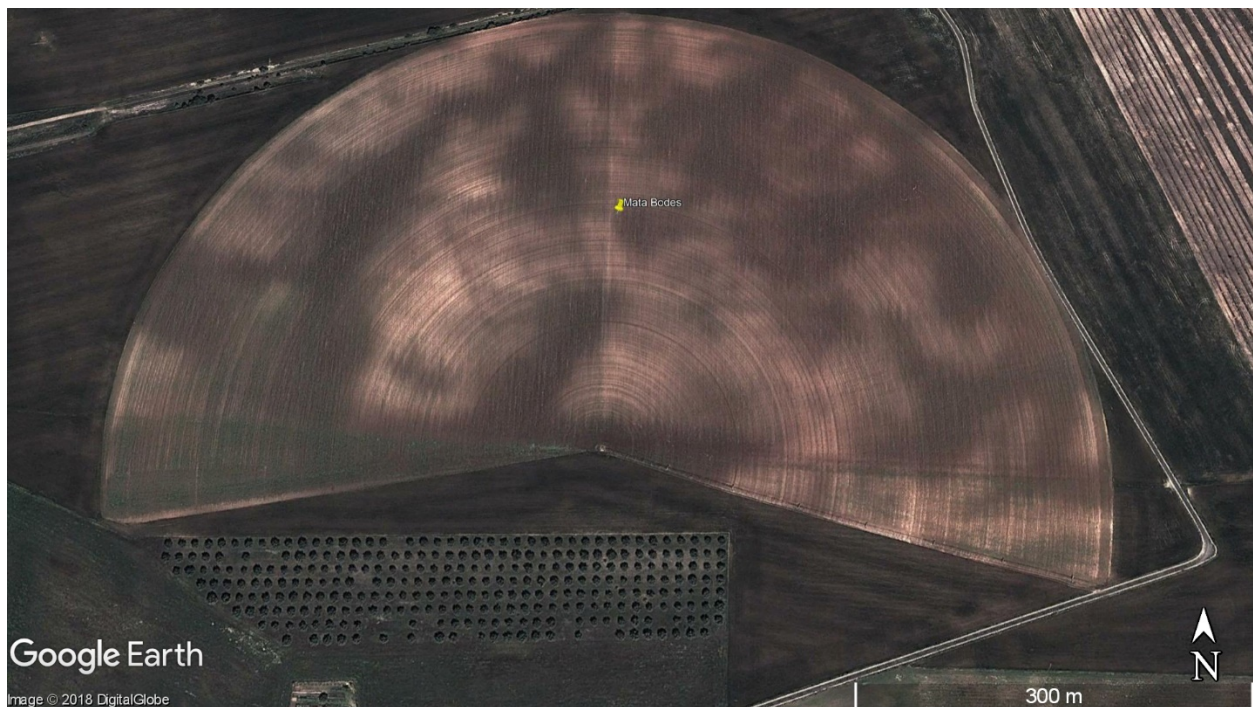


Figura 4.1 - Matabodes com marcas de vegetação (09-05-2012)

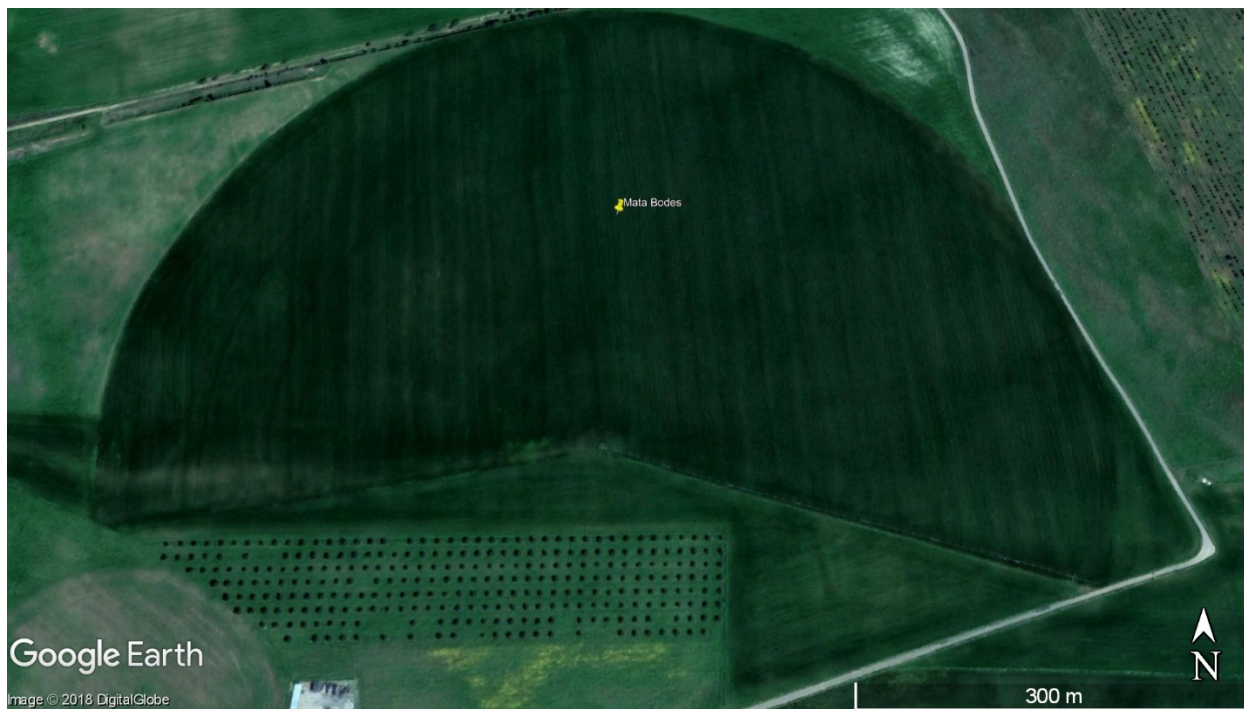


Figura 4.2 - Imagem atualizada de Matabodes (23-04-2018)

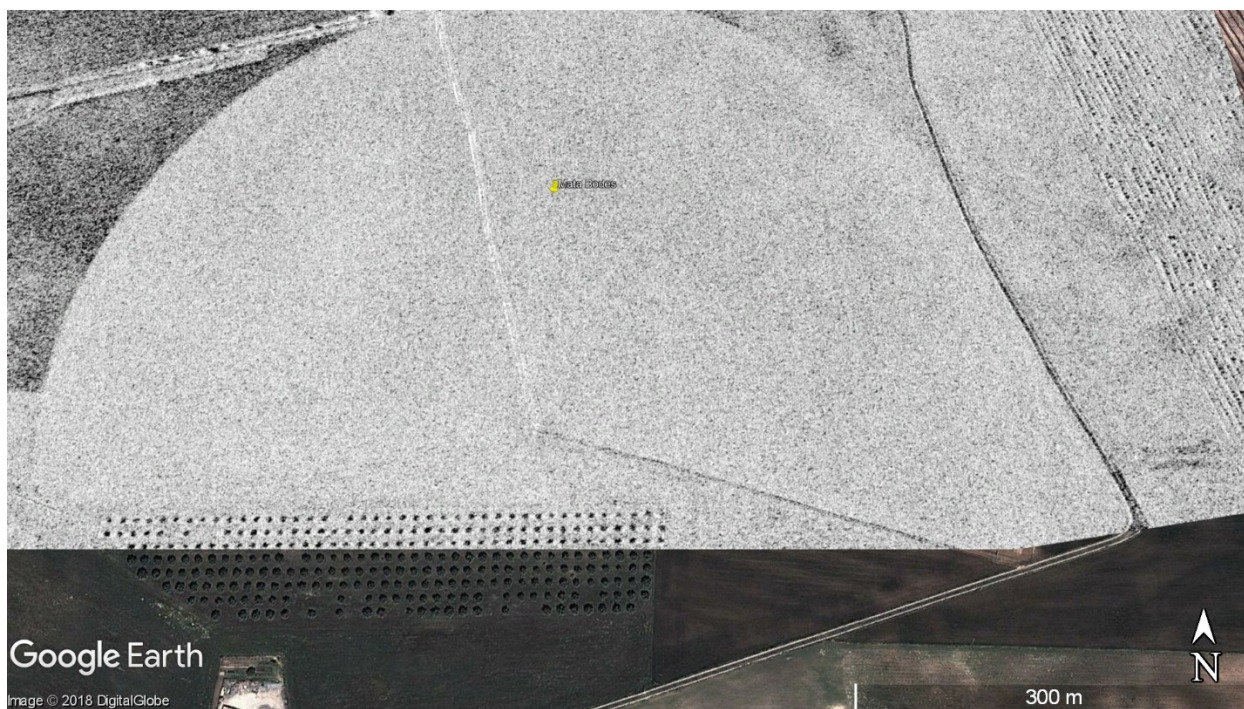


Figura 4.3 - Imagem de radar ortorretificada, polarização HH, de Matabodes (28-01-2018)

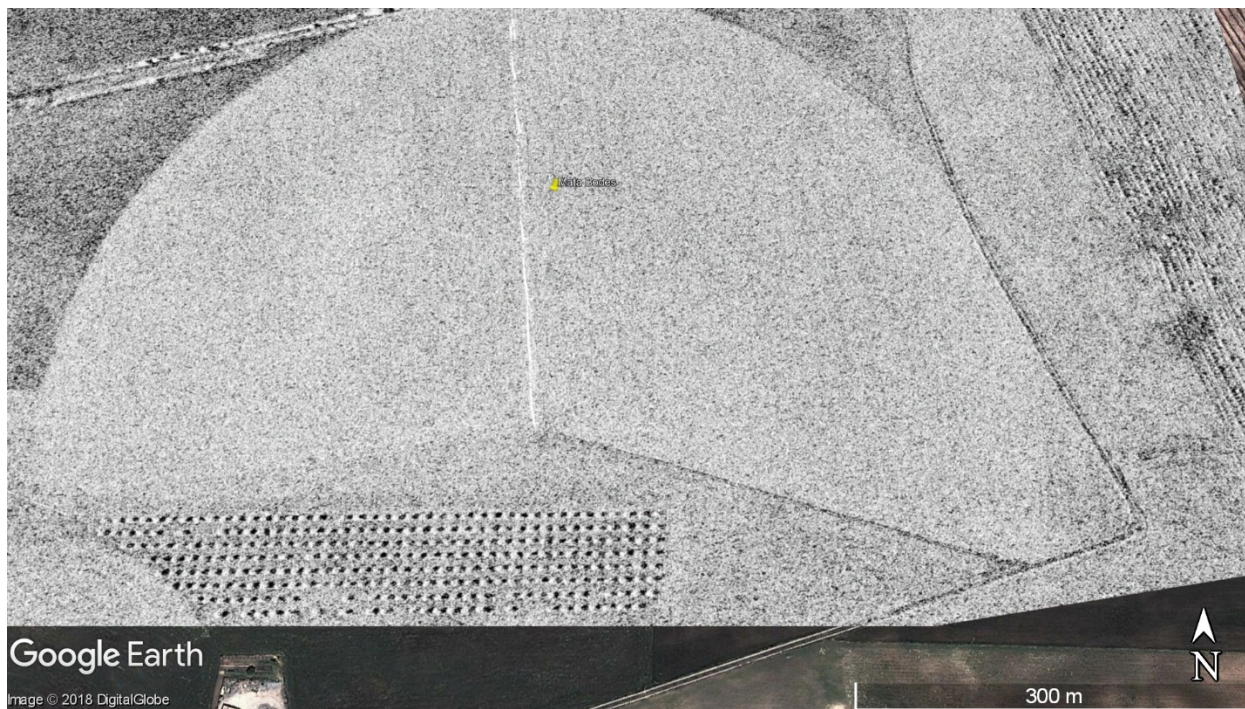


Figura 4.4 - Imagem de radar ortorretificada, polarização VV, de Matabodes (08-02-2018)



## Verulamium

As imagens de radar para o sítio de Verulamium não mostraram qualquer indicação de estruturas ou elementos arqueológicos no subsolo na área corresponde à geofísica. Isto contrasta com os resultados da prospeção geofísica feita com recurso a magnetómetro, que evidenciou um grande número de elementos arqueológicos numa área de grande extensão.



Figura 5.1 - Resultados de magnetometria. Fonte: <https://hertsgeosurvey.wordpress.com/category/verulamium/>



Figura 5.2 - - Imagem de radar ortorretificada, polarização HH, de Verulamium (25-01-2018)



Figura 5.3 - - Imagem de radar ortorretificada, polarização VV, de Verulamium (05-02-2018)

## Ashwell End

Para o sítio de Ashwell End, as imagens de radar apresentam indícios de estruturas e elementos arqueológicos no subsolo que não são visíveis em imagens óticas. Estes elementos são claramente visíveis nas imagens de polarização VV e são, na parcela de terreno a Noroeste, compostos por uma série de linhas retas paralelas, marcas circulares inseridas no interior das áreas formadas pelas linhas (possivelmente buracos de poste), e na parcela principal uma marca circular bem demarcada.



Figura 6.1 - Resultados de Geofísica. Fonte - <https://hertsgeosurvey.wordpress.com/category/ashwell-end/>



Figura 6.2 – Imagem de radar ortoretificada, polarização HH, de Ashwell End (26-01-2018)



Figura 6.3 – Imagem de radar ortoretificada, polarização HH, de Ashwell End (06-02-2018)

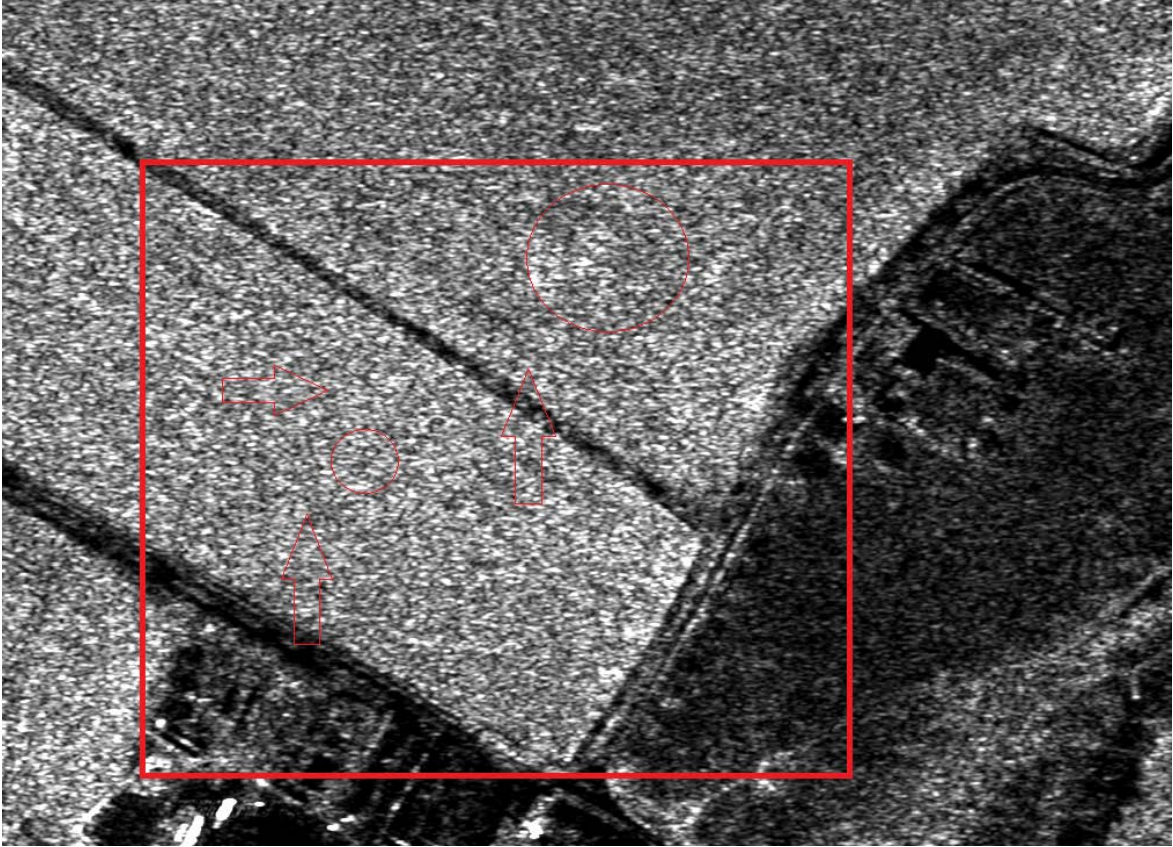


Figura 6.4 - Imagem de radar não ortorretificada, com polarização VV, apresentando anomalias

## Dados de satélite como ferramenta de monitorização

Este subcapítulo serve de fundação metodológica para o tratamento de dados de satélite do tipo radar de modo a extrair informação associada a alterações significativas e subsidência de estruturas e solos.

### Deteção de alterações e PSInSAR

De forma a testar o potencial do empilhamento interferométrico de tipo PSInSAR na monitorização de grandes áreas e de retrodifusores estáveis de origem antrópica como edifícios de património histórico, centros urbanos e sítios arqueológicos, foi um teste na zona de Beja em Portugal, através do *software* Sarproz disponibilizado por licença.

Um total de 135 imagens da constelação Sentinel 1 (91 Sentinel 1A; 44 Sentinel 2B) a partir da órbita ascendente relativa 147 foram seleccionadas para testes. O espectro cronológico inicia em 27 de outubro de 2014 e termina a 22 de março de 2018. A resolução temporal das aquisições foi de 12 dias de 27 de outubro de 2014 a 10 de setembro de 2016, e de 6 dias de 22 de setembro de 2016 a 22 de março de 2018. Durante esta longa diacronia, houveram interrupções devido à indisponibilidade de produtos *Interferometric Wide Swath*, a mais comprida sendo de 26 de dezembro de 2014 a 8 de março de 2015.

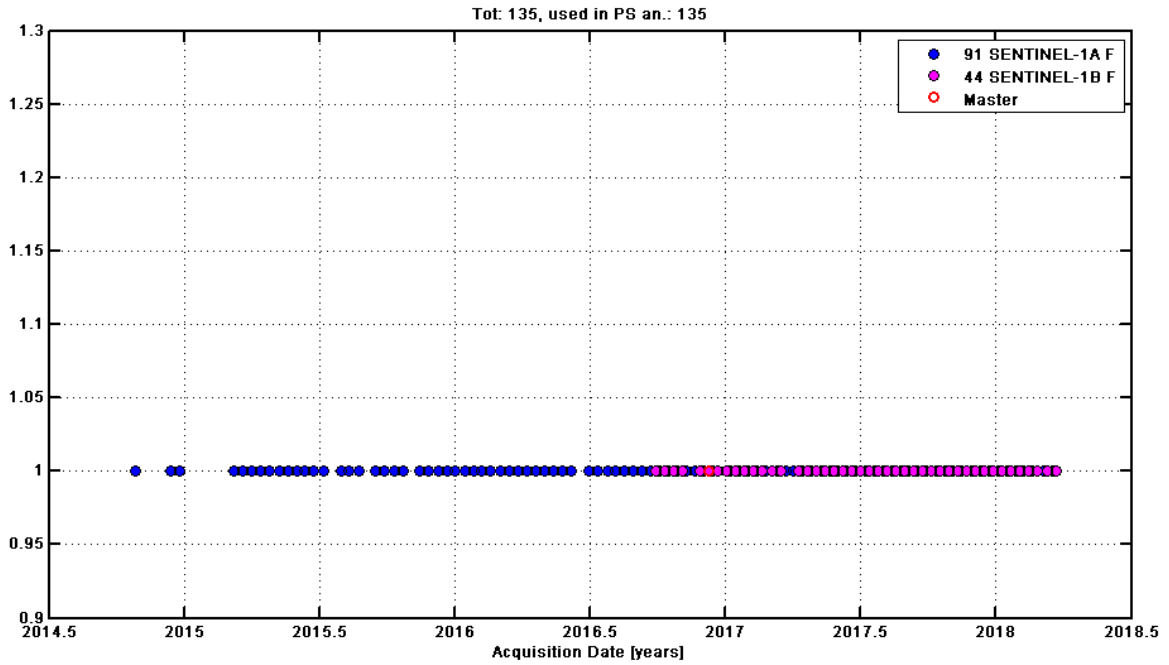


Figura 7.1 - Cronologia de aquisição

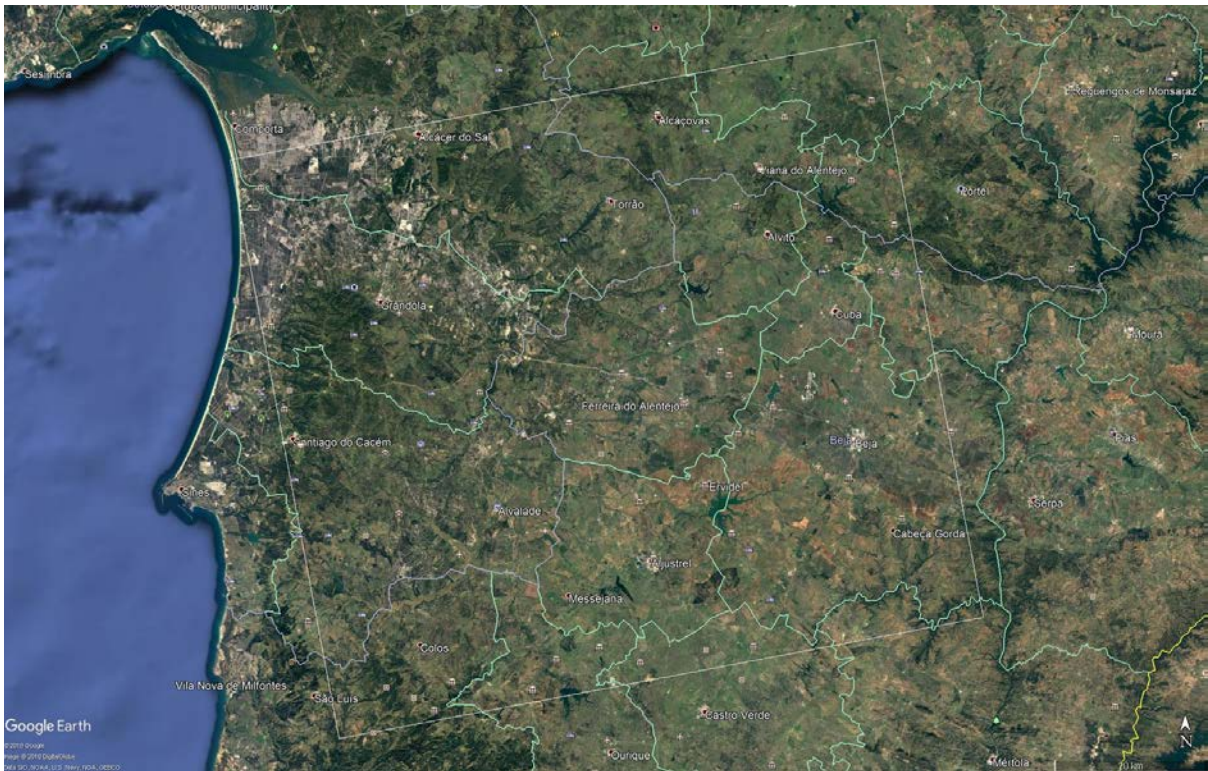


Figura 7.2 - Área abrangida pela pilha interferométrica

A imagem Mestre automaticamente selecionada correspondente à data de 3 de dezembro de 2016 foi descartada devido a precipitação, e foi selecionado manualmente a seguinte aquisição correspondendo a 9 de dezembro de 2016.

A linha de base dos *Slaves* não excede (-150 m; 150 m) da imagem *Master* selecionada. A polarização utilizada na análise foi VV (Vertical Emit, Vertical Receive), e a área de interesse corresponde ao *Subswath A* (Subfeixe A) das imagens de radar. A pegada do *Subswath A* corresponde a uma área que se estende de Santarém a Faro, mas a sobreposição da série temporal limita-se a uma área retangular que se estende de Entradas (Castro Verde) a Alcácer do Sal (Setúbal), resultando numa área comum de cerca de 6300 Km<sup>2</sup>.

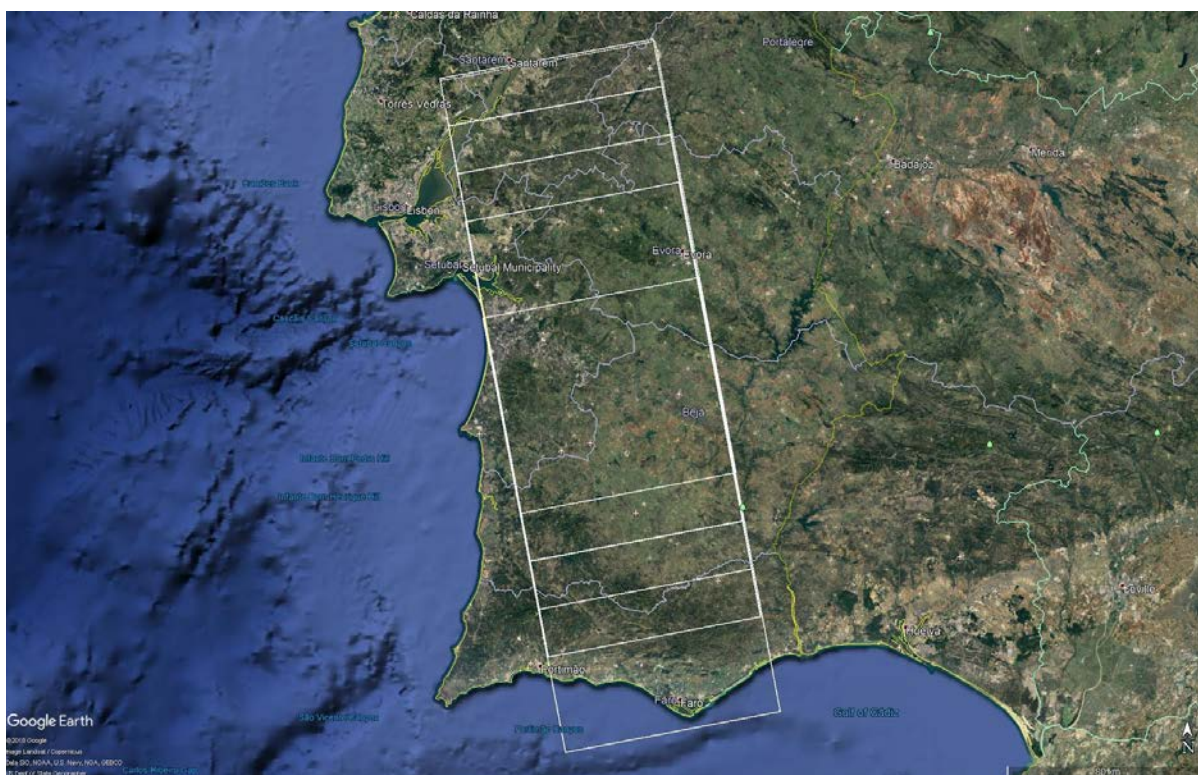


Figura 7.3 - Área abrangida por todas as imagens (2014-2018)

O primeiro passo consiste em transferir os dados de um repositório aberto, como o Sentinel Hub ou o espelho nacional IPSentinel. Para o *software* Sarproz conseguir aceder aos dados, é necessário descompactar os arquivos que contêm as imagens de satélite. Após descompactado, o *software* consegue criar uma série temporal de imagens e aplicar correções automáticas às órbitas, através de órbitas precisas ou reconstituídas dos satélites. Com as correções aplicadas, procede-se à escolha automática ou manual da imagem *Master* que serve de referência para o resto do empilhamento, com base nas condições meteorológicas do dia correspondente e na



determinação da linha de base máxima entre os *Slaves* e o *Master* de referência. Agora torna-se possível fazer o correção entre pares de imagens através da utilização de órbitas precisas (para Sentinel 1) ou, caso não seja possível, através da correlação cruzada de sinal.

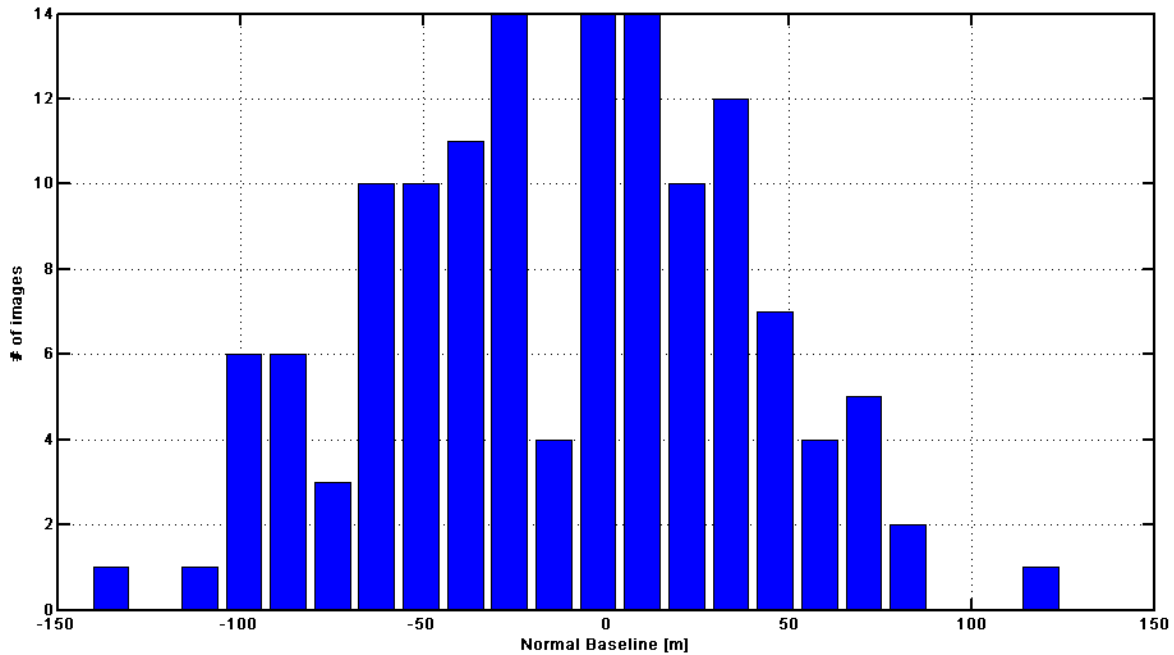


Figura 7.4 - Linha de base entre aquisições

Após terminar o empilhamento e sobreposição correta de imagens, procede-se à criação do mapa de refletividade. Este mapa é essencialmente o produto da fusão de todas as imagens de radar da área de interesse e cálculo da média de brilho por pixel. O resultado é uma imagem de radar extremamente nítida devido ao aumento do rácio de sinal-ruído comparativamente a uma imagem individual, permitindo uma boa delimitação dos elementos da cena. Sucessivamente cria-se a máscara que define os pontos para posterior identificação de retrodifusores permanentes.

A ortorretificação da imagem de radar é possibilitada pela utilização de um MDT externo que fornece informação relativa à altimetria da área de interesse. Neste caso, recorreremos ao *SRTM 1 Arc-Second Global* que possui uma resolução espacial de 30 metros e os mosaicos geográficos correspondentes à área de interesse são automaticamente transferidos pelo *software*.

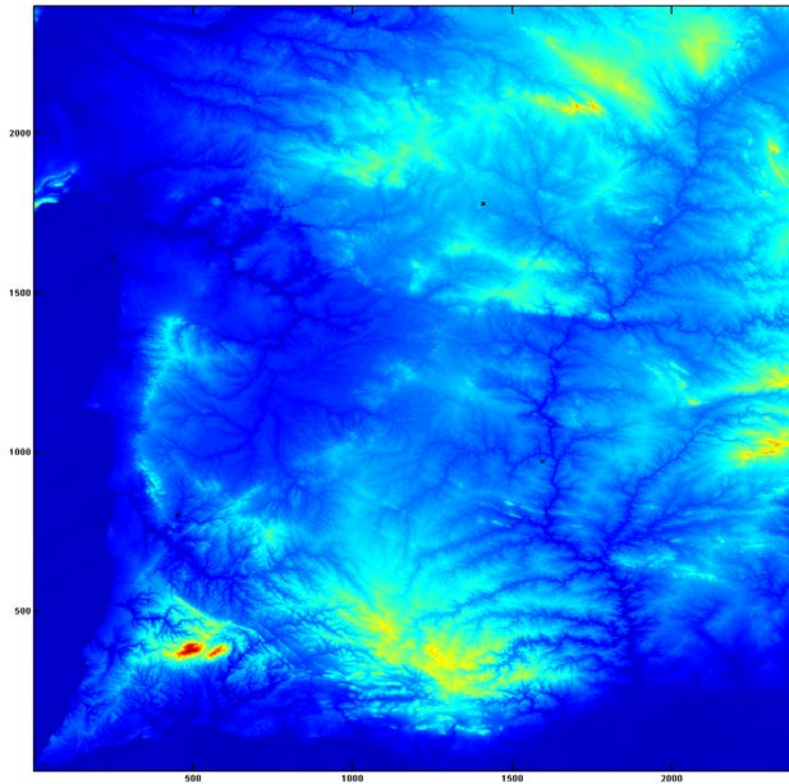


Figura 7.5 - MDT *SRTM 1 Arc-second* para a área de interesse

Agora é possível proceder ao primeiro grande passo que consiste na detecção de alterações de amplitude na área de interesse. Este método compara diretamente a amplitude entre uma aquisição *Master* e uma *Slave* escolhida pelo operador, e normaliza os valores num espectro de (-1;1). É possível exportar os resultados no formato KML para visualização no Google Earth, ou então em formato GeoTIFF para análise em ambiente SIG.

Após completar a análise de amplitude é possível passar para a análise interferométrica de fase. É possível fazer como passo preliminar um cálculo de estimativa de coerência para formar um gráfico de extensão mínima entre aquisições.

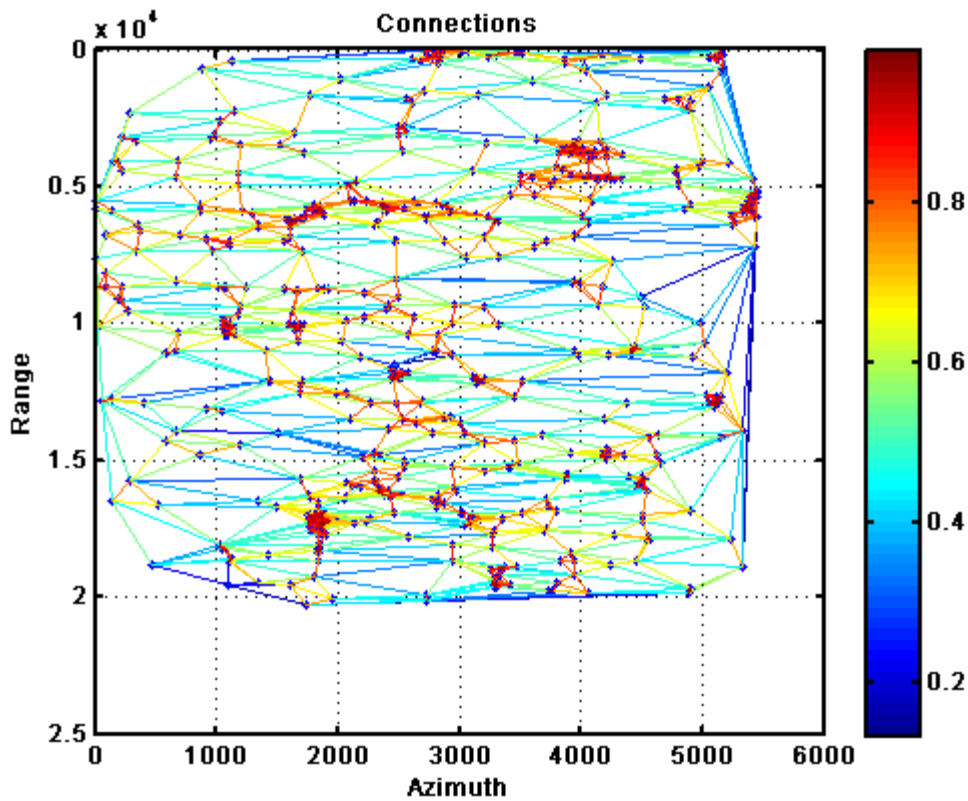


Gráfico de

Figura 7.6 - interconexão de retrodifusores permanentes

Procede-se ao cálculo do mapa de coerência e à estimativa de APS (*Atmospheric Phase Screen*), passo que calcula o efeito que a atmosfera e as nuvens teriam na fase do sinal em cada uma das aquisições, e calibra os resultados de acordo com esta estimativa.

Finalmente, após se ter finalizado os passos acima referidos, é possível criar os pontos de retrodifusão permanentes. Devem-se estipular as balizas máximas e mínimas de subsidência e de velocidade dos pontos com base nos resultados do processamento que podem ser analisados a partir dos gráficos resultantes.

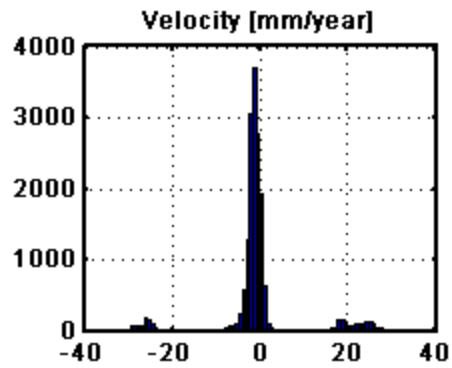


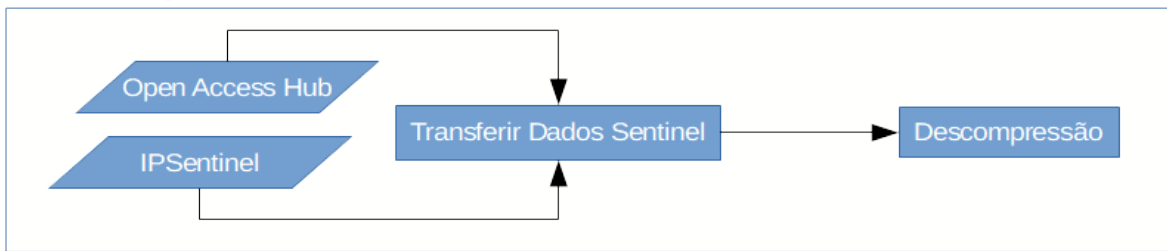
Figura 7.7 - Histograma de velocidades de retrodifusores permanentes

O resultado pode ser exportado no formato KML ou GeoTIFF para visualização em ambiente Google Earth ou SIG, respetivamente.



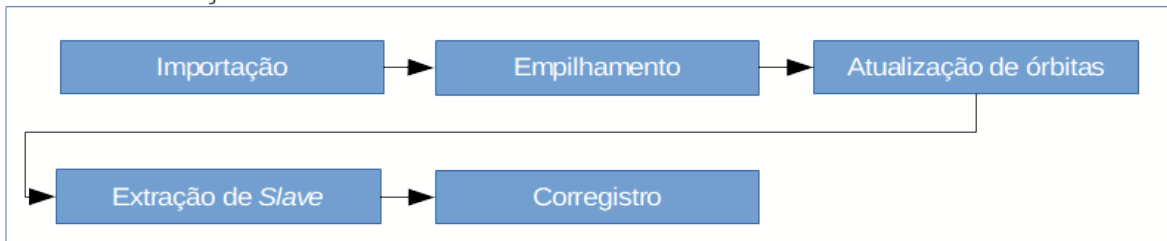
Figura 7.8 - Concentração de retrodifusores permanentes na zona de Beja

## Preparação

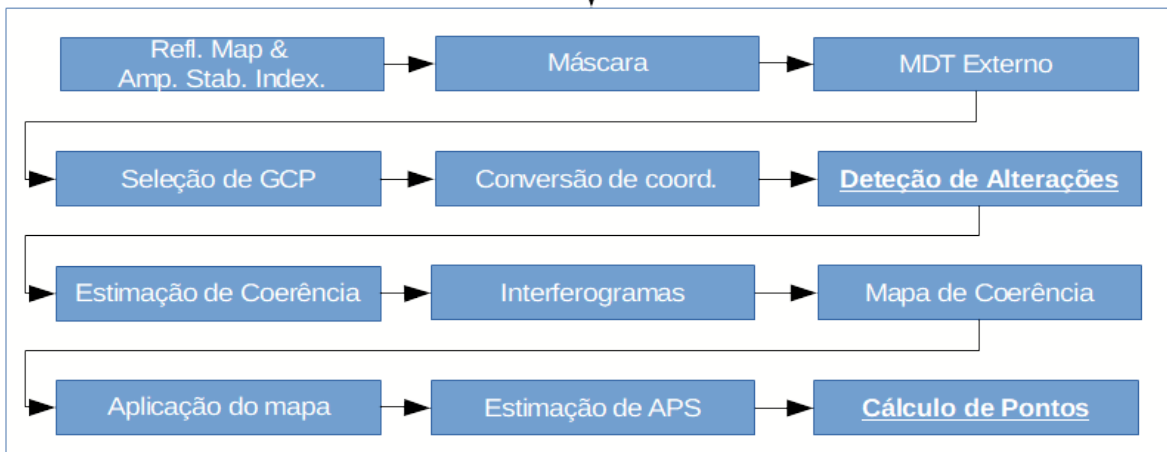


**Software**

## Sincronização



## Processamento



**SIG**

Figura 7.9 - Passos metodológicos para a criação de um mapa de difusores permanentes

## Introdução de dados em Sistema de Informação Geográfica

De forma a formar um mapa simplificado que inclui apenas os sítios arqueológicos afetados por alterações à superfície é necessário proceder a uma série de passos de tratamento e manipulação de dados que resulta num produto que inclui a informação que pretendemos visualizar.

De modo a obter este produto final, cruzamos duas fontes de informação essencial para esta análise:

- Os dados obtidos do satélite, que apresentam as alterações que houveram na superfície.
- Pontos georreferenciados contendo a localização geográfica dos sítios arqueológicos contidos dentro da área de afetação em estudo

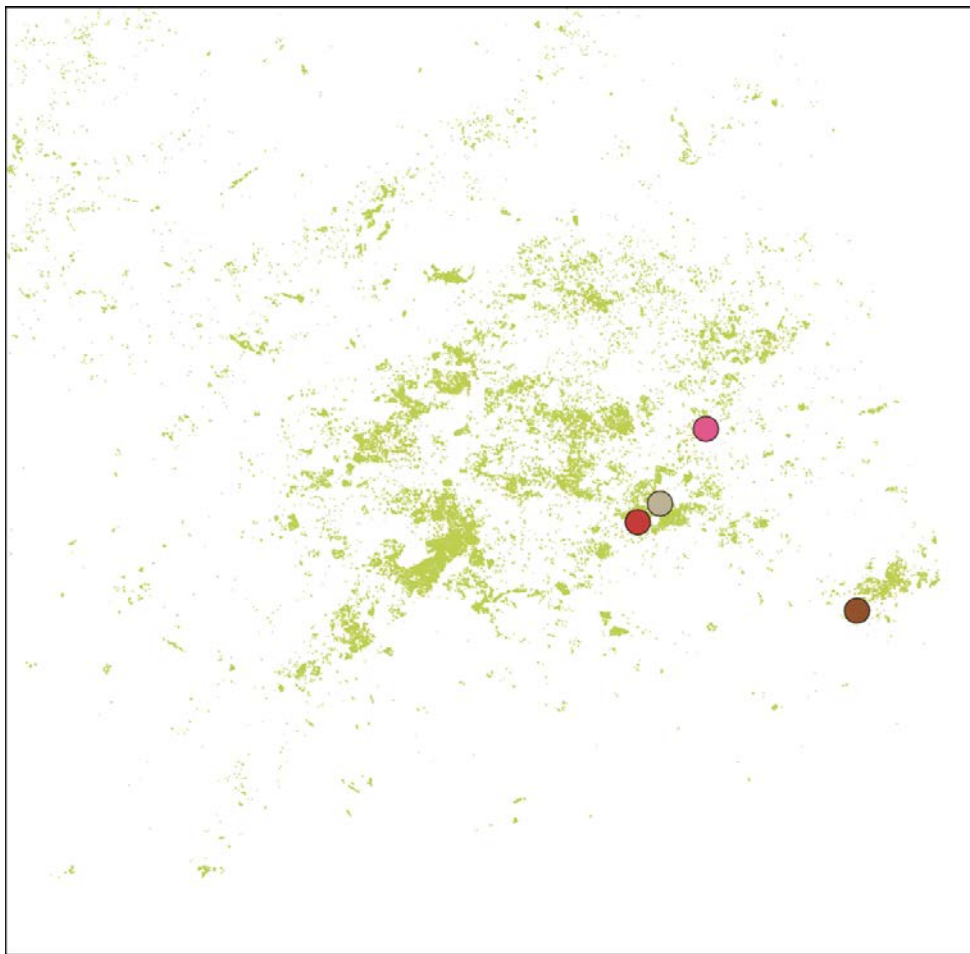


Figura 8 – *Layer* resultante da deteção automática de sítios afetados por alterações de amplitude

Os dados de satélite são processados pelo software de tratamento de imagens de radar e transformados num mapa de formato raster, em tipologia GeoTIFF. Neste formato, o ficheiro contém simultaneamente a informação relativa à intensidade das alterações detetadas, que corresponde diretamente à cor dos pixéis, como também a orto e georreferenciação da área de estudo (a imagem SAR é naturalmente distorcida quando projetada sobre superfície da Terra). A informação correspondente à localização dos sítios pode ser obtida de várias formas e em vários formatos, sendo a forma mais simples a importação direta a partir de um ficheiro CSV ou KML, por exemplo. Caso falte um sítio, é possível adquirir a sua localização a partir do Google Earth, através da funcionalidade de marcadores, e sucessivamente exportar esses marcadores em formato KML.

### *WebSite*

De forma a permitir que aos clientes a visualização dos resultados da análise de dados de satélite, foi criado uma área de cliente, na forma de subdomínio, para a página principal do serviço Senseos (serviço de monitorização remota do património arqueológico desenvolvido pela empresa THEIA). Nesta área de cliente, que é apenas possível aceder com recurso a credenciais fornecidas pela empresa, está integrado um sistema de visualização WebGIS que apresenta de forma simplificada a afetação dos sítios arqueológicos com base nos resultados de satélite.

## Deteção de eventos destrutivos em sítios arqueológicos

Com a intensificação e mecanização de trabalhos agrícolas, a arqueologia e o património correm um perigo crescente de serem destruídos, com ou sem intenção maliciosa, por parte de agricultores ou empresas ligadas à área da agricultura. O PDM (Plano Diretor Municipal) e as autarquias definem as áreas e o licenciamento que regula as atividades agrícolas, de forma a proteger elementos que são de importância pública, como é o caso da arqueologia local. A violação destas normas regulamentares e os danos irreversíveis causados ao património histórico são dificilmente detetados de forma suficientemente rápida de forma a impedir a sua contínua destruição.

Este tem sido o caso de vários sítios arqueológicos na zona do Alentejo que, devido à sua extensão de tal forma alargada, torna quase impossível uma monitorização que possibilite a intervenção pronta por parte das autoridades. A destruição completa ou parcial da arqueologia Alentejana tem sido de tal forma grave que a discussão começou a ser divulgada pela comunicação social (Público, 2017a; Público, 2017b). A gravidade da situação tem impulsionado as autoridades a começarem a tomar medidas necessárias para futura prevenção deste tipo de acontecimentos (DN, 2017; DRCA, 2018)

O objetivo desta análise será de compreender se é ou não possível recorrer a imagens de satélite de forma a identificar quando é que houve a destruição parcial de certos sítios arqueológicos na zona do Alentejo por parte de atividades agrícolas de natureza intensiva.



## Pisões

Pisões é um sítio romano parcialmente destruído por atividade agrícola (Diário do Alentejo, Zona envolvente à *villa* romana de Pisões terá sido fortemente afetada pela plantação de um olival intensivo, 2018). Observação cuidada da série temporal do Sentinel 2 de 2017 mostra que a esmagadora maioria de trabalhos do solo ocorreram durante o segundo trimestre do ano. Uma evidência será o desaparecimento do reservatório de água no campo a Noroeste, que terá ocorrido num período entre 5 e 15 de abril de 2017 (Fig. 9.1 e 9.2). A charca estaria muito próxima do aqueduto romano existente na zona. Imagens nítidas não estão disponíveis até ao dia 15 de maio de 2017 (Fig. 9.3), altura em que já ter-se-ia teria ocorrido a unificação do terreno com outro mais pequeno localizado no seu canto Este-Nordeste, que de acordo com imagens disponíveis no Google Earth teria contido uma pequena plantação. Estas alterações apontam para a ocorrência de atividade agrícola mais intensiva, talvez de modo a preparar o terreno para a plantação que teria ocorrido mais tarde.

Para as imagens de radar, foi aplicado o método de deteção de alterações de amplitude com a esperança de conseguir identificar um evento significativo que pudesse ser associado à existência de atividades agrícolas intensas. Para tal foram analisados pares de imagens com uma diacronia temporal de cerca de 1 mês entre aquisições desde do ano de 2014, e foi identificado um momento de diferença significativa na amplitude do sinal entre 5 de outubro e 4 de novembro de 2017 (Fig. 9.4).

Tendo identificado uma baliza temporal em que teria acontecido um evento de alteração prolongada, foi feita uma comparação de amplitude entre imagens contidas nesta mesma diacronia. Assim, foi identificada a baliza de 11 de outubro de 2017 e 17 de outubro de 2017 como o período em que se deram as alterações à superfície do terreno.

Importa salientar que a morfologia dos limites do território em que ocorreram as alterações corresponde diretamente aos limites do terreno em que se encontra a plantação, sendo por este motivo um fator que leva a crer que estariam associados à atividade agrícola contida na parcela.

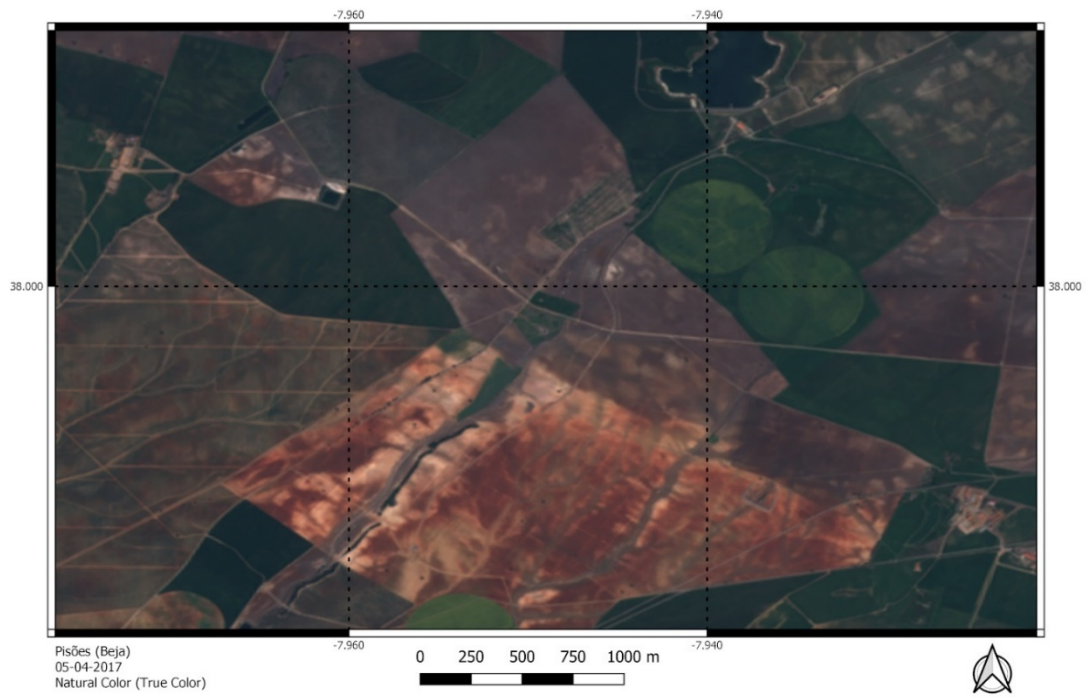


Figura 9.1.1 – Pisões em 05-04-2017 (Sentinel 2 RGB)

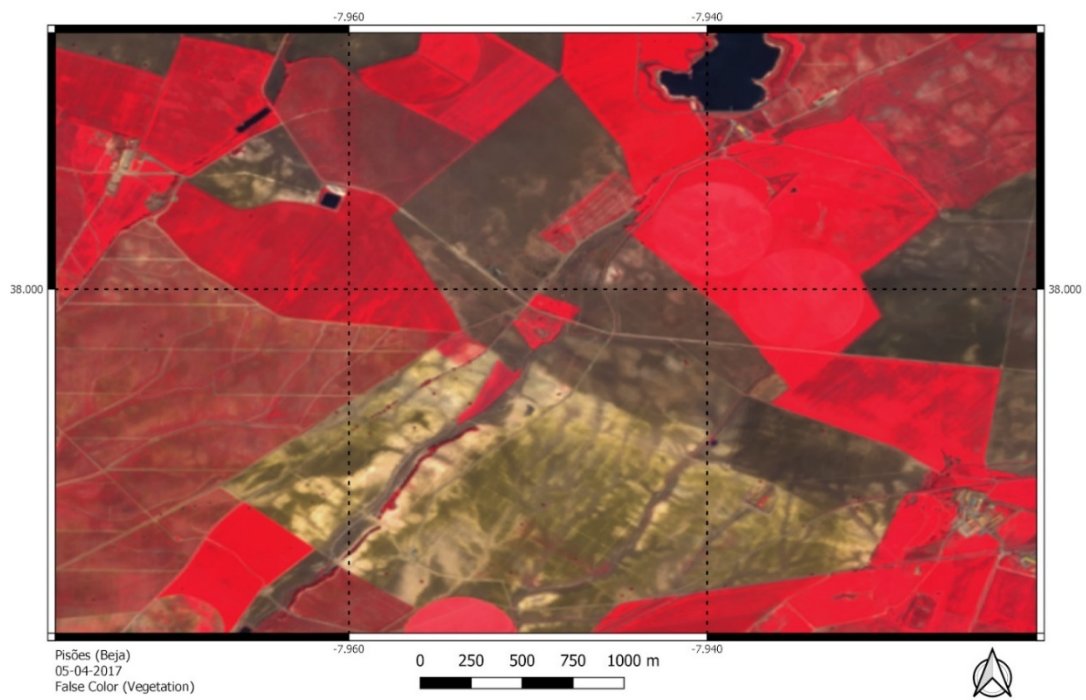


Figura 9.1.2 – Pisões em 05-04-2017 (Sentinel 2 NIR)

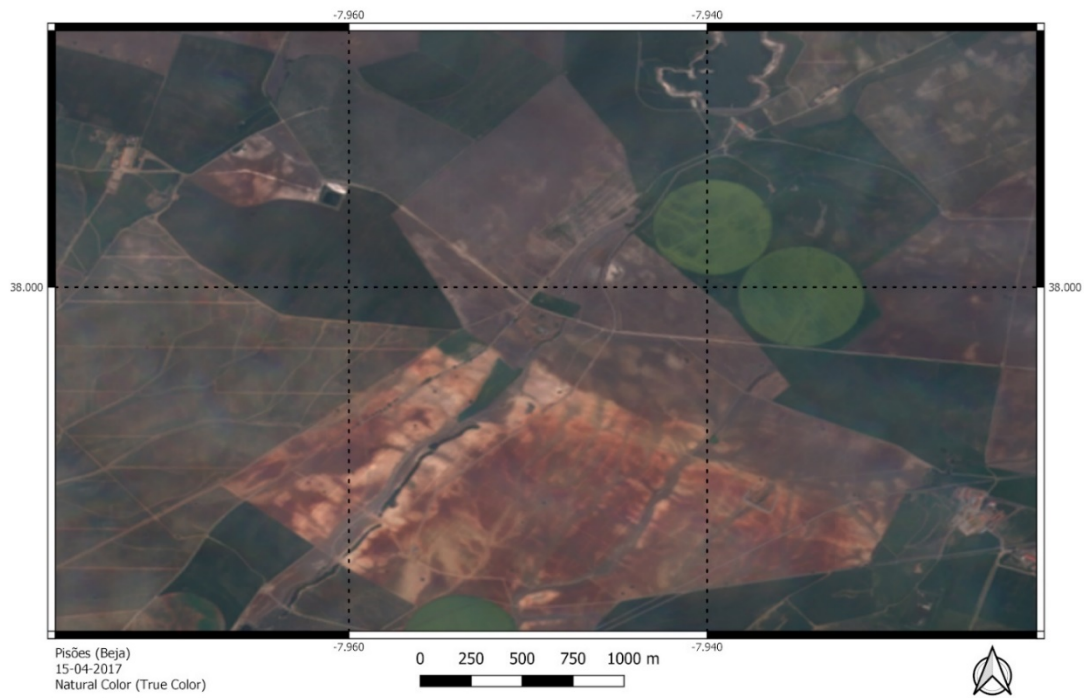


Figura 9.2.1 – Pisões em 15-04-2017 (Sentinel 2 RGB)

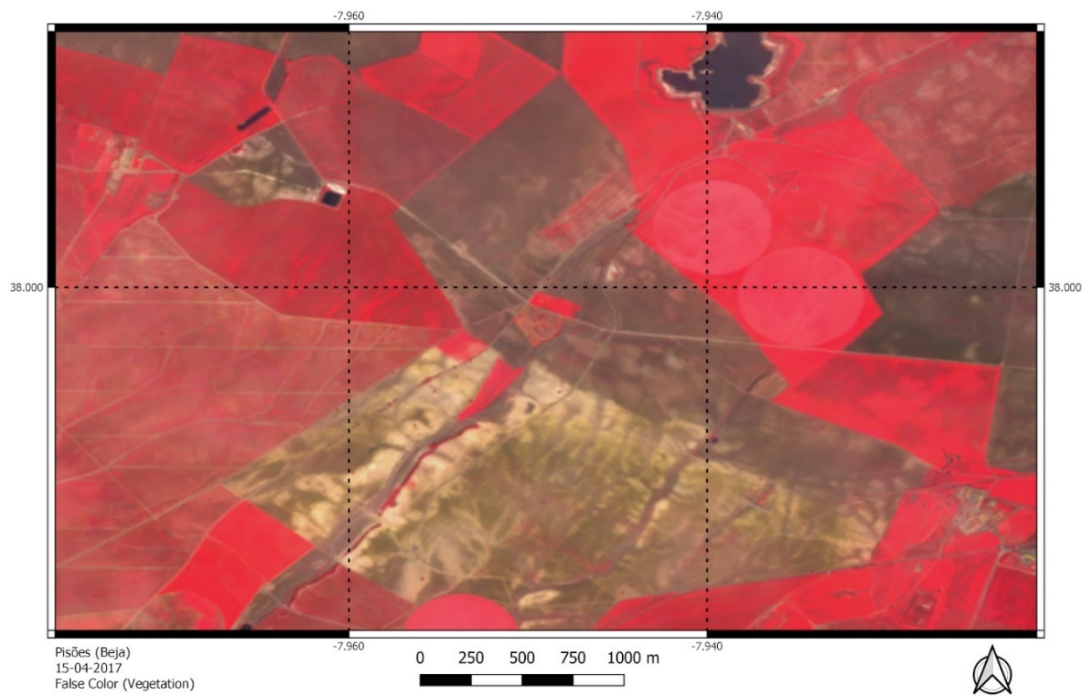


Figura 9.2.2 – Pisões em 15-04-2017 (Sentinel 2 NIR)

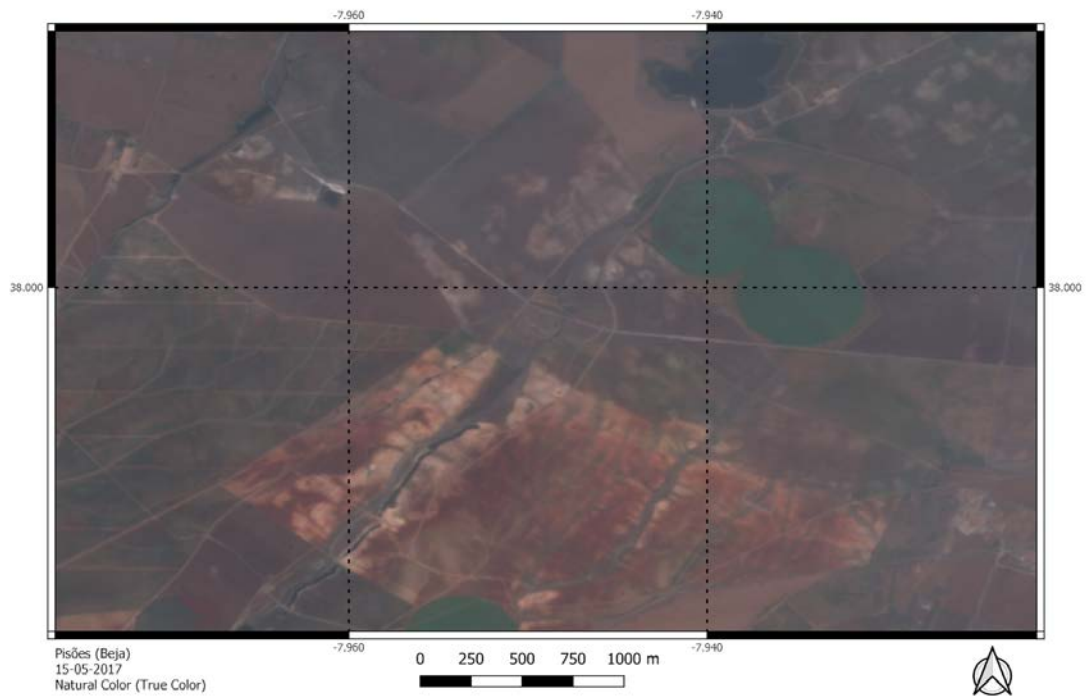


Figura 9.3.1 – Pisões em 15-05-2017 (Sentinel 2 RGB)

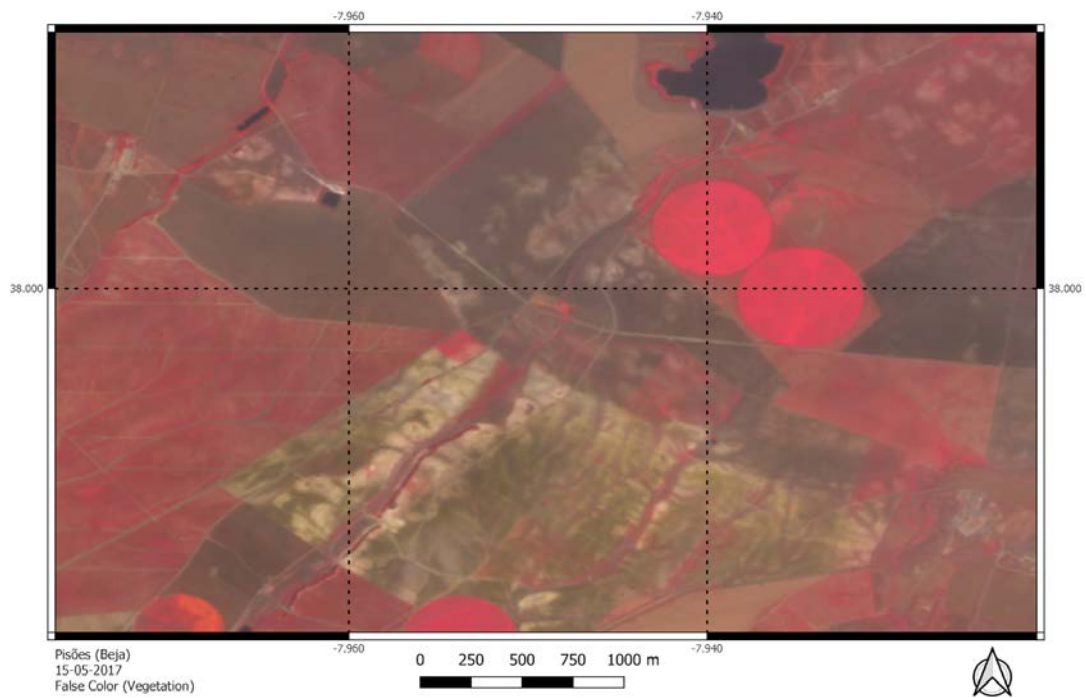


Figura 9.3.2 – Pisões em 15-05-2017 (Sentinel 2 NIR)

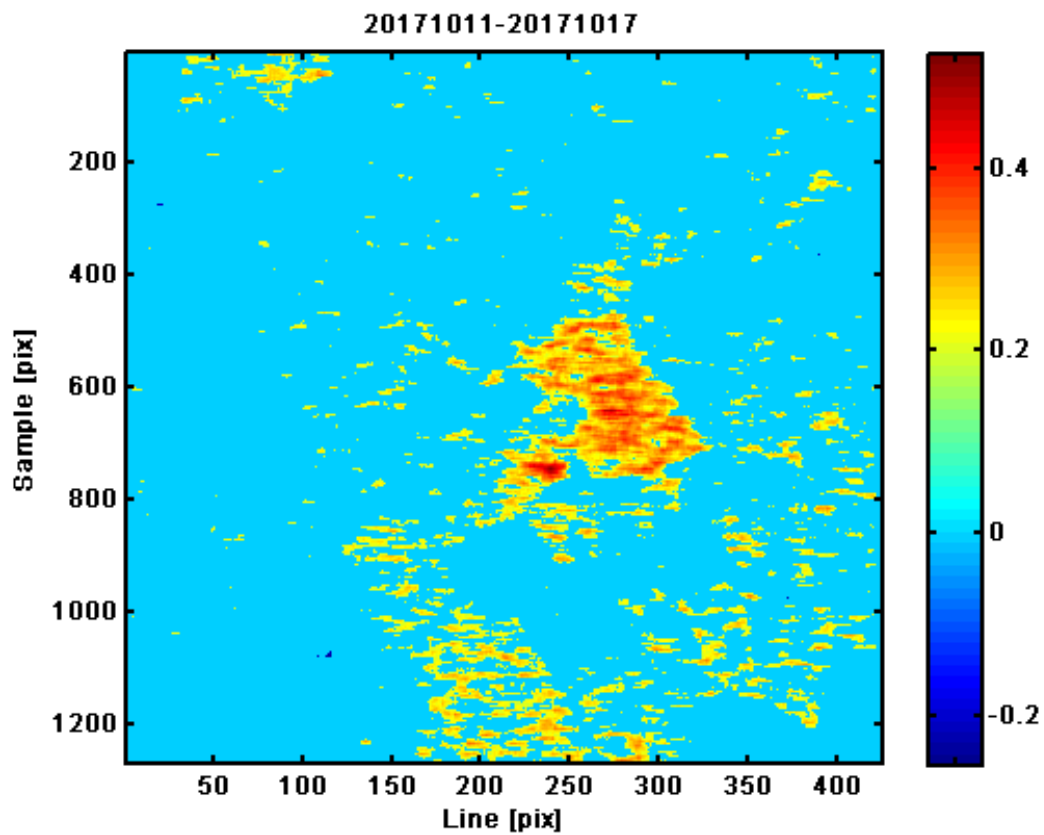


Figura 9.4 – Raster resultante do processo de detecção de alterações a partir do software SARPROZ

## Represas

A *villa* romana de Represas terá sido destruída pela plantação de um olival (Público, Ponte romana e sítios arqueológicos destruídos para plantar amendoal, 2017). Não se sabe a data em que ocorreram as atividades de natureza destrutiva, mas a identificação de trabalhos nas terras pode ajudar a compreender a cronologia dos acontecimentos.

Para o sítio de Represas é difícil determinar quando se iniciou uma clara divisão das parcelas, mas as imagens do Sentinel 2 podem fornecer alguns dados. A imagem mais antiga, correspondendo à data de 15 de julho de 2015 (Fig. 10.1), não apresenta sinais aparentes de caminhos ou divisões no campo, mas a falta de claridade de imagem pode contribuir para a ocultação de elementos da paisagem. Um par de imagens adquiridas pouco tempo depois, correspondendo às datas de 25 de julho e 4 de agosto 2015 (Fig. 10.2 e 10.3), apresentam o que parece ser o aparecimento de um caminho a Norte. Nas imagens correspondentes às datas de 12 e 22 de novembro (Fig. 10.4 e 10.5) parecem surgir os restantes caminhos na zona inferior. As aquisições seguintes são gravemente afetadas por nuvens até ao dia 30 de abril de 2016 (Fig. 10.6), momento antes do qual se terá terminado a repartição do terreno. Entre novembro de 2015 e abril de 2016 foram removidas várias árvores de grande porte, o que implica a utilização de maquinaria pesada, e um indicador indireto de preparação do terreno para plantação.

É difícil identificar o momento em que foi feita a plantação, mas dados de satélite na banda de Infravermelho próximo apontam para uma diferenciação que se desenvolveu em contraste com o terreno a Norte por volta de 15 de Abril de 2017 (Fig. 10.8), mas isso a possibilidade da plantação não ter sido efetuada numa data anterior.

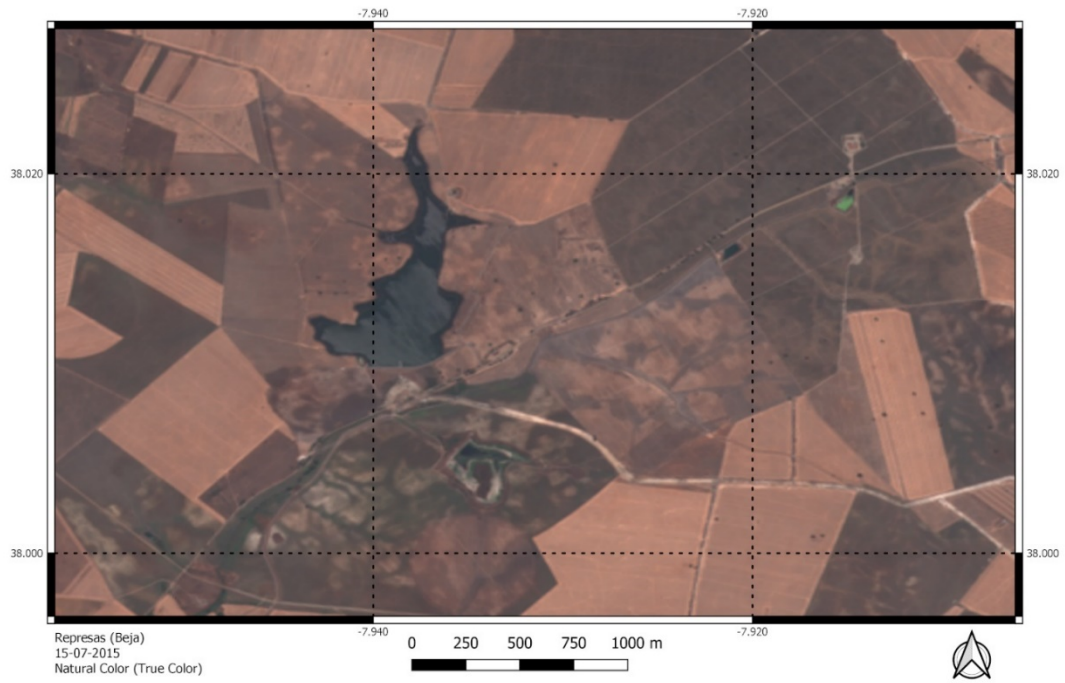


Figura 10.1.1 – Reservas em 15-07-2015 (Sentinel 2 RGB)

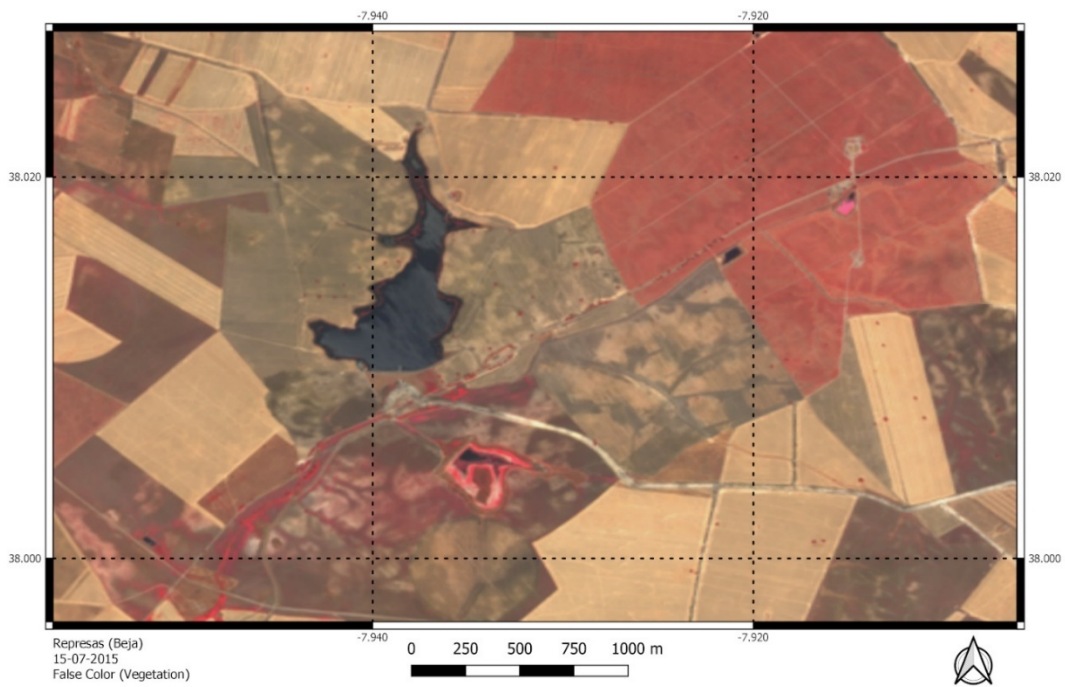


Figura 10.1.2 – Reservas em 15-07-2015 (Sentinel 2 NIR)

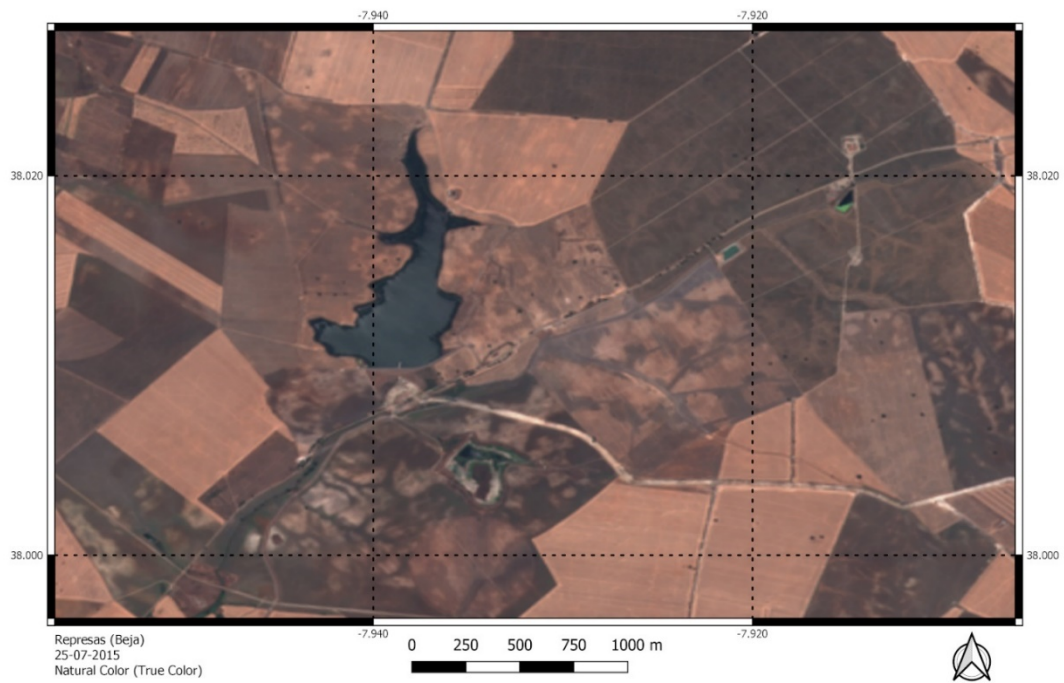


Figura 10.2.1 – Represas em 25-07-2015 (Sentinel 2 RGB)

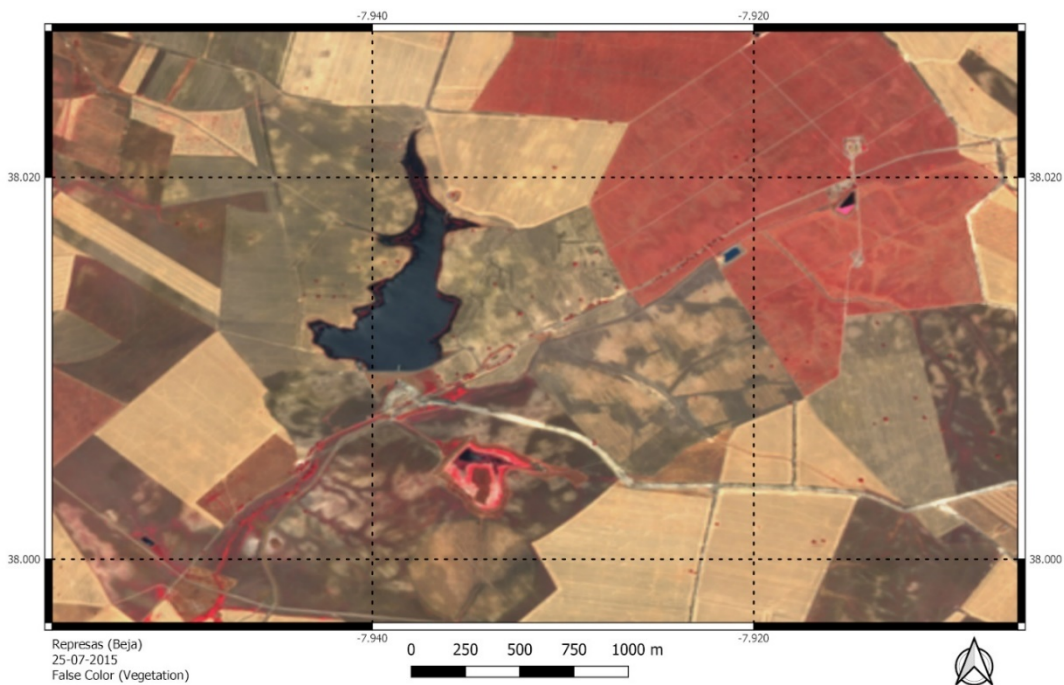


Figura 10.2.2 – Represas em 25-07-2015 (Sentinel 2 NIR)



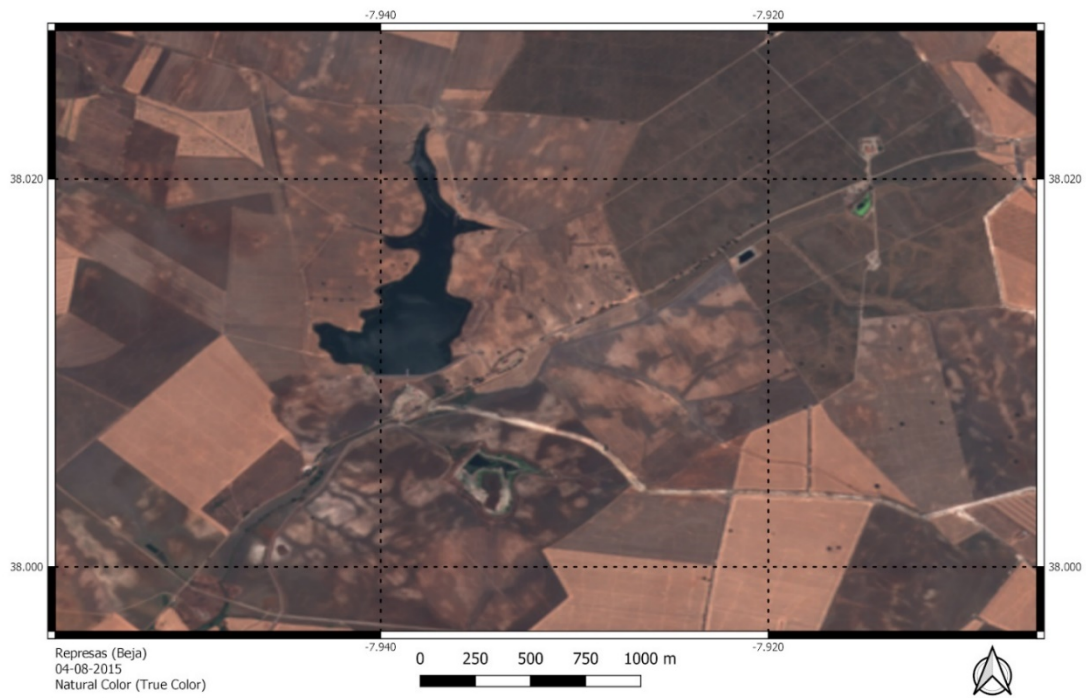


Figura 10.3.1 – Reservas em 04-08-2015 (Sentinel 2 RGB)



Figura 10.3.2 – Reservas em 04-08-2015 (Sentinel 2 NIR)



Figura 10.4.1 – Reservas em 12-11-2015 (Sentinel 2 RGB)



Figura 10.4.2 – Reservas em 12-11-2015 (Sentinel 2 NIR)



Figura 10.5.1 – Reservas em 22-11-2015 (Sentinel 2 RGB)

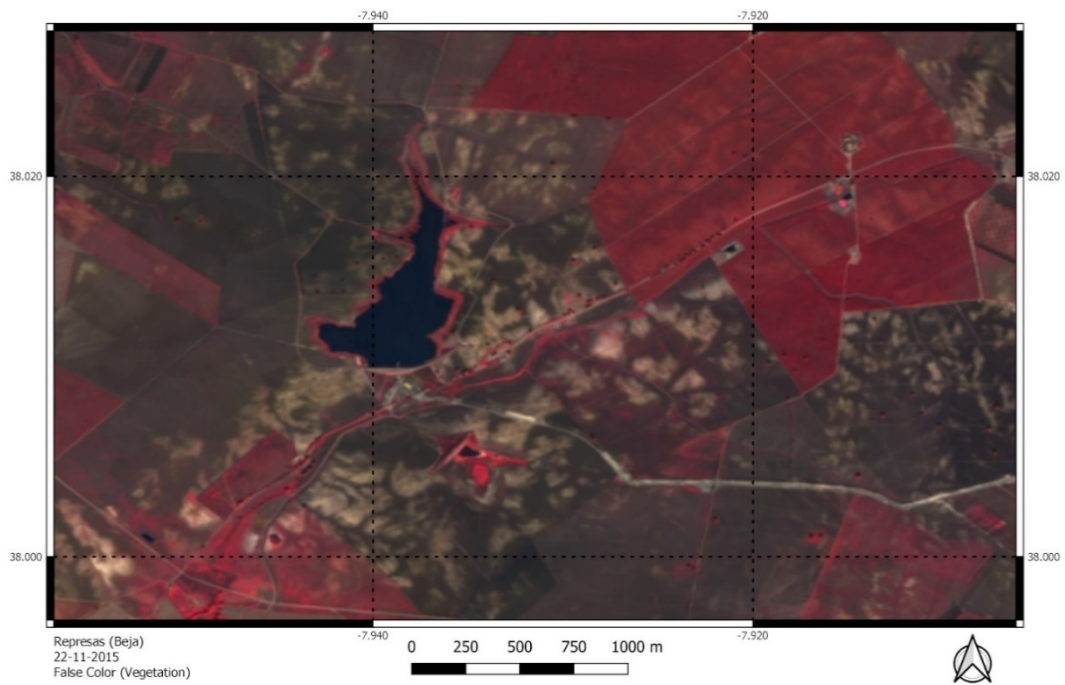


Figura 10.5.2 – Reservas em 22-11-2015 (Sentinel 2 NIR)



Figura 10.6.1 – Represas em 30-04-2016 (Sentinel 2 RGB)

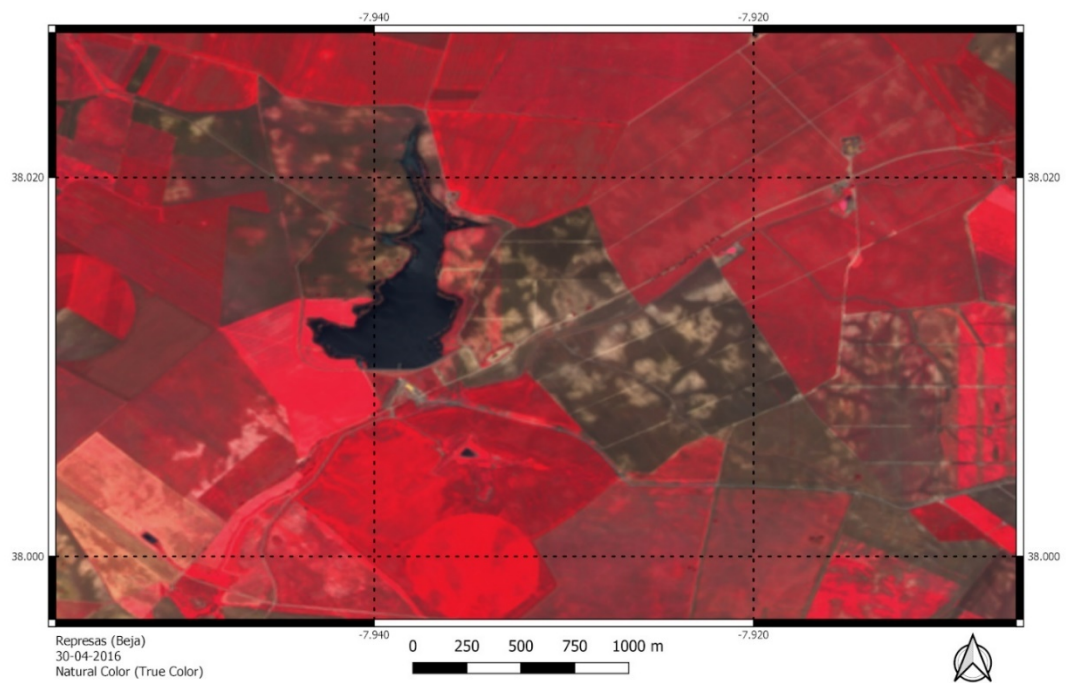


Figura 10.6.2 – Represas em 30-04-2016 (Sentinel 2 NIR)

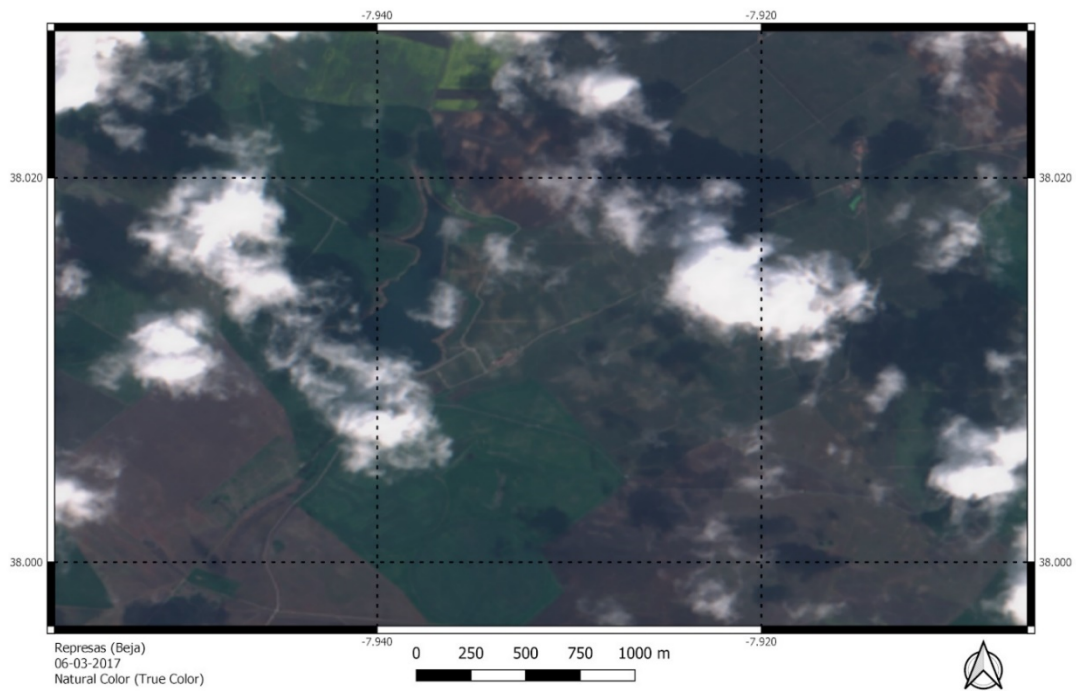


Figura 10.7.1 – Reservas em 06-03-2017 (Sentinel 2 RGB)

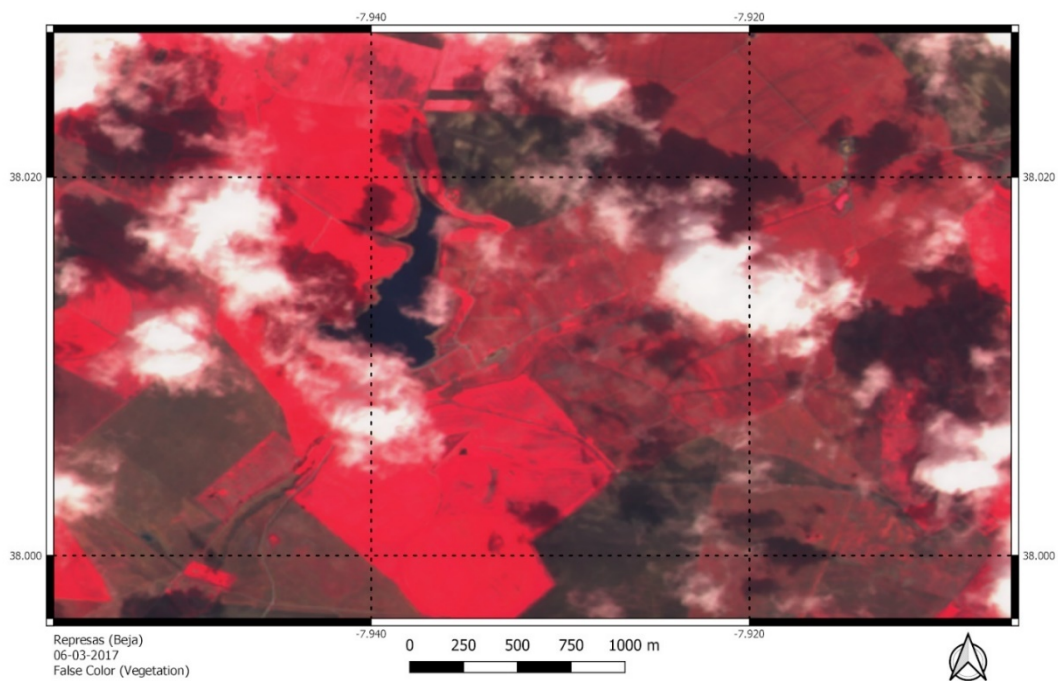


Figura 10.7.2 – Reservas em 06-03-2017 (Sentinel 2 NIR)

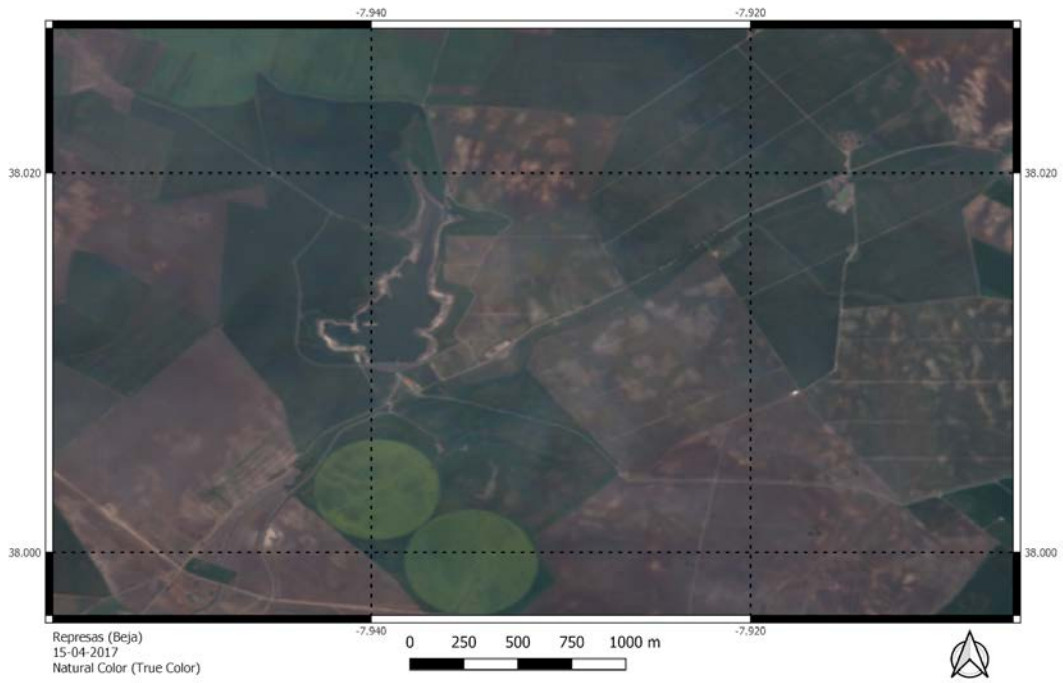


Figura 10.8.1 – Reservas em 15-04-2017 (Sentinel 2 RGB)

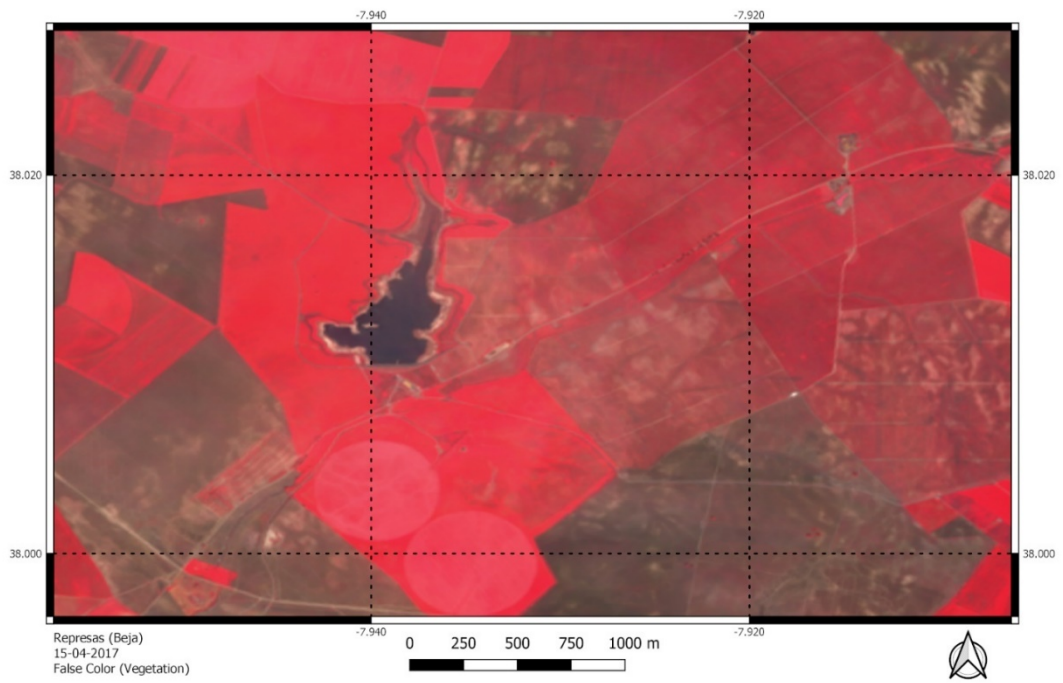


Figura 10.8.2 – Reservas em 15-04-2017 (Sentinel 2 NIR)

### Fonte dos Cântaros 3

Fonte dos Cântaros 3 foi uma ponte romana destruída por atividade agrícola na região em que estava inserida (DN, Ministério Público investiga alegada destruição de sítios arqueológicos em Beja, 2017).

Imagens de radar com início no dia 20 de abril de 2017 e terminados em 15 de maio de 2017 (Fig. 10.1) mostram um evento que é representado por uma sucessiva progressão de uma área que possui um aumento na intensidade de retrodifusão face a momentos anteriores. Uma interpretação possível desse fenómeno é o alargamento da atividade agrícola no terreno na qual o sítio de Fonte dos Cântaros 3 está contido, pois as alterações às condições superficiais podem ter resultado na mudança do comportamento da onda com a área envolvida.

Simultaneamente, imagens óticas correspondentes às datas de 15 e 25 de maio de 2017 (Fig. 11.2 e 11.3) mostram o que aparenta ser o desaparecimento da ponte romana que passa sobre o canal de água.

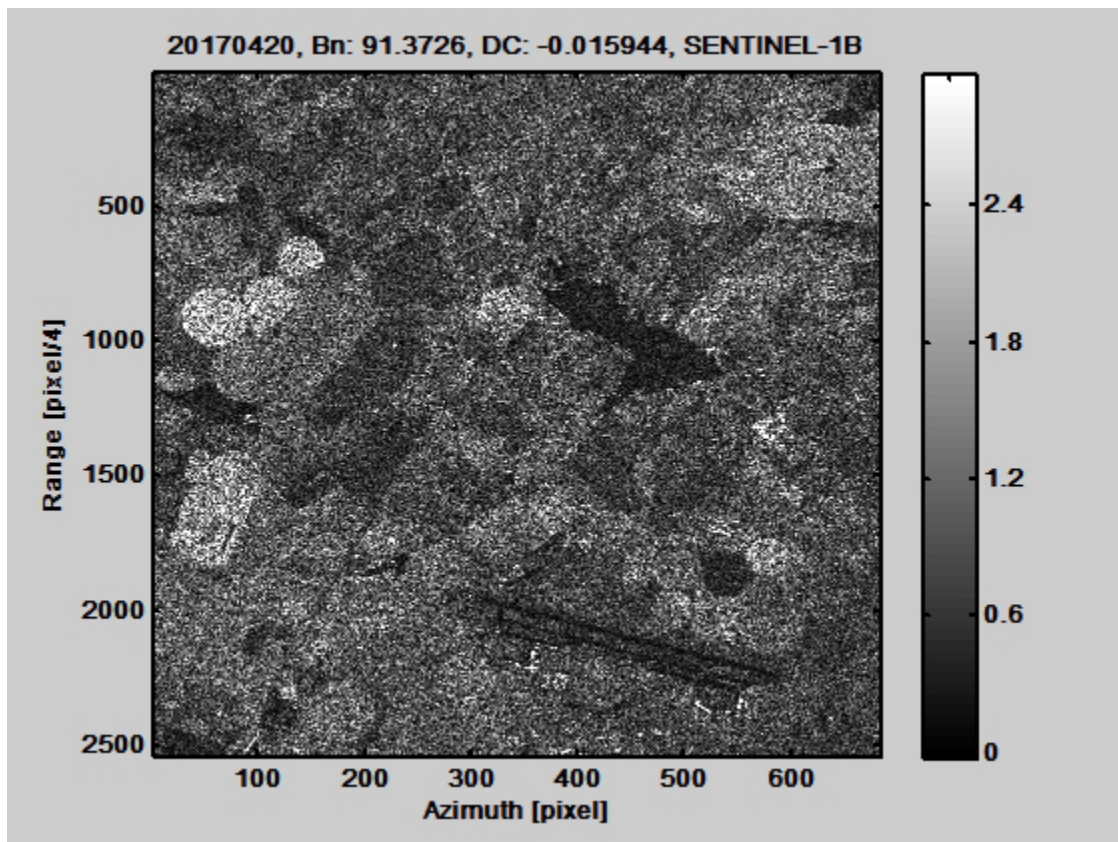


Figura 11.1.1 – Série temporal de radar produzido pelo software Sarproz (20-04-2017)

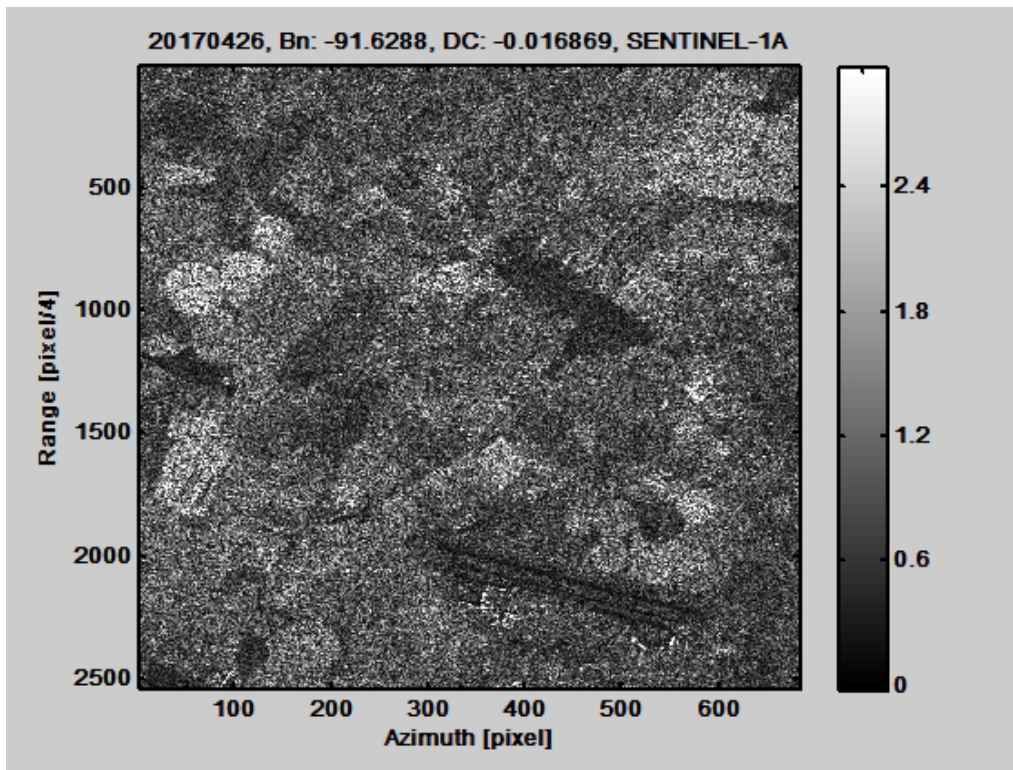


Figura 11.1.2 – Série temporal de radar produzido pelo software Sarproz (26-04-2017)

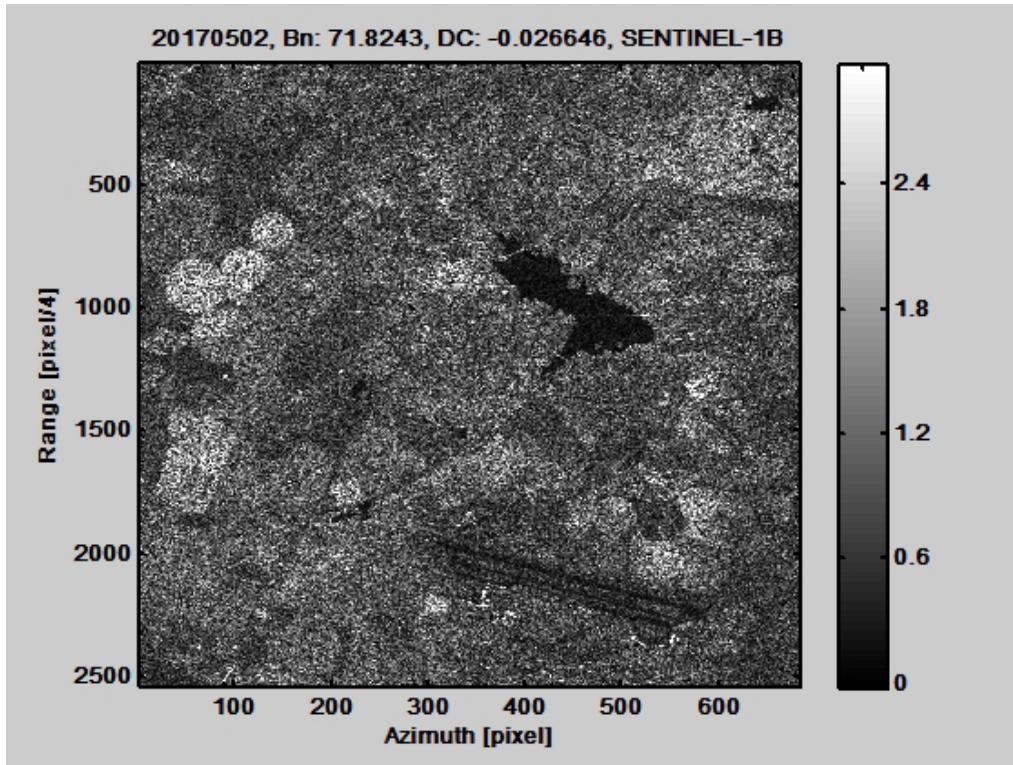


Figura 11.1.3 – Série temporal de radar produzido pelo software Sarproz (02-05-2017)



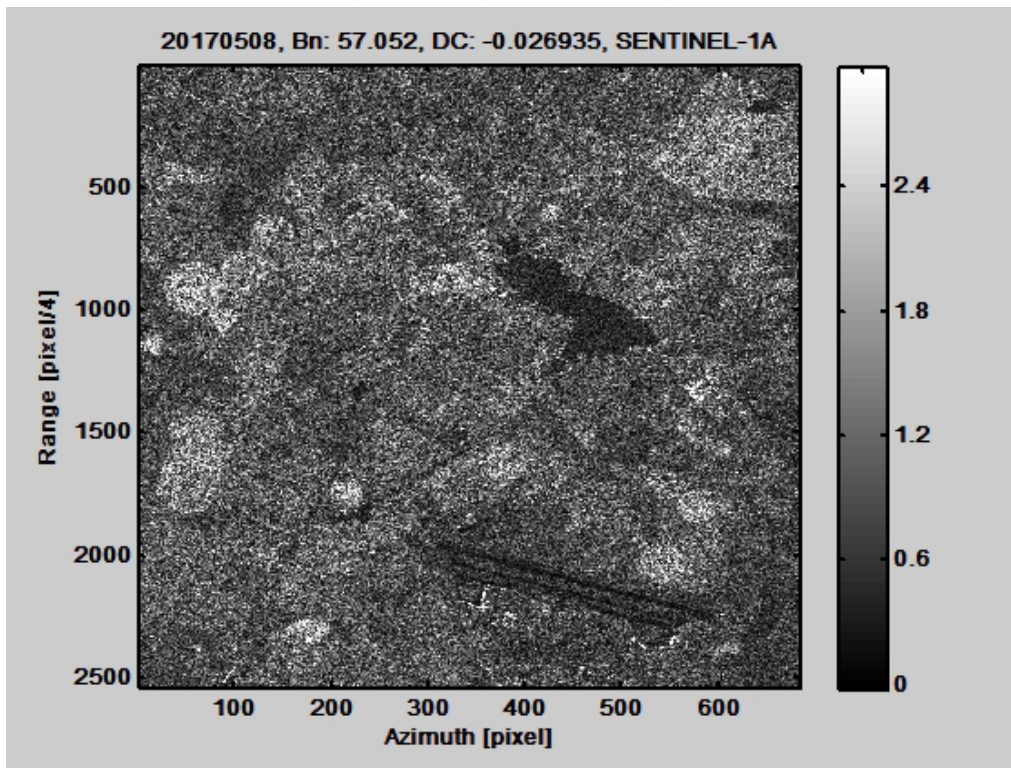


Figura 11.1.4 – Série temporal de radar produzido pelo software Sarproz (08-05-2017)

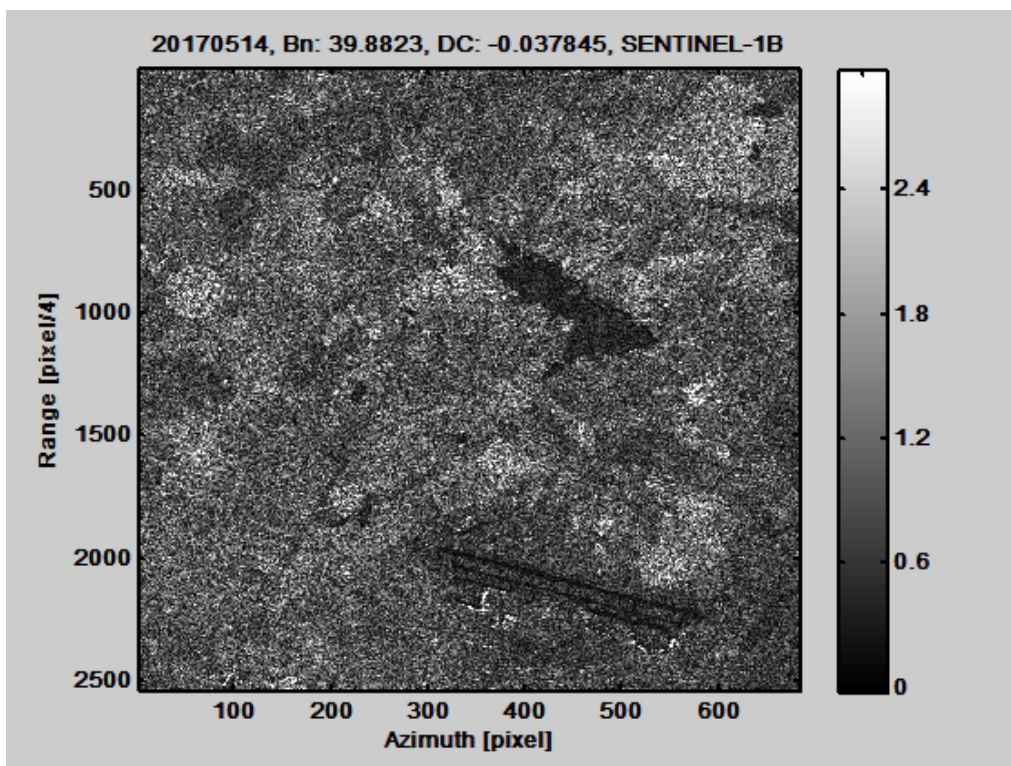


Figura 11.1.5 – Série temporal de radar produzido pelo software Sarproz (14-05-2017)

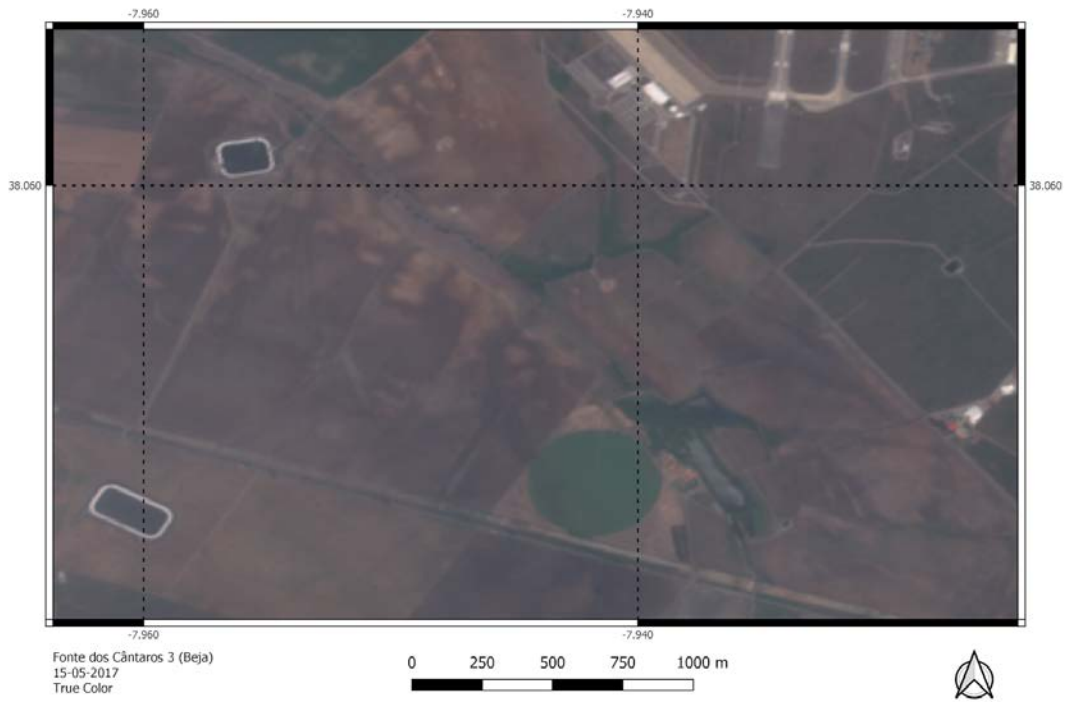


Figura 11.2.1 –Fonte dos Cântaros 3 em 15-05-2017 (Sentinel 2 RGB)

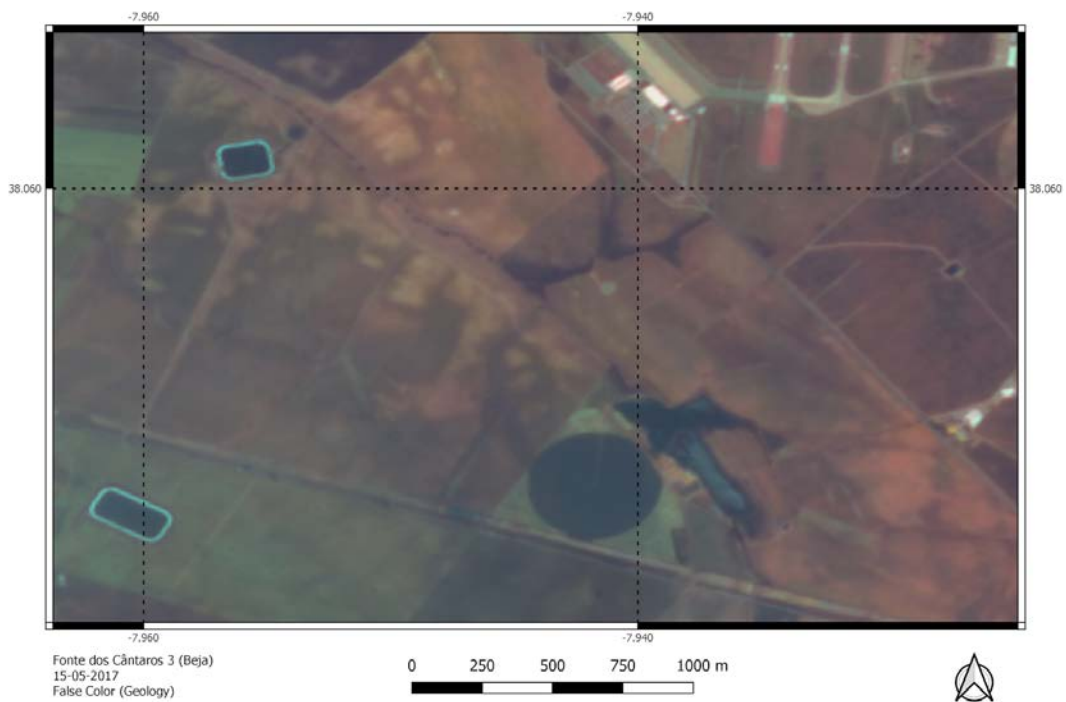


Figura 11.2.2 – Fonte dos Cântaros 3 em 15-05-2017 (Sentinel 2 Geology)

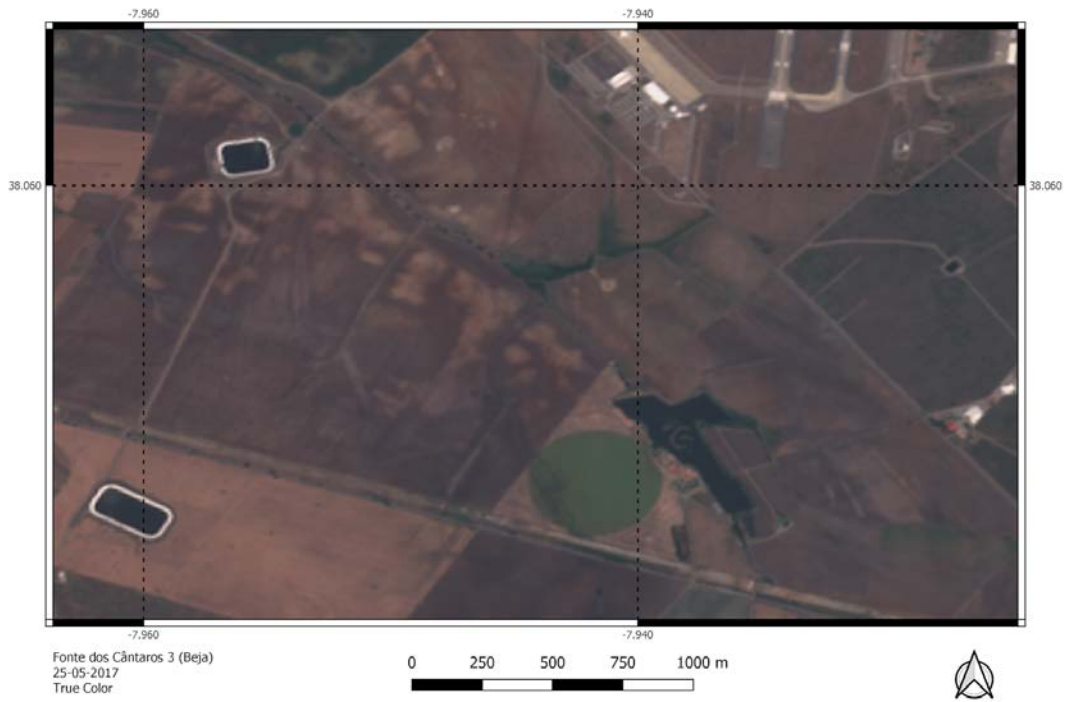


Figura 11.3.1 –Fonte dos Cântaros 3 em 25-05-2017 (Sentinel 2 RGB)

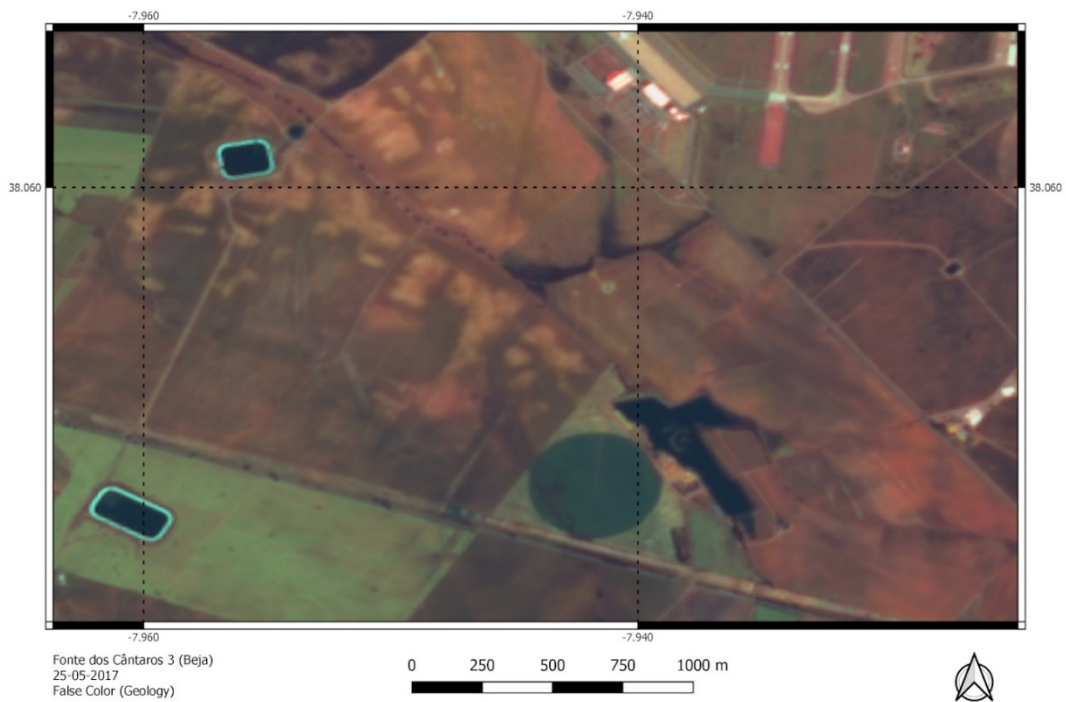


Figura 11.3.2 –Fonte dos Cântaros 3 em 25-05-2017 (Sentinel 2 Geology)

# Conclusão

A deteção remota na área da arqueologia tem avançado profusamente desde os seus primórdios. Estamos de facto a testemunhar aquilo pode ser considerado um dos maiores saltos na metodologia da deteção remota desde a introdução da fotografia aérea e, mais tarde, da introdução dos métodos de prospeção eletromagnética.

A nova abordagem, que emprega o uso de satélites duplamente como veículos e como sensores, é essencialmente uma fusão da fotografia aérea com a prospeção física tradicional. Fornece desta forma ao investigador as qualidades de ambas as abordagens anteriores, nomeadamente:

- O grande campo de visão
- A capacidade de ultrapassar as limitações da vista humana

A fotografia aérea teve, durante o último século, a virtude de ser a abordagem utilizada mais extensivamente na área da deteção remota (Lasaponara & Masini, 2007, p. 214). Mas a fotografia aérea é um método já muito antigo, que se começou a desenvolver como ferramenta científica no século XIX (Bourgeois & Meganck, 2005, p. 16). Foi nos finais deste século que se aprofundaram conhecimentos de fotogrametria e ortorretificação de imagens, o que permitiu a transformação de uma imagem de perspetiva oblíqua numa perspetiva plana. Os princípios já estão firmemente presentes no meio académico há quase um século, com discussões que remontam em 1920 por Hugh Hamshaw Thomas após a sua experiência com o mapeamento na Frente Palestiniana (Thomas, 1920).

Através da sua experiência prática, Thomas já se tinha confrontado com as dificuldades inerentes em aplicar estas metodologias a contextos reais. Vivia, naturalmente, numa era analógica em que o erro humano teria um impacto muito mais profundo no resultado final. Sistemas de levantamento fotográfico aéreo tinham que ser equilibrados entre duas pessoas - piloto e operador - e a estabilidade da aeronave, tal como a sua inclinação, teriam um efeito direto na qualidade final das fotografias. Tal como no século XX, o investigador do século XXI tem que ter em conta todas as particularidades do sensor quando trabalha com imagens de satélite, e aquilo que era a inclinação da aeronave passou a ser a inclinação da visada do sensor montado no satélite.

Tal como foi salientado por Nicola Masini e Rosa Lasaponara (Masini & Lasaponara, 2006, p. 235), a principal vantagem das imagens de satélite face à fotografia aérea são a grande área

abrangida e a possibilidade de georreferenciar cenas de forma fácil e conveniente. Mas não se pode menosprezar algumas outras vantagens que se devem ter em conta, nomeadamente a regularidade com que se pode ter acesso a dados, como também ao custo vastamente reduzido (ou nulo) face à abordagem aérea.

A resolução insatisfatória de sistemas de deteção remota por satélite teve um efeito limitativo nas possibilidades de investigação na área da arqueologia, circunscrevendo os estudos a especializações como a paleogeografia e a ecologia humana (Lasaponara & Masini, 2007, p. 215). A principal causa deste facto seria atribuída à insuficiência do detalhe nas imagens, ao ponto de impossibilitar a identificação de pequenos elementos dentro de contextos arqueológicos. São na verdade estes pequenos elementos que compõem uma grande parte do património humano (Masini & Lasaponara, 2006, pp 230-231), levando conseqüentemente à exclusão de grande parte dos contextos. Tal como H. Thomas, autores e investigadores já possuíam uma boa noção das limitações e das possibilidades que a tecnologia radar comportava, desta vez face à fotografia tradicional dentro do espectro ótico, e recorriam a abordagens como o SAR de forma a contornar as suas limitações (Adams, Brown, & Culbert, 1981, p. 1457).

Mas a melhoria dos sensores espaciais na última década, como também da metodologia que aplica os seus dados, tem-se sentido em múltiplas vertentes. A manutenção de um arquivo histórico de dados de satélite em constante crescimento é de uma enorme importância para a investigação, pois tem levado ao desenvolvimento de técnicas e de algoritmos que têm permitido aproveitar os dados existentes ao seu máximo potencial científico (Prati, Ferretti, & Perissin, 2010, p. 164). Os sensores de satélite, por outro lado, possuem hoje em dia resoluções que no passado apenas eram possíveis através de métodos aéreos ou por deteção remota *in situ*, mas simultaneamente fornecendo todas as vantagens inerentes à abordagem espacial, como a regularidade do tempo de revisita e o fácil acesso aos dados.

Os testes efetuados no âmbito da deteção e prospeção de sítios arqueológicos por radar mostram que, apesar do número reduzido de amostras (Matabodes, Verulamium, Ashwell End), a abordagem pode ser problemática devido à existência de vegetação no local. No entanto, a capacidades de detetar anomalias arqueológicas é possível em solos europeus como foi observado no sítio arqueológico de Ashwell End. Em relação a Matabodes, a presença de vegetação sobre o sítio levou a que não se pudesse fazer uma averiguação das capacidades do SAR, mas serve de exemplo de como a cobertura vegetal impede por completo penetração do

radar no solo. Verulamium, no entanto, é um caso mais problemático e as razões da invisibilidade das estruturas não é aparente sem se ir ao local.

A desconexão espacial aos sítios visados é provavelmente o maior problema que a abordagem espacial comporta, pois trabalha-se muitas vezes com informação cronologicamente desatualizada que pode levar a este tipo de problemas. Por outro lado, a desconexão espacial pode até mesmo ser a sua maior vantagem quando se tratam de casos de estudo que são fisicamente inacessíveis ou pouco práticos.

Dentro de um contexto empresarial de venda de serviços, a utilização do radar como método de *prospecção cega* torna-se difícil devido à imprevisibilidade dos resultados sem a execução de um *ground truth* (confirmação em terreno) prévio. No entanto, não se deve menosprezar o seu valor como método complementar de estudo académico de contextos arqueológicos. Em zonas secas e descobertas de grande dimensão, a utilização de uma imagem de radar de alta resolução pode ser mais economicamente viável do que a utilização de métodos de geofísica, especialmente quando se trata da utilização de GPR.

A utilização de radar como ferramenta de monitorização à base de interferometria é, por outro lado, altamente viável. Deixa de ser necessário utilizar produtos de alta resolução, o que reduz custos associados, e é possível montar um serviço de monitorização constante, que está conjugado com sistemas de informação geográfica para a criação de um sistema de alerta de subsidência e deteção de alterações em redor dos contextos arqueológicos. Em casos que requerem uma maior atenção a detalhe, é então possível realçar a abordagem com imagens de maior resolução, que compartilham, no entanto, custos elevados de aquisição.

É possível que esta abordagem de salvaguarda e monitorização do património histórico e cultural seja a solução para os problemas que têm afetado o Alentejo, causando danos irreversíveis cujo agravamento talvez poderia ter sido impedido com um sistema de vigilância por satélite. As imagens de radar do Sentinel 1 e multiespectrais do Sentinel 2, fornecem os dados necessários para a deteção de alterações drásticas em redor dos sítios arqueológicos, apesar de comportarem uma resolução relativamente baixa. Os sítios de Represas, Pisões e Fonte dos Cântaros 3 servem de testemunho das possibilidades desta tecnologia no âmbito da Arqueologia.

Por outro lado, Portugal pode vir a ser um dos países pioneiros da implementação desta tecnologia no contexto da Arqueologia se houver interesse por parte das entidades culturais em desenvolver este tipo de abordagem. Os trabalhos com base na tecnologia de satélite elaborados

neste relatório ainda estão em fase de desenvolvimento por parte da THEIA, e está atualmente em curso a elaboração de um protocolo com a Direção Regional de Cultura do Alentejo que irá permitir a calibração e o aperfeiçoamento destes trabalhos em prol da salvaguarda do património.

# Bibliografia

- Adams, R. E. W., Brown, W. E., & Culbert, T. (1981). Radar Mapping, Archeology, and Ancient Maya Land Use. *Science*, 213, 7.
- Ashwell End | Sensing the Iron Age and Roman Past: Geophysics and the Landscape of Hertfordshire. (2015). Retrieved from <https://hertsgeosurvey.wordpress.com/category/ashwell-end/>
- Balz, T., Liao, M., Caspari, G., Fu, B., Rosenbauer, R., & Erasmi, S. (2015). Analyzing TerraSAR-X staring spotlight mode data for archaeological prospections in the Altai Mountains. In 2015 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR) (pp. 528–532). IEEE.
- Bamler, R. (1999). The SRTM Mission: A Worldwide 30 m Resolution DEM from SAR, Interferometry in 11 Days. *Photogrammetric Week 1999*, 145-154. Heidelberg: Wichmann Verlag.
- Bourgeois, J., & Meganck, M. (Eds.). (2005). *Aerial Photography and Archaeology 2003: A Century of Information; Papers Presented During the Conference Held at the Ghent University, December 10th-12th, 2003* (Vol. 4). Academia press.
- Boverie, B., Brock, B. C., & Doerry, A. W. (1994). Soil-penetrating synthetic aperture radar (No. SAND--94-2474). Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States).
- Chen, F., Lasaponara, R., & Masini, N. (2017). An overview of satellite synthetic aperture radar remote sensing in archaeology: From site detection to monitoring. *Journal of Cultural Heritage*, 23, 5–11. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2015.05.003>
- Chen, F., Lasaponara, R., Masini, N., & Yang, R. (2015). Satellite SAR data assessment for Silk Road archaeological prospection. *EGU General Assembly, Geophysical Research Abstracts*, 17, EGU2015-10059.
- Chen, F., You, J., Tang, P., Zhou, W., Masini, N., & Lasaponara, R. (2018). Unique performance of spaceborne SAR remote sensing in cultural heritage applications: Overviews and perspectives. *Archaeological Prospection*, 25(1), 71–79. <https://doi.org/10.1002/arp.1591>



- Chisbury | Sensing the Iron Age and Roman Past: Geophysics and the Landscape of Hertfordshire. (2017). Retrieved from <https://hertsgeosurvey.wordpress.com/category/chisbury/>
- Confuorto, P., Plank, S., Novellino, A., Tessitore, S., & Ramondini, M. (2016). Implementation of DInSAR methods for the monitoring of the archaeological site of Hera Lacinia in Crotona (Southern Italy). *Rendiconti Online Della Società Geologica Italiana*, 41, 231–234.
- Conyers, L. B. (2010). Ground-penetrating radar for anthropological research. *Antiquity*, 84(323), 175–184. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00099841>
- Correia, A. M., Maillol, J.-M., & Berard, B. (2015). A GPR study in the Roman Villa of Tourega, Portugal. In 8th Congress of the Balkan Geophysical Society. Retrieved from <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=82899>
- Debevec, P. E., & Malik, J. (1997, August). Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (pp. 369-378). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- DN (2017). *Ministério Público investiga alegada destruição de sítios arqueológicos em Beja*. Retrieved from <https://www.dn.pt/lusa/interior/ministerio-publico-investiga-alegada-destruicao-de-sitios-arqueologicos-em-beja-8850932.html>
- DRCA (2018). Retrieved from <http://www.cultura-alentejo.pt/destaques,0,4857.aspx>
- Durobrivae. (2017). Retrieved from <https://peterborougharchaeology.org/peterborough-archaeological-sites/durobrivae/>
- Gade, M., & Kohlus, J. (2016). After the Great Floods: SAR-Driven Archaeology on Exposed Intertidal Flats. Living Planet Symposium.
- Gondet, S., & Castel, C. (2004). Prospection géophysique à al-Rawda et urbanisme en Syrie au Bronze ancien. *Paléorient*, 30(2), 93-109. doi: 10.3406/paleo.2004.1013
- Heleno, S. I., Oliveira, L. G., Henriques, M. J., Falcão, A. P., Lima, J. N., Cooksley, G., ... & Fonseca, J. F. (2011). Persistent scatterers interferometry detects and measures ground subsidence in Lisbon. *Remote Sensing of Environment*, 115(8), 2152-2167.

- Hinkler, J., Pedersen, S. B., Rasch, M., & Hansen, B. U. (2002). Automatic snow cover monitoring at high temporal and spatial resolution, using images taken by a standard digital camera. *International Journal of Remote Sensing*, 23(21), 4669–4682. <https://doi.org/10.1080/01431160110113881>
- Hintz, G. R. (2015). *Orbital mechanics and astrodynamics: techniques and tools for space missions*. Springer.
- Hogshaw, Bucks. (2015). Retrieved from <https://hertsgeosurvey.wordpress.com/2015/02/22/hogshaw-bucks/>
- Jackson, R., Burleigh, G., Williams, C., Peckham, S., Allen, D., Cartwright, C., & Fawcett, A. (2018). *Dea Senuna: treasure, cult and ritual at Ashwell, Hertfordshire*. London: The British Museum.
- Jordan, E. (1967). *Electromagnetic waves and radiating systems*. Prentice-Halloff India Private Limited; New Delhi.
- Kuehni, R. G. (2016). How many object colors can we distinguish? *Color Research & Application*, 41(5), 439–444. <https://doi.org/10.1002/col.21980>
- Lasaponara, R., & Masini, N. (2005). QuickBird-based analysis for the spatial characterization of archaeological sites: Case study of the Monte Serico medieval village: Quickbird for Archaeological Research. *Geophysical Research Letters*, 32(12), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2005GL022445>
- Lasaponara, R., & Masini, N. (2007). Detection of archaeological crop marks by using satellite QuickBird multispectral imagery. *Journal of Archaeological Science*, 34(2), 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.04.014>
- Lasaponara, R., & Masini, N. (2011). Satellite remote sensing in archaeology: past, present and future perspectives. *Journal of Archaeological Science*, 38(9), 1995–2002. <http://doi.org/10.1016/j.jas.2011.02.002>
- Lee, J.-S., & Pottier, E. (2009). *Polarimetric radar imaging: from basics to applications*. Boca Raton: CRC Press.

- Linck, R., Fassbinder, J. W. E., Buckreuss, S., & Seren, S. (2012a). Satellite-based geophysical prospection of the Roman fortress of Qreiyeh in Syria. In Proceedings of the NSGG-Meeting 'Recent Work in Archaeological Geophysics (pp. 73–77). Retrieved from [http://www.nsgg.org.uk/meetings/old/nsgg2012/RLinck\\_NS GG2012p.pdf](http://www.nsgg.org.uk/meetings/old/nsgg2012/RLinck_NS GG2012p.pdf)
- Linck, R., Fassbinder, J. W., & Buckreuss, S. (2012b). Integrated geophysical prospection by high-resolution optical satellite images, Synthetic Aperture Radar and magnetometry at the example of the UNESCO World Heritage Site of Palmyra (Syria). Proceedings (CD-ROM, Volume 7) of Archaeology and Geoinformatics, 7, 1–26.
- Masaoka, K., Berns, R. S., Fairchild, M. D., & Abed, F. M. (2013). Number of discernible object colors is a conundrum. *JOSA A*, 30(2), 264-277.
- Masini, N., & Lasaponara, R. (2006). Satellite-based recognition of landscape archaeological features related to ancient human transformation. *Journal of Geophysics and Engineering*, 3(3), 230–235. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/3/3/004>
- McCauley, J. F., Schaber, G. G., Breed, C. S., Grolier, M. J., Haynes, C. V., Issawi, B., ... Blom, R. (1982). Subsurface Valleys and Geoarchaeology of the Eastern Sahara Revealed by Shuttle Radar. *Science*, 218(4576), 1004–1020. <https://doi.org/10.1126/science.218.4576.1004>
- Osmanoğlu, B., Sunar, F., Wdowinski, S., & Cabral-Cano, E. (2016). Time series analysis of InSAR data: Methods and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 90–102. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.003>
- Padwick, C., Deskevich, M., Pacifici, F., & Smallwood, S. (2010, April). WorldView-2 pan-sharpening. In Proceedings of the ASPRS 2010 Annual Conference, San Diego, CA, USA (Vol. 2630).
- Parcak, S. H. (2009). *Satellite remote sensing for archaeology*. London; New York: Routledge.
- Pasquali, P., Cantone, A., Riccardi, P., Defilippi, M., Ogushi, F., Gagliano, S., & Tamura, M. (2014). Mapping of Ground Deformations with Interferometric Stacking Techniques. In D. Closson, F. Holecz, P. Pasquali, & N. Milisavljević (Eds.), *Land Applications of Radar Remote Sensing*. InTech. <https://doi.org/10.5772/58225>

- Peltier, A., Bianchi, M., Kaminski, E., Komorowski, J.-C., Rucci, A., & Staudacher, T. (2010). PSInSAR as a new tool to monitor pre-eruptive volcano ground deformation: Validation using GPS measurements on Piton de la Fournaise. *Geophysical Research Letters*, 37(12).
- Perissin, D., & Wang, T. (2011). Time-Series InSAR Applications Over Urban Areas in China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4(1), 92–100. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2010.2046883>
- Pope, K. O., & Dahlin, B. H. (sem data). Ancient Maya Wetland Agriculture: New Insights from Ecological and Remote Sensing Research, 20.
- Portal do Arqueólogo. (2018). Retrieved from <http://arqueologia.patrimoniocultural.pt/index.php?sid=sitios.resultados&subsid=2457123>
- Posnansky, M. (1982). African archaeology comes of age. *World Archaeology*, 13(3), 345–358. <https://doi.org/10.1080/00438243.1982.9979838>
- Prati, C., Ferretti, A., & Perissin, D. (2010). Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations. *Journal of Geodynamics*, 49(3–4), 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2009.10.011>
- Público (2017a). *Ponte romana e sítios arqueológicos destruídos para plantar amendoal*. Retrieved from <https://www.publico.pt/2017/10/09/local/noticia/beja-ponte-romana-e-sitios-arqueologicos-foram-destruidos-para-plantar-amendoal-1787981>
- Público (2017b). *Olival intensivo destrói importante sítio arqueológico no Alentejo*. Retrieved from <https://www.publico.pt/2017/04/23/local/noticia/mobilizacao-de-solos-para-olival-destrói-importante-sítio-arqueologico-nos-arredores-de-beja-1768667>
- Roque, D., Fonseca, A. M., Henriques, M. J., & Falcão, A. P. (2014). A First Approach for Displacement Analysis in Lisbon Downtown Using PS-InSAR. *Procedia Technology*, 16, 288–293. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.10.094>
- Tapete, D., Cigna, F., & Donoghue, D. N. (2016). ‘Looting marks’ in space-borne SAR imagery: Measuring rates of archaeological looting in Apamea (Syria) with TerraSAR-X Staring Spotlight. *Remote Sensing of Environment*, 178, 42–58. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.055>

- Tapete, D., Cigna, F., Donoghue, D. N. M., & Philip, G. (2015). Mapping changes and damages in areas of conflict: From archive C-band SAR data to new HR X-band imagery, towards the sentinels. In European Space Agency, (Special Publication) ESA SP. University of Durham, Durham, United Kingdom.
- Thomas H. (1920). Aircraft photography in the service of science. *Nature* 105, 257-259.
- Verhulst, N., Govaerts, B. (2010). The normalized difference vegetation index (NDVI) GreenSeekerTM handheld sensor: Toward the integrated evaluation of crop management. Part A: Concepts and case studies. Mexico, D.F.; CIMMYT.
- Verulamium | Sensing the Iron Age and Roman Past: Geophysics and the Landscape of Hertfordshire. (2018). Retrieved from <https://hertsgeosurvey.wordpress.com/category/verulamium/>
- Weissgerber, F., Colin-Koeniguer, E., Nicolas, J.-M., & Trouvé, N. (2017). 3D Monitoring of Buildings Using TerraSAR-X InSAR, DInSAR and PolSAR Capacities. *Remote Sensing*, 9(10), 1010. <https://doi.org/10.3390/rs9101010>
- White, K. (2018). VERVLAMIVM CATVVELLORVM. Retrieved from <http://roman-britain.co.uk/places/verulamium.htm>
- Zhang, Y. (2004). Understanding Image Fusion. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(6), 657–661.