

# Avaliação da Tecnologia InSAR para Monitorização de Grandes Obras

Eufémia da Gloria Rodrigues Patrício

Engenharia Geográfica

Departamento de Geociências Ambiente e Ordenamento do Território  
2018

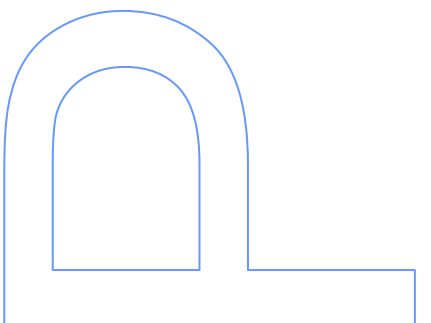
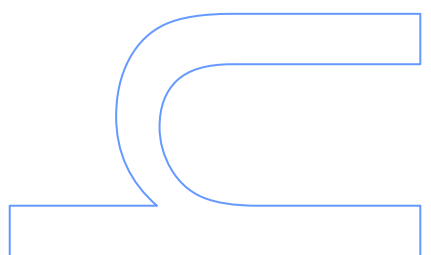
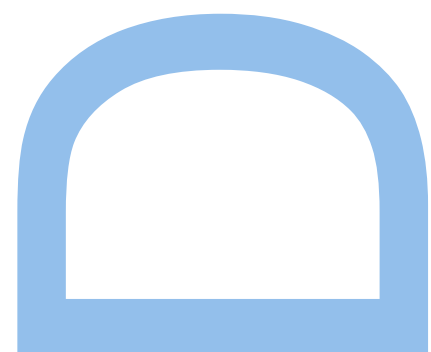
## **Orientador**

Professor Doutor Joaquim João Moreira de Sousa,

Professor Auxiliar com Agregação, Universidade de Trás os Montes e Alto Douro

## **Coorientadora**

Doutora Maria Luísa M. Cerqueira Bastos, Investigadora Principal,  
Universidade do Porto





# DEDICATÓRIA

Aos meus Pais





# AGRADECIMENTOS

Realizar uma tese de doutoramento de forma autónoma, não consigo imaginar. São tantas as particularidades a que devemos estar atentos, as dificuldades de saber qual o caminho a seguir, trabalhar e estudar ao mesmo tempo, que parece que os trabalhos nunca vão ter fim. Por isso, tenho que deixar explícito que este trabalho nunca teria sido concluído sem a ajuda de várias pessoas e entidades.

Agradeço em primeiro lugar aos meus orientadores, Professor Doutor Joaquim João Sousa e Investigadora Principal Doutora Luísa Bastos, sem o seu precioso apoio não teria conseguido. A forma como lidaram com todo o processo, os conhecimentos que me transmitiram, o facto de me terem proporcionado contactar e trabalhar com grupos de investigação internacional na área da InSAR, o apoio que me deram com sugestões de correção e alteração aos textos, toda a paciência que tiveram com o atraso nos prazos que me foram propostos, são fatores que me fazem acreditar que de facto a sorte existe.

Um agradecimento muito especial aos colegas que realizaram investigação na Universidade de Trás os Montes e Alto Douro no âmbito das técnicas MT-InSAR, Matúš Bakoň e Milan Lazecký, com quem tive a oportunidade de aprender e discutir os resultados dos testes de processamento InSAR efetuados. Ao colega Antonio Ruiz da Universidade de Jaén, Espanha, pela simpatia e pelas explicações no âmbito dos processamentos InSAR, no StAMPS. Terão sempre um lugar memorável na minha formação académica e na minha vida.

A nível institucional, um agradecimento à Agência Espacial Europeia (ESA) pela cedência das imagens SAR.

Agradeço também à EDP, na pessoa da Engenheira Elisa Almeida e à empresa Norvia, pelos dados cedidos e pela indicação dos locais onde poderiam ser realizados alguns testes.

Agradeço aos meus pais, que apenas com a 4ª classe e cada um à sua maneira, foram as pessoas mais sábias nos estímulos que deram para continuar a minha vida académica. Agradeço à minha irmã, ao meu cunhado, à Diana (a “minha pequenina” que agora já me dá conselhos) e ao Francisco, pela força e por compreenderem as minhas ausências e resolverem tudo, quando foi necessário.

Agradeço ao António, por estar sempre presente (mesmo nas ausências), e por lidar com toda a situação com sabedoria e humor.

Às amigas de sempre e para sempre, Elisabete Soares e Elisabete Monteiro, à Isa, a mais recente amiga, que em pouco tempo ajudou-me tanto, e a todos os colegas que me ajudaram nos dias menos bons, o meu Obrigada.

## RESUMO

A necessidade de monitorizar estruturas de forma mais rápida, tornou-se emergente dada a imponente que as estruturas comportam, estando continuamente sujeitas a deformações causadas por fatores internos e externos à própria estrutura, nomeadamente a possível instabilidade do terreno envolvente, as alterações físico-químicas dos próprios materiais de construção utilizados, instabilidade do terreno nas fundações, alterações da pressão e temperatura atmosféricas, etc. O que se espera é que estas estruturas tenham um tempo de vida útil elevado, com segurança tanto para vidas humanas como para outros recursos associados à própria estrutura e zona envolvente, prevenindo ao máximo as catástrofes. A evolução tecnológica associada à investigação científica no âmbito da recolha, tratamento e análise da Informação Geoespacial, foi uma mais-valia no campo da monitorização. Inúmeros equipamentos, sensores e *software*, foram desenvolvidos para medição e análise de terrenos e estruturas, nem sempre com o objetivo específico do controlo de deformações, mas com as suas características de medição associadas a uma elevada precisão tornaram-se adequados para este fim.

Este trabalho surge no âmbito da monitorização de estruturas tendo em vista a aplicação da técnica MT-InSAR, cujo procedimento se baseia na análise interferométrica de um conjunto de imagens SAR obtidas por satélites que transportam Radar de Abertura Sintética (SAR). Assim, através de uma série de imagens obtidas em várias épocas, onde seja possível identificar sucessivamente pontos com um comportamento estável do ponto de vista da fase, (PS, *Persistent Scatterers*) é possível detetar deslocamento da estrutura na linha de vista do sensor, através do cálculo da diferença de fase. Sendo esta técnica a mais recente para monitorização de obras no conjunto de todas as técnicas já conhecidas e aplicadas, os resultados produzidos em cada obra ainda geram expectativas quanto ao sucesso esperado. As características das obras são distintas em termos de orientação da estrutura, dimensão, envolvente e tipo de material usado.

Nesta tese são descritos vários testes de processamento recorrendo às técnicas MT-InSAR implementadas nos programas StaMPS e SARPROZ, nomeadamente a técnica PSI, SB e a junção (PSI e SB). As obras escolhidas para efetuar o estudo foram barragens, escombreyras, uma falha geológica e taludes/encostas, localizadas em Portugal, Eslováquia e Espanha. No âmbito das barragens foram analisadas, a Barragem do Alto Ceira, Paradela e Raiva (Portugal), a Barragem de *Cunovo* do complexo Gabčíkovo-Nagymaros (Eslováquia), as escombreyras da Barragem de

Salamonde (Portugal), um talude junto ao Itinerário Complementar 5 (IC5) na região de Alfandega da Fé, bem como toda a área envolvente ao Município desta região e a falha de Zafarraya na Serra Tejada, Cordilheira Bética (Espanha).

Foram usadas imagens SAR dos satélites ERS, Envisat, ALOS, Sentinel e Terra SAR-X.

Alguns testes efetuados, permitiram concluir que a técnica não resulta em casos de terrenos menos favoráveis, para a retro-reflexão dos sinais. Esses resultados ajudaram a esclarecer as questões inicialmente colocadas, sobre a importância da envolvente, dimensão e características da obra, para a aplicação da técnica com sucesso. Por outro lado, foi possível verificar, que a técnica pode ser levada ao seu potencial extremo, no caso de zonas onde os difusores persistentes são estáveis.

A presença de *outliers* nos resultados da monitorização de estruturas artificiais, foi um estímulo para se desenvolver uma abordagem semiautomática de análise, que permitisse descartar esses *outliers*. O algoritmo final destina-se a apoiar a cadeia de processamento e a fornecer, aos utilizadores, resultados finais, sem *outliers*, que serão mais fáceis de entender e de reavaliar.

Neste trabalho propõe-se ainda um novo método para refinar e corrigir os valores de temperatura e consequentemente analisar os valores da dilatação térmica,  $k_{temp}$ , em cada PS, numa ponte em Svinov, Ostrava. A dilatação térmica é uma componente importante para analisar na monitorização de pontes com observações InSAR na banda-X e o refinamento do  $k_{temp}$  melhora a coerência dos pontos e ajuda a avaliar, com precisão, a deformação linear de uma ponte.

**Palavras chave:** MT-InSAR, Persistent Scatterer, Barragens, Pontes, Monitorização, Outliers, Dilatação térmica.

# ABSTRACT

The need to monitor man-made structures quickly, has become increasingly important given the magnificence of these structures being continually subjected to deformations caused by internal and external factors to the structure itself, including the possible instability of the surrounding land, the physical and chemical changes of construction materials, instability of the ground foundations, changes in pressure and atmospheric temperature. What is expected is that these structures have a long lifetime, with safety for human life and for other resources associated with the structure itself and the surrounding area, preventing catastrophes to the maximum extent possible.

The technological evolution associated with scientific research in the collection, treatment and analysis of Geospatial Information was an added value in the scope of monitoring. Several type of equipment, sensors and software have been developed to measure and analyze terrains and structures, not always for the specific purpose of deformation control, but with its measurement characteristics associated with high accuracy have become suitable for this purpose.

In this way, this work arises in the scope of the man-made structures monitoring, for the application of the MT-InSAR technique, a procedure which is based on the interferometric analysis of a set of SAR images obtained by satellites carrying Synthetic Aperture Radar (SAR). These images are obtained in the microwave band of the electromagnetic spectrum.

Phase differences are analyzed for points that maintain a stable scattering behavior in the period considered for analysis.

Thus, through a series of images obtained at different times, where it is possible to identify successively points with a stable behavior from the point of view of the phase, (Persistent Scatterers) it is possible to detect displacement of the structure in the line of sight of the sensor, (vertical movements) by calculating the phase difference.

Since this technique is the most recent for monitoring works in the set of all known and applied techniques, the results produced in each work still generate expectations as to the expected success. The characteristics of the works are distinct in terms of structure orientation, dimension, surrounding and type of material used.

In this dissertation several processing tests using MT-InSAR techniques, implemented in the software StaMPS and SARPROZ, namely the PSI, SB and techniques junction

(PSI and SB) are described. The local chosen to carry out the study were dams, geological faults, heaps and slopes, located in Portugal, Slovakia and Spain. The Alto Ceira, Paradela and Raiva dams (Portugal), the Cunovo dam of the Gabčíkovo-Nagymaros complex (Slovakia), the heaps of the Salomonde dam (Portugal), an IC5 landslide in the Alfandega da Fe region as well as the whole area surrounding the Municipality and the fault of Zafarraya, Sierra Tejada in the Bética mountain range (Spain).

SAR images of the satellites ERS, Envisat, ALOS, Sentinel and Terra SAR-X were used.

Some tests made allowed to conclude that the technique does not result in cases of less favorable terrain, for the retroreflection of the signals. This result allowed to conclude about issues initially proposed, about the importance of surrounding, dimension and characteristics of the work for the successful application of the technique. On the other hand, it was possible to verify that the technique can be carried to the limit, in the case of zones where the Persistent Scatterers are stable.

The presence of outliers in the results of the monitoring of artificial structures was a stimulus to develop a semi-automatic approach of analysis, to discard those outliers. The final algorithm is intended to support the processing chain and provide users final results without outliers that will be easier to understand and re-evaluate.

In this work a new method is proposed to refine and correct the temperature values and consequently to analyse the thermal dilation values,  $k_{temp}$ , in each PS on a bridge at Svinov, Ostrava. Thermal dilation is an important component in the case of X-band InSAR bridge monitoring and the  $k_{temp}$  refinement value improves point coherence and helps to accurately assess linear deformation of a bridge.

Keywords: MT-InSAR, Persistent Scatterer, Dams, Bridges, Monitoring, Outliers, Thermal Dilation.

# ÍNDICE GERAL

<b>Dedicatória</b> .....	<b>iii</b>
<b>Agradecimentos</b> .....	<b>v</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>vii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>ix</b>
<b>Índice Geral</b> .....	<b>xi</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>xiv</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>xv</b>
<b>Lista de Gráficos</b> .....	<b>xx</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b> .....	<b>xxi</b>
<b>CAPÍTULO 1 - Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1. Motivação.....	5
1.2. Objetivos .....	6
1.3. Contributos da tese .....	7
1.4. Estrutura da tese .....	7
<b>CAPÍTULO 2 - Técnicas de Monitorização de estruturas</b> .....	<b>9</b>
2.1. Introdução .....	9
2.2. Práticas correntes na monitorização de Barragens e Pontes.....	11
2.3. Novas tecnologias para monitorização .....	22
<b>CAPÍTULO 3 - Interferometria SAR: Princípios e Conceitos</b> .....	<b>32</b>
3.1 Um Pouco de História.....	32
3.2 Radar de Abertura Sintética (SAR).....	37
3.3 Interferometria Radar de Abertura Sintética (InSAR).....	42
3.4 Limitações da técnica InSAR convencional .....	54
3.5 Interferometria SAR Multi-Temporal (MT-InSAR) .....	58
<b>CAPÍTULO 4 - Métodos de Processamento InSAR</b> .....	<b>64</b>
4.1. StaMPS/StaMPS-Multi Temporal InSAR .....	65
4.2. SARPROZ.....	73

<b>CAPÍTULO 5 - Áreas de Teste .....</b>	<b>79</b>
5.1. Encostas e Taludes .....	80
5.2 Barragens.....	81
5.2.1 Barragem da Paradela.....	81
5.2.2 Barragem da Raiva.....	82
5.2.3 Barragem Cunovo, Gabčíkovo-Nagymaros (Eslováquia).....	84
5.2.4 Barragem do Alto Ceira .....	85
5.3 Pontes.....	86
5.4 Acesso aos dados SAR.....	87
<b>CAPÍTULO 6 - Análise dos resultados obtidos.....</b>	<b>88</b>
6.1. Introdução .....	89
6.2. Monitorização de encostas e de taludes.....	91
6.2.1. Deslizamento de terras numa Encosta perto de Zilina (Eslováquia).....	91
6.2.2. Falha de Zafarraya-Serra Tejada Antiform, Cordilheira Bética (Espanha)	97
6.2.3. Escombreyras de Salamonde, Portugal.....	99
6.2.4. Análise de Deformações no Municipio de Alfandega da Fé e área envolvente, Portugal.....	100
6.2.5. Encosta de Alfandega da Fé no IC5, Portugal .....	101
6.2.5.1. Comparação com Observações Geodésicas .....	108
6.3. Processamento de Barragens .....	118
6.3.1. Barragem da Paradela.....	118
6.3.2. Barragem da Raiva.....	121
6.3.3. Barragem de Cunovo (Eslováquia).....	132
6.3.4. Barragem do Alto Ceira .....	134
6.3.4.1. Descrição dos Métodos de Observação Geodésica da Barragem do Alto Ceira (Antiga).....	135
6.3.4.2. Análise dos resultados do Sistema de Observação Geodésica .....	138
6.3.4.3. Processamento Interferométrico da Barragem do Alto Ceira e comparação com as observações Geodésicas .....	145



<b>CAPÍTULO 7 – Aperfeiçoamento de Técnicas InSAR.....</b>	<b>150</b>
7.1. Algoritmo <i>Denoising</i> -Análise Multivariada de <i>Outliers</i> em Dados SAR .....	153
7.2. Dilatação Térmica .....	164
<b>CAPÍTULO 8 - Conclusões .....</b>	<b>173</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>180</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>188</b>
Anexo 1 - Exemplo da utilização da aplicação da ESA para verificar a disponibilidade de imagens SAR sobre a área de interesse .....	188
Anexo 2 – Exemplo de uma proposta CAT-1, submetida à ESA, no âmbito da realização deste trabalho .....	189
Anexo 3 – Relatório de progresso submetido à ESA no âmbito do CAT-1 apresentado .....	192
Anexo 4 – Disponibilidade de imagens SAR nas áreas de interesse.....	196
Anexo 5 – Gráficos da distribuição da Base Perpendicular e da diferença de frequências Doppler Centroide, na Encosta de Alfandega da Fé junto ao IC5.....	199

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos principais métodos usados na monitorização de estruturas, incluindo InSAR.....	29
Tabela 2 - Software comerciais e livres com capacidades de processamento DInSAR e MT-InSAR.....	78
Tabela 3 - Observações Geodésicas da encosta no IC5. ....	109
Tabela 4 - Estimativa da tendência de deformação horizontal para pontos selecionados .....	121
Tabela 5 - Algoritmos existentes e algoritmo Inovador <i>Denoising</i> .....	152

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ponto de Referência materializado por pilar. ....	12
Figura 2 - Ponto objeto materializado no paramento de jusante da barragem por um alvo refletor. ....	12
Figura 3 - Exemplo de um dispositivo de centragem forçada. ....	12
Figura 4 - Esquema de uma barragem com equipamento de medição. ....	13
Figura 5 - Monitorização de uma barragem com GNSS. ....	14
Figura 6 - Pêndulo direito. ....	15
Figura 7 - Pêndulo Invertido. ....	15
Figura 8 - Pêndulo Invertido com instalação de Base para o Coordenómetro. ....	15
Figura 9 - Coordenómetros para leitura manual de Pêndulos. ....	16
Figura 10 - Coordenómetros para leitura automática (ADAS). ....	16
Figura 11 - Esquema de extensómetros de varas. ....	16
Figura 12 - Cabeça de extensómetro para medição. ....	16
Figura 13 - - Medidor de juntas externo de LVTD. ....	17
Figura 14 - Medidor sobre a junta. ....	17
Figura 15 - Esquema de uma Barragem de aterro. Resultados da observação da pressão da água intersticial no núcleo da barragem. ....	18
Figura 16 - Equipamentos de leitura dos dispositivos de observação. ....	18
Figura 17 - Exemplo de ponte com os respetivos sensores de medição. ....	21
Figura 18 - Sensores de fibra ótica. ....	22
Figura 19 - As missões SAR mais relevantes apresentadas por data e banda (C, L e X). ....	36
Figura 20 - As missões SAR mais relevantes, planeadas por algumas agências espaciais até 2020. ....	36
Figura 21 - Geometria de aquisição das imagens SAR. ....	37
Figura 22 - O conceito Radar de Abertura Sintética (SAR). ....	39
Figura 23 - Exemplo dos três modos de aquisição, ScanSAR, Stripmap e Spotlight SAR, do sensor COSMO - Sky-Med. ....	40
Figura 24 - Imagem de amplitude (Golfo da Finlândia em 8-2-2017). Os aglomerados de reflexos de radar brancos e brilhantes em toda a imagem representam cidades, entre as quais Helsínquia na margem superior do Golfo. ....	41
Figura 25 - Geometria de aquisição InSAR, relativa ao alvo com altura $h$ em relação à superfície de referência (esquerda) e imagem 3-D com o ângulo squint (direita). ....	43

Figura 26 - Interferograma do sismo de Aquila, Itália.....	47
Figura 27 - Relação entre o deslocamento no terreno $\Delta R$ e o deslocamento da fase do sinal.....	51
Figura 28 - Contribuição das linhas de base temporal e espacial na criação de interferogramas.....	55
Figura 29 - Representação dos mecanismos de reflexão que contribuem para a formação de um pixel da imagem SAR.....	60
Figura 30 - Método PSI para formação de interferogramas.....	67
Figura 31 - <i>Small Baseline</i> para formação de interferogramas.....	67
Figura 32 - Função Distribuição de Probabilidade para a amplitude (esquerda) e Função Distribuição de Probabilidade para a fase residual (direita) para um modelo de sinal constante avaliado para SNR de 0.5, 4 e 100.....	68
Figura 33 - Diagrama de fluxo de processamento com StaMPS/MTI.....	72
Figura 34 - Diagrama de fluxo de processamento do SARPROZ.....	74
Figura 35 - Interface de Processamento do SARPROZ.....	75
Figura 36 - Recuperação do APS.....	76
Figura 37 - Localização geográfica das áreas que serviram para a realização de testes.....	79
Figura 38 - Barragem da Paradela.....	82
Figura 39 - Barragem da Raiva.....	83
Figura 40 - Barragem Gabčíkovo-Nagymaros.....	84
Figura 41 - Enquadramento da barragem de Gabčíkovo-Nagymaros.....	84
Figura 42 - Barragem do Alto Ceira.....	85
Figura 43 - Melhorias a implementar nos métodos MT-InSAR atuais.....	90
Figura 44 - Velocidades médias de deformação na linha de vista do sensor (mm/ano), como resultado da análise clássica de PSInSAR sobre deslizamento de encostas em zona urbana (marcadas com linha vermelha na imagem) em Zilina, Eslováquia.....	92
Figura 45 - Mapa de deformação da Sierra Tejeda antifórma, com indicação das zonas que sofrem maiores deformações (círculos brancos na imagem) em relação à área envolvente.....	98
Figura 46 - Resultados do teste com o método SBAS em áreas descorrelacionadas, na envolvente da Escumbreira de Salamonde que mostram áreas com deformação suspeitas.....	99
Figura 47 - Interpretação pouco clara de interferogramas: a) Mapa da situação na envolvente de, Agua da Pala (Google Earth), b) Imagem de intensidade média do conjunto de dados Alos Palsar na envolvente de Agua da Pala, c) Interferograma Alos	

Palsar de 2008-04-09 a 2008-05-25 (46 dias), d) Interferograma Alos Palsar de 2008-07-10 a 2009-07-13 (368 dias).....	100
Figura 48 - Mapa de deformações sobre Alfândega da Fé e área envolvente, contendo as velocidades de deformação (mm/ano) na linha de visada do sensor.....	101
Figura 49 - Coerência estimada na área de interesse. Foi definido o limite inferior de 0,4 para a coerência pelo que os pontos com coerência inferior a 0,4 não são apresentados na imagem. O ponto de referência (PR) aparece a cor-de-rosa na imagem. ....	103
Figura 50 - Altitudes estimadas para a área de interesse. As altitudes foram estimadas usando o MDT obtido a partir do SRTM na banda-X, com resolução de 1 segundo de arco e, aparentemente, a maioria dos pontos foram bem estimados. ....	104
Figura 51 - Velocidade da deformação na linha de vista do sensor (LOS). O ponto de referência está assinalado a cor-de-rosa. ....	105
Figura 52 - Séries temporais da deformação estimada, na linha de vista do sensor.	106
Figura 53 - Localização das marcas geodésicas na encosta a estudar.....	108
Figura 54 - Deformação estimada por InSAR, juntamente com a deformação obtida com os dados geodésicos. A escala de cores do lado esquerdo é para os resultados InSAR e do lado direito para os resultados geodésicos. ....	111
Figura 55 - Configuração do conjunto de dados. Os pontos representam as imagens disponíveis, as linhas representam os interferogramas.....	112
Figura 56 - Alguns interferogramas no período de 2006 a 2008. ....	114
Figura 57 - Interferogramas no período de 2009 a 2010. ....	115
Figura 58 - Interferogramas no período de 2010 a 2011.....	116
Figura 59 - Interferogramas selecionados do ALOS PALSAR, mostrando possível deslizamento de terras na AOI Alfandega da Fé.....	117
Figura 60 - Tendência da deformação linear na LOS na barragem da Paradela, avaliada com o software SARPROZ PS-InSAR no processamento de dados Envisat ASAR na trajetória 273 (esquerda) e trajetória 44 (direita). ....	119
Figura 61 - Imagem da barragem da Raiva vista do radar nas trajetórias 44 (esquerda) e 316 (direita). As cores representam a altitude estimada. A parte jusante fica para o topo e o norte fica à direita. A barragem é monitorizada a partir do topo, ou seja, é visível que os pontos PS, na parte inferior da imagem, correspondem à parte inferior da barragem. Pontos com elevada intensidade, geralmente, são considerados de qualidade.....	122
Figura 62 - Deformação linear estimada para a trajetória 44 (sem incluir no modelo a influência do nível da água), com marcas distintas dos pontos PS. ....	124
Figura 63 - Séries temporais da deformação estimada para os diferentes pontos PS (trajetória 44). ....	124

Figura 64 - Deformação linear estimada para a trajetória 316 (sem incluir no modelo a influência do nível da água), com marcas distintas para os pontos PS. ....	125
Figura 65 - Séries temporais da deformação estimada para os pontos PS, assinalados a branco (trajetória 316).....	125
Figura 66 - Estimativa da influência do nível da água, na direção horizontal (trajetória 44). ....	126
Figura 67 - Influência do nível da água estimada (na direção horizontal) para a trajetória 316. ....	127
Figura 68 - Deformação linear estimada para a trajetória 44 (sem incluir a influência do nível da água no modelo), com marcas distintas dos pontos. ....	128
Figura 69 - Séries temporais da deformação estimada para os diferentes pontos da trajetória 44.....	129
Figura 70 - Estimativa da deformação linear para a Trajetória 316 (influência do nível da água não incluído no modelo), com diferentes pontos assinalados.....	130
Figura 71 - Séries temporais da deformação estimada para os diferentes pontos da trajetória 316.....	131
Figura 72 - Velocidades médias da deformação na linha de vista do sensor, sobre a barragem de <i>Cunovo</i> . ....	133
Figura 73 - Barragem de Gabčíkovo observada com PSInSAR assumindo um deslocamento não linear.....	133
Figura 74 - Séries temporais dos dois pontos PS, PS51 e PS172. ....	134
Figura 75 - Representação esquemática da barragem do Alto Ceira com as respetivas redes do SGO.....	136
Figura 76 - Sistema de eixos XX e YY associado ao SOG. ....	138
Figura 77 - Gráfico da distribuição dos conjuntos de dados utilizados no processamento interferométrico: a) ERS e b) Envisat.....	146
Figura 78 - Mapas de Refletividade obtidos a partir do conjunto de imagens SAR adquiridas pelos satélites a) ERS e b) Envisat. O ponto com marca a vermelho (PS 2) apresenta maior intensidade e foi selecionado para extrair o sinal de deformação, através da abordagem PS-InSAR.....	146
Figura 79 - Exemplo da análise da estabilidade da encosta com imagens Envisat e a técnica Quasi-PSInSAR, sobreposta ao mapa de refletividade (esquerda). Com PS-InSAR, (direita) estimaram-se séries temporais de deformação linear no Ponto 2, com imagens a) ERS e b) Envisat e comparou-se com os dados geodésicos do nivelamento no ponto NPIII.....	147
Figura 80 - Representação gráfica da distribuição das imagens SAR utilizadas. ....	155
Figura 81 - Altitude residual, estimada pela análise PSInSAR padrão. ....	156

Figura 82 - Velocidade residual, estimada pela análise PSInSAR padrão.....	156
Figura 83 - Redes de pontos (PS) interligados.....	157
Figura 84 - Clusters de pontos obtidos por DBSCAN.....	158
Figura 85 - Esquerda) - Gráfico diagnóstico com pontos coloridos correspondentes aos valores da coerência.....	160
Figura 86 - Grupo de outliers detetados pelo método PCA. ....	161
Figura 87 - Gráficos de vizinhança para o grupo de pontos, onde foram detetados outliers pelo método PCA, analisando a altitude residual (esquerda) e velocidade (direita). ....	161
Figura 88 - Matriz exemplo dos coeficientes de Jaccard.....	162
Figura 89 - Altitude residual dos pontos e detecção de outliers (marcas a vermelho). 162	
Figura 90 - Velocidade e detecção de outliers (marcas a vermelho).....	163
Figura 91 - Esquema do movimento detetado na direção $d_{LOS}$ relativamente à direção do movimento real $d$ . ....	165
Figura 92 - Tendência da deformação linear $k_{def}$ (esquerda) e coeficiente da dilatação térmica $k_{temp}$ (direita) das pontes Svinov em Ostrava. Ambas as componentes foram diferenciadas usando dados abrangendo 1,5 vezes o ciclo sazonal. ....	168
Figura 93 - Deslocamento residual da área de Svinov (Ostrava) nos interferogramas do período de 20 maio 2014 a 18 maio 2015, depois da eliminação dos parâmetros $k_{hei}$ , $k_{def}$ e $k_{temp}$ estimados com os valores originais da temperatura do ar e depois com valores da temperatura do ar corrigidos (esquerda). Correlação entre a fase residual e o $k_{temp}$ , estimado com os valores originais da temperatura do ar (direita). ....	170
Figura 94 - Temperaturas originais e corrigidas para a área de Svinov (Ostrava). O gráfico da esquerda mostra a distribuição temporal dos valores originais da temperatura do ar e à superfície, para estações meteorológicas vizinhas. O gráfico da direita apresenta os valores da temperatura após correção. ....	170
Figura 95 - Histograma da coerência dos PS antes e depois da correção da temperatura do ar .....	171

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição da linha de base perpendicular no conjunto de dados Envisat na trajetória 494 descendente. A marca vermelha representa a imagem master. ....	93
Gráfico 2 - Distribuição das diferenças do Centroide de Doppler, no conjunto de dados Envisat na trajetória 494 descendente. A marca vermelha representa a imagem master. ....	94
Gráfico 3 - Distribuição da linha de base perpendicular no conjunto de dados ERS na trajetória 222 descendente. A marca vermelha representa a imagem master. ....	95
Gráfico 4 - Distribuição das diferenças do Centroide de Doppler, no conjunto de dados ERS na trajetória 222 descendente. A marca vermelha representa a imagem master. ....	96
Gráfico 5 - Diferenças na coordenada XX-Triangulação. ....	139
Gráfico 6 - Diferenças na coordenada YY- Triangulação. ....	140
Gráfico 7 - Diferenças na coordenada XX, Poligonal. ....	141
Gráfico 8 - Diferença na coordenada YY, Poligonal. ....	142
Gráfico 9 - Diferença de diferenças de nível. ....	143
Gráfico 10 - Comparação de altitudes dos pontos objeto. ....	144
Gráfico 11 - Tendência da deformação linear, resultante da relação do nível de enchimento com o processamento InSAR. ....	148
Gráfico 12 - Níveis de enchimento nas campanhas de observação do Nivelamento	148
Gráfico 13 - Relação entre o movimento horizontal da Barragem do Alto Ceira e os respectivos níveis de enchimento. ....	149



# LISTA DE ABREVIATURAS

ASAR - Advanced Synthetic Aperture Radar

AOI - Area Of Interest

APS - Atmospheric Phase Screen

$B_{\text{perp}}$  - Base Perpendicular

CPT - Coherence Pixel Technique

CSV - Comma-Separated Values

DBSC - Density-based Spatial Clustering of Application With Noise

DePSI - Delft University of Technology Persistent Scatterer Interferometry Package

DInSAR - Differential Interferometry SAR

DORIS - Delft Object-Oriented Radar Interferometric Software

DS - Distributed Scatterer

DC - Doppler Centroid

EDP - Eletricidade de Portugal

Envisat - ENVironmental SATellite

ERS - European Remote Sensing Satellite

ESA - European Space Agency

ETRS89 - European Terrestrial Reference System

FDP - Função Distribuição de Probabilidade

GCP - Gound Control Points

GNSS - Global Navigation Satellite System

ICOLD - International Commission of Large Dams

InSAR - Interferometric Synthetic Aperture Radar

IPTA - Interferometric Point Target Analysis

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LOS - Line Of Sight

MATLAB - MATrix LABoratory

MDT – Modelo Digital do Terreno (Terrestrial Digital Model)

MT - InSAR- Multi Temporal Interferometry

NASA - National Aeronautics and Space Administration

PCA - Principal Components Analysis

PSI - Persistent Scatterer Interferometry

PSP - Persistent Scatterer Pairs

QGIS - Quantum Geographic Information Systems (Open Source)

QPS - Quasi Persistent Scatterer

RADAR - Radio Detection and Ranging

RAR - Real Aberture Radar

SAR - Synthetic Aperture Radar

SLC - Single Look Complex

SNAPHU – Statistical-cost Network Algorithm for Phase Unwrapping

SNR - Relação Sinal-Ruído

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

StaMPS - Stanford Method for Persistent Scatterers

StaMPS/MTI - Stanford Method for Persistent Scatterers/Multi-Temporal Interferometry

SARPROZ - SAR PROcessing tool by periz

SBAS - Small Baseline Subsets

SDFP - Slowly Decorrelating Filtered Phase

SHM - Structure Health Monitoring

SOG - Sistema de Observação Geodésico

SPN - Stable Point Network

WGS84 - World Geodetic System 84

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A monitorização da integridade estrutural desempenha um papel fundamental na manutenção de infraestruturas críticas, tais como barragens, pontes, túneis, redes de distribuição e transporte de energia, que, geralmente, necessitam de programas de inspeção e de manutenção periódicos, exaustivos e de elevados custos. O custo da estrutura, o seu comportamento esperado bem como as consequências de um comportamento anormal, justificam plenamente a existência de um programa de monitorização, que ajudará no processo de decisão relativamente ao momento ideal e à extensão dos trabalhos de manutenção, ou mesmo reparação.

A análise da deformação de elementos do terreno natural ou artificial, baseia-se na medição de grandezas nesses mesmos elementos. Tem sido uma prática corrente aplicada em estruturas desde tempos remotos, principalmente em barragens. As medições efetuadas essencialmente por métodos clássicos da topografia e da geodesia e muitas vezes por inspeção visual, produzem resultados credíveis, mas com uma morosidade que não se compara com os recentes métodos de observação resultantes da evolução tecnológica.

A maioria dos métodos de monitorização mais avançados da atualidade tira partido do desenvolvimento tecnológico, recorrendo a soluções *ad hoc*, envolvendo sensores de diversos tipos (recetores GPS, extensómetros, acelerómetros, anemómetros, sensores de temperatura, etc.), o que permitiu a integração de modernos “*sensorpacked*” em algumas estruturas de importância estratégica (formando, por exemplo, as conhecidas “pontes inteligentes”). Apesar dos preços serem cada vez mais acessíveis, implementar estes sistemas em todas as estruturas seria financeiramente inoportável.

A monitorização destas estruturas, sobretudo no que diz respeito ao campo das deformações e deslocamentos, era uma tarefa reservada, até há pouco tempo, à Geodesia Aplicada (normalmente eram tarefas morosas e, por conseguinte, dispendiosas) ou, mais recentemente, à telemetria através de redes de sensores localizados (mais acessíveis, mas de aplicação muito localizada). Apesar dos desenvolvimentos registados, sobretudo na última década, a esmagadora maioria das estruturas críticas continua a ser sujeita a inspeções visuais periódicas aos seus elementos estruturais. Na generalidade dos sistemas desenvolvidos, os dados recolhidos nas inspeções alimentam um sistema de gestão que recorre a modelos probabilísticos de deterioração para definir as ações de reparação/manutenção para

cada tipo de anomalia detetada e o custo unitário médio de reparação (ponderado de anteriores reparações). Estas ações envolvem, no entanto, custos avultados: em Portugal, por exemplo, a empresa Infraestruturas de Portugal (IP), destina, anualmente, uma parte considerável do seu orçamento global para obras de conservação de estruturas em risco.

Os recentes acidentes em pontes e em barragens, a nível mundial, totalizaram, só na última década, cerca de 1000 vítimas mortais e avultados prejuízos materiais, tendo posto em evidência a necessidade de desenvolvimento de técnicas de monitorização efetivas nas várias infraestruturas de engenharia civil, de forma a identificar problemas estruturais antes que estes se tornem críticos e possam pôr em perigo a segurança pública. A este nível, destaca-se, entre nós, a derrocada da ponte Hintze Ribeiro, em março de 2001, originando a perda de 59 vidas humanas.

Reconhecendo a importância da monitorização de estruturas, a União Europeia tem patrocinado vários projetos envolvendo diversos países europeus (como por exemplo o [BRIME, 2001](#) ou o [Sustainable Bridges, 2004 e 2007](#)), para estudar metodologias de inspeção e de avaliação que possam ser utilizadas na Europa e na América do Norte e propor um sistema de gestão de estruturas capaz de se adaptar à realidade de distintos países. Mais recentemente, em [2015](#), a ESA desenvolveu um sistema de monitorização por satélite, de grandes estruturas, dirigido em especial a pontes de grande envergadura, o GNSS e Observação Terrestre para Monitorização da Saúde Estrutural - [GeoSHM](#) (GNSS and Earth Observation for Structural Health Monitoring). Este projeto em colaboração com a Universidade de Nottingham está integrado no programa de Pesquisa Avançada em Sistemas de Telecomunicações - [ARTES](#) (ESA's Advanced Research in Telecommunication Systems) e constitui uma solução integrada para manutenção de diferentes estruturas de Engenharia Civil.

O sistema usa sensores de elevada precisão que são instalados nos elementos estruturais e que permitem detetar movimentos inferiores a 1 centímetro. Os dados recolhidos por esses sensores são transmitidos de forma contínua, através de comunicação por satélite, para um centro de processamento e disponibilizados ao gestor de infraestruturas através de uma interface web.

O sistema GeoSHM permite obter aos utilizadores finais, informações detalhadas e em tempo real sobre os deslocamentos tridimensionais de estruturas, recorrendo aos Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS). Possibilitará a sincronização precisa de sensores terrestres com marcadores temporais GNSS, através de fibra ótica e o acompanhamento das características de subsidência lenta de estruturas através de

técnicas de Interferometria Radar de Abertura Sintética - InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*).

As funcionalidades do GeoSHM incluirão a estimativa a longo prazo do deslocamento de pontes e outras obras-de-arte, incluindo o deslocamento resultante de expansão térmica. O GeoSHM fornecerá igualmente uma estimativa da deformação dos terrenos envolventes à estrutura. Pode igualmente ser extrapolado para detetar e acompanhar modificações paisagísticas, ameaças decorrentes das condições ambientais, movimentação de terras, trabalhos de construção, deslizamentos de terrenos, atividade mineira e atividade industrial.

Do anteriormente exposto, facilmente se conclui que o tema da monitorização de estruturas tem ganho um relevo crescente na generalidade dos países desenvolvidos, sobretudo na Europa e na América do Norte e, obviamente, também em Portugal. Esta aposta terá, agora, que ser convenientemente acompanhada por sistemas de gestão e de monitorização que assegurem a otimização da conservação dos investimentos efetuados e a sua operacionalidade no período de vida para que foram projetados.

O rápido desenvolvimento das tecnologias espaciais, a que assistimos nas últimas décadas, possibilitou o desenvolvimento de novas técnicas de deteção de deslocamentos da superfície terrestre e de estruturas, a partir do espaço, com alta precisão e com benefícios inesperados. Este progresso ficou sem dúvida enriquecido com a possibilidade de aquisição de dados, através dos sensores de Radar de Abertura Sintética (SAR, *Synthetic Aperture Radar*), montados em satélites, e ao desenvolvimento de novos métodos de processamento interferométrico recorrendo a Séries Temporais de Interferometria SAR (MT-InSAR, *Multi-Temporal InSAR*) (Hooper *et al.*, 2007; van der Kooij *et al.*, 2006, Kampes, 2005; Berardino *et al.*, 2002; Ferretti *et al.*, 2001).

Até recentemente, grande parte dos estudos interferométricos, usando imagens SAR (InSAR, Interferometria SAR), eram realizados recorrendo à interpretação de um único interferograma<sup>1</sup>, obtido através da combinação de apenas um par de imagens SAR. No limiar do séc. XXI, detetou-se que alguns pontos (pixéis na imagem SAR) mantinham uma resposta estável por períodos de tempo alargados (Usai, 1997; Usai and Hanssen, 1997). Foi, precisamente, esta descoberta que proporcionou o lançamento das bases para a exploração das técnicas interferométricas multi-temporais, possibilitando, desta forma, resolver as principais limitações da InSAR convencional: decorrelação temporal e geométrica e influência da atmosfera. Ao longo dos últimos anos, foram vários os

---

<sup>1</sup> Ver definição mais adiante, no Capítulo 3.

algoritmos MT-InSAR desenvolvidos para colmatar estas limitações da InSAR convencional, sendo que, podem todos ser enquadrados em duas categorias: *Persistent Scatterer Interferometry* (PSI) e *Small Baseline* (SB).

O conceito por detrás das técnicas MT-InSAR está, portanto, relacionado com a identificação de pontos estáveis, Difusores Persistentes (PS, *Persistent Scatterer*), pontos que mantêm o comportamento estável por períodos de tempo alargados e para vários ângulos de incidência (Ferretti *et al.*, 2000; 2001). Para esses pontos específicos, é possível detetar movimentos com precisões milimétricas (ver, por exemplo, Ketelaar, 2008; Hooper *et al.*, 2012).

A título de exemplo, esta técnica está a ser aplicada, na Holanda, na monitorização de mais de 17000 km de diques (van Leijen *et al.*, 2010). Trata-se de um programa financiado pelo estado holandês e que prevê, a curto prazo, substituir as brigadas móveis que atualmente tratam da inspeção visual dos diques. No âmbito desse projeto, os segmentos identificados como potenciais riscos serão, primeiro, detetados por processamento MT-InSAR e, só posteriormente, as brigadas se deslocarão aos locais identificados para avaliação do seu real estado.

Os resultados desta tese serviram para comprovar e validar estas metodologias inovadoras, comparativamente com os métodos de observação/monitorização convencionais, permitindo estabelecer algumas conclusões com carácter inovador:

- As técnicas MT-InSAR podem ser utilizadas para identificar e monitorizar alterações de comportamento num número elevado de pontos (PS) bem identificados em estruturas (por exemplo, pontes e barragens);
- A cobertura das imagens SAR permite abranger toda uma área metropolitana, possibilitando, dessa forma, a monitorização de todas as estruturas que aí se localizam, (nomeadamente impacte de construção de túneis, e outras redes de infraestruturas) independentemente das condições atmosféricas;
- A monitorização remota é eficaz na identificação de estruturas com problemas, permitindo priorizar as intervenções *in situ*;
- A monitorização de frequência semanal, já possível com os satélites de nova geração (TerraSAR-X, COSMO-SkyMed, Sentinel-1), permite melhoramentos consideráveis na integridade e disponibilidade dos serviços de monitorização de estruturas.

Com esta investigação, pretendeu-se implementar abordagens inovadoras, aplicáveis no domínio da monitorização de estruturas críticas, mas também verificar a estabilidade

de encostas ou taludes, por exemplo, aproveitando o rápido desenvolvimento das tecnologias espaciais a que assistimos nas últimas duas décadas. Serão abordados temas que vão desde a aquisição das imagens SAR, ao seu processamento e à consequente apresentação dos resultados.

## 1.1. Motivação

Do anteriormente exposto, pode concluir-se que o tema da monitorização de estruturas tem ganho um relevo crescente na generalidade dos países desenvolvidos (sobretudo na Europa e na América do Norte) e, obviamente, também em Portugal. Esta aposta terá, agora, que ser convenientemente acompanhada através da implementação de sistemas de gestão e de monitorização que assegurem a otimização da conservação destes investimentos e a sua operacionalidade no período de vida para o qual foram projetados. Esta perceção, conjuntamente com a certeza de que as técnicas interferométricas atingiram, atualmente, um nível de maturidade capaz de as levar a um patamar operacional, foram o mote para a seleção desta temática para desenvolver o projeto de doutoramento. Assim, e em jeito de resumo, a escolha da Interferometria SAR como tema central deste projeto ficou a dever-se, essencialmente, a três fatores motivacionais:

1. Juntar uma das mais recentes e promissoras técnicas de monitorização às técnicas de monitorização geodésicas, em que há muito a candidata tem vindo a desenvolver trabalhos;
2. Acreditar que esta tecnologia de monitorização remota será uma mais-valia na monitorização de pontes e barragens, porque reduz o tempo de execução e os custos associados, comparativamente com as redes clássicas de monitorização que são metodologias geralmente morosas e dispendiosas, sendo tarefas reservadas, entre outras, à Geodesia Aplicada e à Engenharia Civil;
3. Identificar uma oportunidade decorrente do facto de, no nosso país, existirem ainda poucos técnicos que dominam a aplicação desta tecnologia.

Com a realização deste trabalho de investigação, será possível responder a duas questões fulcrais que se prendem com a viabilidade da utilização das técnicas interferométricas na monitorização de estruturas:

**“Terão, efetivamente, as técnicas interferométricas mais recentes, atingido um estado de maturação e de desenvolvimento que possibilitam a monitorização de estruturas?”**

Se a resposta à questão anterior for positiva, então, torna-se necessário investigar se será possível realizar este estudo em quaisquer condições, ou saber se haverá constrangimentos à aplicação das técnicas InSAR para monitorizar estruturas e identificar esses constrangimentos. Depois dessa investigação, será então possível responder à segunda questão:

**“Quais são os principais constrangimentos à aplicação das técnicas InSAR na monitorização de estruturas?”**

## 1.2. Objetivos

Com este estudo pretendeu-se contribuir para aumentar a eficácia dos serviços de supervisão, através da identificação de alterações estruturais que ponham em risco grandes obras de Engenharia Civil (como são exemplo, pontes e barragens). Foram selecionados diferentes tipos de estruturas para a aplicação das técnicas interferométricas, e avaliada a influência dos vários parâmetros envolvidos (tipo de material, dimensão, orientação, envolvente, etc.).

Como produto final deste estudo, é apresentada uma metodologia para a cadeia de processamento MT-InSAR (recolha de dados, avaliação de riscos, etc.). As metodologias implementadas, foram validadas através de uma análise comparativa dos resultados obtidos a partir de outras geotécnicas.

Assim, o objetivo principal deste trabalho consistiu na apresentação dos diversos aspetos relativos à aplicação das técnicas de Interferometria SAR para monitorizar grandes obras, ou seja, a introdução das novas tecnologias de deteção remota na monitorização de estruturas, levando à deteção precoce de riscos potenciais e possibilitando, desta forma, o aumento da segurança e a redução, significativa, dos custos de manutenção, através da otimização de estratégias de intervenção.

No seguimento das conclusões que resultarão das respostas às duas questões centrais apresentadas na secção anterior, o objetivo principal deste estudo, exposto no parágrafo anterior, pode ser assim sintetizado:



**Os inúmeros testes realizados, em vários tipos de estruturas, permitirão estabelecer os procedimentos de referência que podem ser adotados para monitorizar estruturas, aplicando técnicas interferométricas.**

### 1.3. Contributos da tese

Este trabalho apresenta uma abordagem inovadora no que concerne à monitorização de estruturas, não existindo, à data, qualquer aplicação totalmente desenvolvida com recurso a estas técnicas. Assim, constitui um contributo para o desenvolvimento de novas metodologias de monitorização, que permitem reduzir significativamente a utilização dos atuais métodos de monitorização, originando reduções significativas de custos operacionais, em termos de monitorização periódica e de gestão de intervenções de renovação/recuperação.

Outro aspeto muito importante a salientar, e que representa uma mais-valia significativa neste projeto, é que a partir das conclusões que daqui emergem será possível pensar em realizar o acompanhamento e a gestão da manutenção de estruturas a uma escala mundial, de uma forma centralizada e com redução de custos. Este aspeto pode ser muito relevante para as empresas de engenharia que operam em diferentes geografias. Acresce ainda que, tendo em conta a monitorização de estruturas em grande escala, poderão ser desenvolvidos modelos matemáticos contextualizados quer sob o ponto de vista geográfico, quer tendo também em conta as condições do terreno, que ajudem a prever a evolução de eventuais movimentos ou desgastes e permitir uma melhor calendarização das intervenções que as minimizem ou corrijam.

### 1.4. Estrutura da tese

Este documento está dividido em 8 capítulos, que por sua vez estão organizados em três secções, enquadramento, processamento e resultados.

O Capítulo 1, enquadra o tema em estudo e apresenta a motivação, os principais objetivos a atingir, bem como os principais contributos do trabalho para o avanço do estado da arte.

No Capítulo 2, é apresentado um estudo sobre os métodos convencionais de monitorização de estruturas, tanto geodésicos como instrumentais, aplicados em pontes e barragens, culminando com a apresentação da técnica InSAR, para o mesmo objetivo.

Nos Capítulos 3 e 4, faz-se a apresentação dos diversos conceitos fundamentais da Interferometria SAR e dos diferentes métodos e técnicas que podem ser usados no processamento de imagens SAR.

No Capítulo 5, apresentam-se algumas das áreas e estruturas estudadas que serviram de base aos inúmeros testes.

No Capítulo 6, apresentam-se os resultados obtidos no processamento interferométrico assim como as comparações possíveis com outras técnicas, em função dos dados existentes.

No Capítulo 7, apresentam-se resultados obtidos após o melhoramento de algoritmos já existentes, para análise de *outliers* e expansão térmica.

Finalmente, no Capítulo 8 apresentam-se as conclusões assim como algumas reflexões sobre as perspectivas futuras e os principais desafios que se colocam, antecipando, também, possíveis estratégias de evolução do trabalho de investigação realizado.

## CAPÍTULO 2 - TÉCNICAS DE MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS

Este capítulo tem dois propósitos principais: por um lado, pretende apresentar um levantamento das técnicas mais usadas e também mais avançadas, atualmente em uso na monitorização de estruturas, especificamente em pontes e barragens. Para tal, são referidos e discutidos os aspetos teóricos e práticos destas técnicas, no que respeita a inspeção visual e a metodologias de monitorização de estruturas, focando as suas características inovadoras, assim como as oportunidades que poderão proporcionar. Por outro lado, pretende-se identificar as oportunidades com potencial para melhorar os processos de monitorização e manutenção de estruturas, dando-se especial destaque às técnicas, que recorrem a imagens de satélite, obtidas com sensores SAR, pois estas são atualmente reconhecidas como uma alternativa viável para monitorizar estruturas construídas pelo homem. Com a utilização de técnicas MT-InSAR, aplicadas ao processamento de uma série de imagens SAR, é possível detetar movimentos (verticais) milimétricos em estruturas e, desta forma, identificar movimentos anormais, ou excessivos, indícios claros de prováveis problemas, a exigir uma análise cuidada.

### 2.1. Introdução

A monitorização de grandes obras é de importância vital para prevenir eventos catastróficos e salvar vidas ([Wang, 2014](#)). Estas estruturas, que requerem, obrigatoriamente, cuidados com a monitorização, podem ter extensões desde centenas de metros (e.g., pontes e barragens) até alguns quilómetros (e.g., pontes, tuneis e diques).

A deterioração provocada ao longo do tempo num grande número de estruturas, de acordo com dados da Comissão Internacional das Grandes Barragens em 1973 ([ICOLD-International Committee of Large Dam, Bulletin 99](#)) e a derrocada da ponte Hintze Ribeiro, em março de 2001, em Portugal, puseram em evidência a necessidade de utilização de técnicas de monitorização mais eficazes, de forma a identificar problemas estruturais antes que estes se tornem críticos e possam pôr em risco a segurança pública ([Rocha, et al., 2008](#); [Sousa and Bastos, 2013](#)).

Por outro lado, o ritmo acelerado do desenvolvimento tecnológico permitiu a construção de um elevado número de estruturas de grandes dimensões, tais como pontes e barragens, algumas com albufeiras de dimensões consideráveis, o que, tendo em conta os potenciais riscos que representam, torna imperativa a monitorização para garantir a sua segurança. É, portanto, fundamental garantir o controlo da estabilidade espacial e a segurança operacional destas estruturas, dado o elevado risco que podem representar.

A monitorização apoia-se em sistemas de observação que compreendem um conjunto de instrumentos e dispositivos destinados a medir grandezas que contribuam para o conhecimento do comportamento da obra ou dos seus componentes, visando, no essencial, a avaliação da deformação, de forma a garantir a segurança da obra, durante a fase da sua vida útil (Gomes, 2002).

Quando se trata de estruturas de grande dimensão e com importância estratégica, a monitorização é uma tarefa primordial da geodesia aplicada e da geomática, envolvendo, essencialmente, as áreas da engenharia geográfica, da engenharia geotécnica e da engenharia civil. No entanto, as técnicas clássicas de medição, utilizadas para controlo de deformações, embora muito fiáveis e precisas, são aplicadas para detetar deformações em pontos muito específicos, vulgarmente designados “pontos objeto”, exigindo um grande esforço a nível de recursos humanos e aquisição de equipamento especialmente para esse efeito.

A implementação de um plano de observação é fundamental quando se utilizam métodos convencionais para observar estruturas. De acordo com o Regulamento de Segurança de Barragens, (RSB, 1990), “o Plano de Observação é um documento de carácter vinculativo no qual se baseia o controlo da segurança estrutural.” Contém indicações sobre inspeção visual, seleção de grandezas a observar destinadas a um controlo expedito de segurança, frequência de recolha de dados em função do programa de enchimento da albufeira, patamares de enchimento e, quando se justifique, uma visita de inspeção por patamar, modelos de comportamento para apoio da avaliação da segurança estrutural e verificação da operacionalidade dos órgãos de segurança e de exploração. Varia normalmente de obra para obra a monitorizar, uma vez que há vários fatores que podem influenciar o mecanismo de alteração da estrutura. O conceito de otimização controlada, (por exemplo, a escolha à *priori* dos pontos a observar) do qual fazem parte os sistemas de observação por processos convencionais, é decisivo para o desenho e a análise da rede geodésica implementada ou plano de observação. A conceção minuciosa da rede permite efetuar procedimentos de ajustamento e testes

que resultam em precisão e fiabilidade suficientes dos parâmetros estimados e com custos aceitáveis (Hanssen, 2003).

## 2.2. Práticas correntes na monitorização de Barragens e Pontes

Desde a construção das primeiras grandes obras, a nível mundial que se analisam, relatórios técnicos onde são mencionadas falhas estruturais que levaram ao colapso destas estruturas e a perdas significativas de bens materiais e vidas humanas. São exemplo de catástrofes a barragem de *Malpasset* (França), *Veja de Terra* (Espanha) ambas em 1959, barragem de *Orós* (Brasil) em 1960, barragem de *Machu* (India), em 1979. No caso da barragem de *Vaiont*, em Itália, a catástrofe não foi provocada pela rotura da estrutura, mas pelo deslizamento de grandes massas de terrenos adjacentes à albufeira que, caindo na água, provocaram ondas enormes, galgando a barragem e destruindo tudo à sua passagem, o que levou a que se verificasse a necessidade de monitorização não só da barragem, mas também das fundações, margens da albufeira e zona próxima a jusante da barragem (Almeida, 1997; ICOLD 1997, Bulletin 99). Como resposta a estas falhas foram então desenvolvidas novas técnicas a nível do projeto, dos planos e dos programas de inspeção dessas estruturas (Shirole and Holt, 1991), sendo a supervisão regulada por autoridades nacionais, dos respetivos países, assegurando, desta forma, que estas estruturas e a sua envolvente não representem perigo para a segurança pública, do património ou do ambiente.

Os elementos constituintes de uma barragem, segundo o (RSB, 1990) são: o corpo da barragem propriamente dita, a fundação, a zona vizinha a jusante, os órgãos de segurança e de exploração e a albufeira. Os métodos geodésicos para observação de barragens são usados desde o início do século XX para monitorizar o comportamento estrutural das grandes barragens, sendo a barragem de Montsalvens, na Suíça, a primeira onde estes métodos foram implementados, em 1921. Em Portugal e de entre cerca de 200 grandes barragens, a maioria de aterro ou enrocamento, destinadas sobretudo à irrigação, e as restantes, o maior número de betão e poucas de alvenaria, destinadas essencialmente à produção de energia, a metodologia geodésica foi aplicada pela primeira vez à barragem de betão de Santa Luzia, bacia do Tejo, no ano de 1942 (Almeida *et al.*, 2009).

A rede de observação geodésica, definida no plano de observações, é constituída por “pontos de referência”, materializados por pilares com fundações profundas, edificados, normalmente na área a jusante da barragem. O equipamento de observação é estacionado nos “pontos de referência” (Figura 1) para observar os “pontos objeto” (Figura 2) cujos deslocamentos se pretendem determinar. Os “pontos objeto” são colocados para observação, no paramento de jusante do corpo da barragem.



Figura 1 - Ponto de Referência materializado por pilar. Fonte: Própria.



Figura 2 - Ponto objeto materializado no paramento de jusante da barragem por um alvo refletor. Fonte: Própria.

Ambos os conjuntos de pontos, “pontos de referência” e “pontos objeto” devem estar equipados com dispositivos de centragem forçada, como mostra a Figura 3 para garantir melhor precisão nas observações.



Figura 3 - Exemplo de um dispositivo de centragem forçada. Fonte: Própria.

Na prática, a conceção da rede geodésica envolve a determinação precisa do posicionamento dos “pontos de referência”, em termos de localização ou extensão

espacial, densidade e posicionamento relativo, dentro da rede. Para uma estratégia ótima de medição da rede, as técnicas clássicas de monitorização necessitam que o grau da eventual deformação seja conhecido previamente. Cabe ao projetista da obra, indicar valores previsíveis das grandezas consideradas mais relevantes, permitindo, desta forma, após análise dos resultados das observações, verificar se o comportamento da obra segue o padrão previsto ou tem um comportamento anormal, possibilitando intervir nas deformações numa fase inicial.

Para detetar deformações com metodologias de observação geodésica é essencial efetuar um levantamento inicial de referência, designado por “levantamento zeragem”. O objetivo desse levantamento consiste em permitir a comparação das grandezas medidas numa determinada época, considerada de referência, com as mesmas grandezas medidas em épocas posteriores, e analisar as diferenças. Com esta metodologia, é presumível que a deformação que eventualmente possa ocorrer antes desse levantamento de referência não seja determinada, ou que a deformação local em pequena escala passe, muitas vezes, por despercebida (Hanssen, 2003).

Os equipamentos de medição, habitualmente usados, quando se aplicam os métodos convencionais de observação geodésica são níveis óticos de precisão e estações totais (Voege *et al.*, 2012; Becker, 2002; Henriques and Casaca, 2001; Tamagnan and Beth, 2012). No entanto, existem métodos de medição que recorrem a varrimentos laser, pêndulos direitos e invertidos, extensómetros, inclinómetros, assentímetros, medidores de juntas, entre outros. Todos estes equipamentos são amplamente utilizados na monitorização de deslocamentos internos e externos em barragens, podendo alguns dispositivos dedicados ser integrados com metodologias GNSS para efeito de controlos específicos. A Figura 4 representa o esquema de medição de uma barragem com indicação de alinhamento com fios, pêndulos e pilares de uma rede de triangulação.

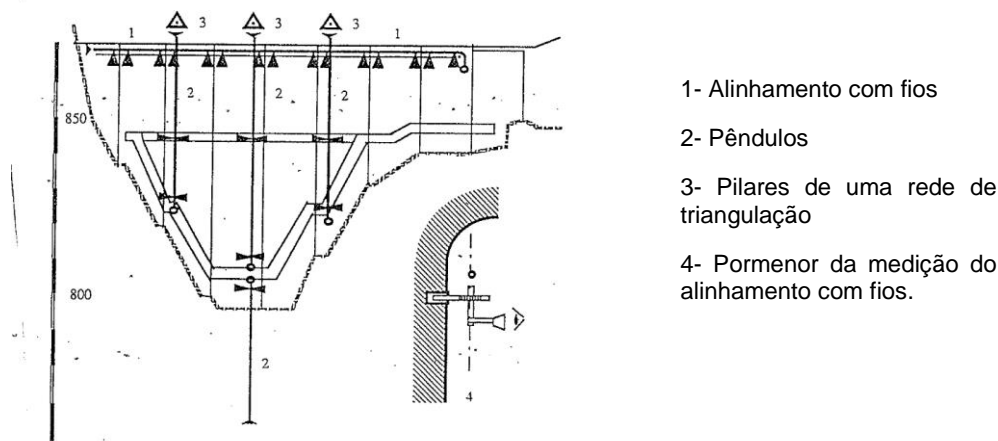


Figura 4 - Esquema de uma barragem com equipamento de medição. Fonte: Fonte, C.



Em barragens de betão, no caso de se aplicarem os métodos convencionais de observação geodésicos, os deslocamentos horizontais e verticais dos “pontos objeto” devem ser calculados separadamente e devem ser quantificados dentro de uma tolerância de 1mm e 0,2 mm respetivamente (Casaca, 1990).

Outra das técnicas introduzidas nas últimas décadas baseia-se em observações com Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS), para medição do movimento da crosta terrestre, deteção da subsidência à superfície da terra ou de deformações do solo devido à atividade vulcânica. Há mais de duas décadas que estes sistemas espaciais estão a ser utilizados para monitorização de deformações em estruturas construídas pelo Homem, tais como barragens, pontes e edifícios, conjuntamente com técnicas de observação convencionais.

Na [Figura 5](#), pode visualizar-se a utilização desta técnica na monitorização de uma barragem. Esta metodologia permite efetuar observações contínuas de coordenadas absolutas e/ou relativas e apresenta a possibilidade de enviar alarmes em tempo real. Apresenta, como limitação, o facto de ter de garantir-se que a antena é colocada num local aberto e sem obstruções, para evitar problemas de receção do sinal ou efeitos de multicaminho.

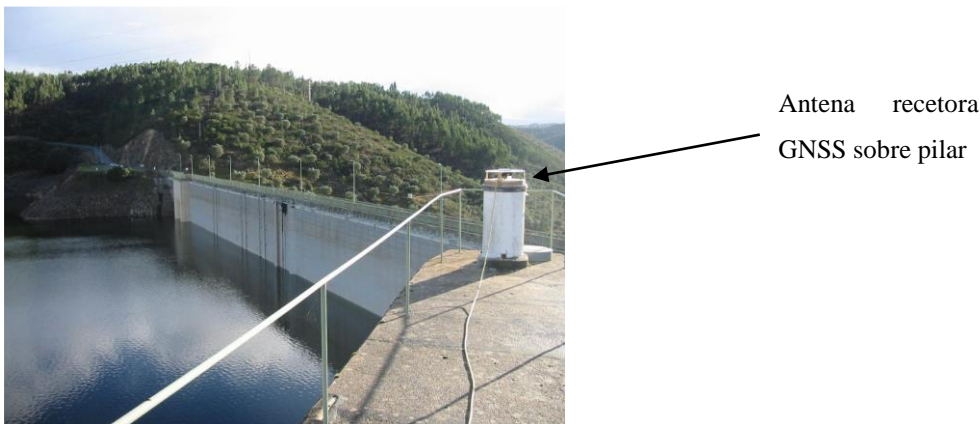


Figura 5 - Monitorização de uma barragem com GNSS. Fonte: Própria.

Em barragens de betão faz sentido pensar em metodologias de observação com GNSS, se o sistema de monitorização a estabelecer puder ser contínuo e por períodos de observação grandes (Almeida *et al.* 2009). Segundo Lima *et al.* (2005) é possível medir as componentes planimétricas com uma incerteza milimétrica e a componente altimétrica com uma incerteza subcentimétrica.

Os pêndulos, pelas suas características de instalação, podem ser considerados equipamentos para medição de deslocamentos internos relativos. Consistem num fio-



de-prumo vertical, que indica a direção da vertical do lugar, colocados no interior da barragem numa perfuração vertical efetuada para o efeito ao longo do corpo da barragem. Podem ser direitos ou invertidos, conforme a fixação à barragem ocorre no coroamento ou na fundação, respetivamente. A leitura de pêndulos faz-se de forma manual ou automática e a medição da deformação é obtida com base no movimento da estrutura relativamente ao fio do pêndulo. Estes equipamentos servem como referência vertical para obter deslocamentos horizontais da estrutura e, por esse motivo, são habitualmente integrados com observações geodésicas. A precisão obtida na leitura de pêndulos é da ordem da centésima do milímetro. As [Figuras 6 e 7](#) ilustram o funcionamento do pêndulo, esquematicamente e em situações reais.

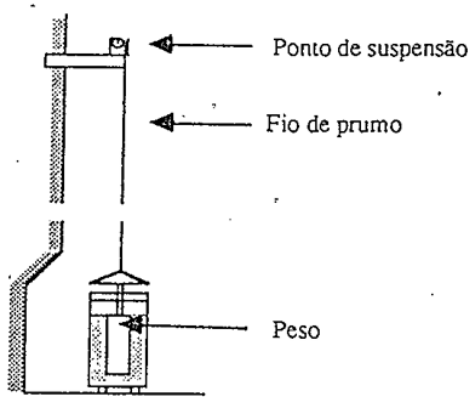


Figura 6 - Pêndulo direito. Fonte: Fonte, C.

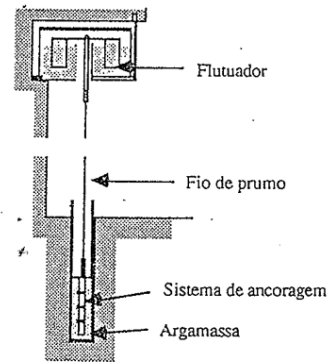


Figura 7 - Pêndulo Invertido. Fonte: Fonte, C.

A leitura de pêndulos é efetuada com coordenómetros de leitura manual ou automática, por esse motivo, no local da perfuração, onde é visível a passagem do fio de cada pêndulo está instalada uma base, para colocação dos coordenómetros de leitura, também visível na [Figura 8](#).

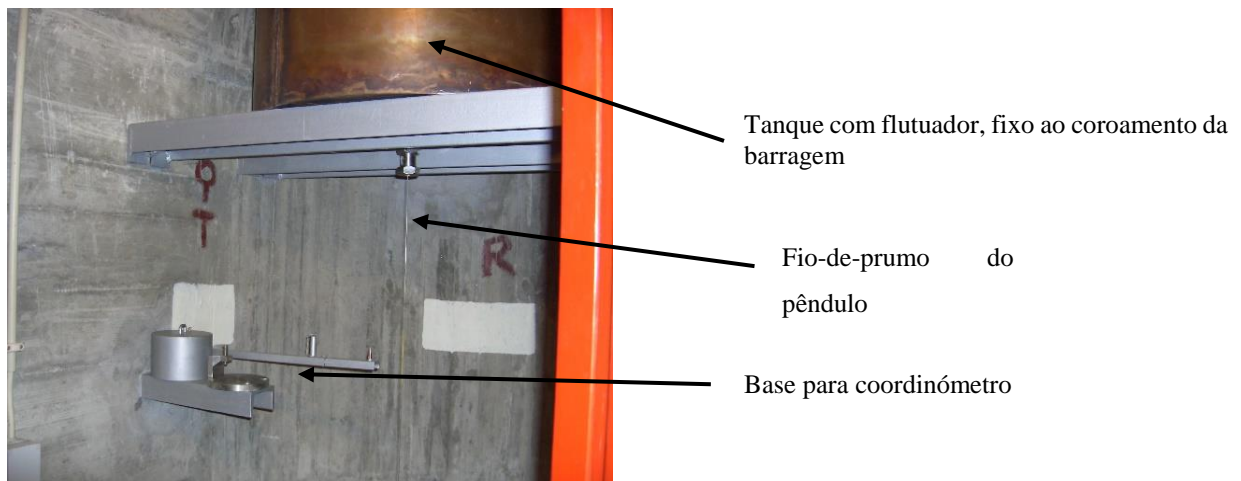


Figura 8 - Pêndulo Invertido com instalação de Base para o Coordenómetro. Fonte: Própria.

Os coordenómetros óticos permitem visar o fio-de-prumo do pêndulo em duas direções ortogonais, obtendo-se através da leitura num nónio a posição do fio nessas direções.

Os coordenómetros automáticos registam automaticamente a posição do fio permitindo a sua transmissão automática.

As Figuras 9 e 10 apresentam, respetivamente, os coordenómetros para leitura manual e automática de pêndulos.



Figura 9 - Coordenómetros para leitura manual de Pêndulos.  
 Fonte: Ribeiro, D. et al., 2008.



Figura 10 - Coordenómetros para leitura automática (ADAS).  
 Fonte: Ribeiro, D. et al., 2008.

Os extensómetros, os medidores de juntas e os clinómetros permitem obter precisões da mesma ordem de grandeza dos pêndulos.

Os extensómetros são usados para medição de deformações axiais de compressão ou tensão ao longo de uma perfuração no betão e podem ter “varas” de diversos comprimentos, sendo a medição efetuada nas galerias da barragem onde é visível a cabeça de medição. A Figura 11 apresenta este instrumento de medida esquematicamente e a Figura 12 a sua instalação na estrutura.

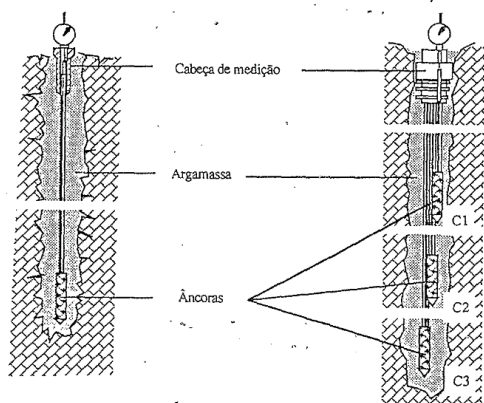


Figura 11 - Esquema de extensómetros de varas.  
 Fonte: Fonte, C.



Figura 12 - Cabeça de extensómetro para medição.  
 Fonte: Própria.

Para medição de juntas existe um variado número de instrumentos. Nas Figuras 13 e 14 é apresentado um medidor de juntas externos de LVTD (Linear Variable Transformer Differential), usado para colocação externa em qualquer tipo de junta ou fissura em barragens (Galan, 2015).

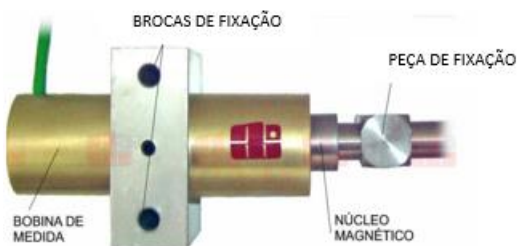


Figura 13 - - Medidor de juntas externo de LVTD. Fonte: Atinfo.net



Figura 14 - Medidor sobre a junta. Fonte: www.sisgeo.com

Os inclinómetros são usados para medição de movimentos rotacionais da estrutura.

Para garantir a segurança de uma barragem no seu todo, além da monitorização da estrutura em si, também é de grande importância a monitorização da envolvente, tanto a jusante como a montante, incluindo o respetivo reservatório de água, ou seja, a albufeira. Nos últimos anos, este controlo tornou-se especialmente importante tendo em conta que muitas barragens têm um período de vida longo e, também, para satisfazer as mais recentes e rigorosas normas de segurança emitidas pelas autoridades reguladoras, (Decreto.Lei. nº344/2007; RSB, 2007) que apontam para a necessidade de medição de deslocamentos de forma mais frequente.

No que respeita à fiabilidade, as bases automáticas e manuais de leitura de pêndulos são os sistemas mais fiáveis para medição de deslocamentos em barragens, desde que os pêndulos estejam bem instalados e calibrados, sendo usados como uma referência real na comparação com os restantes métodos (Galan, 2015).

As barragens de aterro ou rocha, são barragens cuja principal finalidade é reter a água. Os parâmetros mais importantes a medir nessas barragens são a pressão nos interstícios, (Figuras 15 e 16) as redes de percolação, o nível do reservatório, e o nível de água nos encontros a montante (Raposo, 2011).

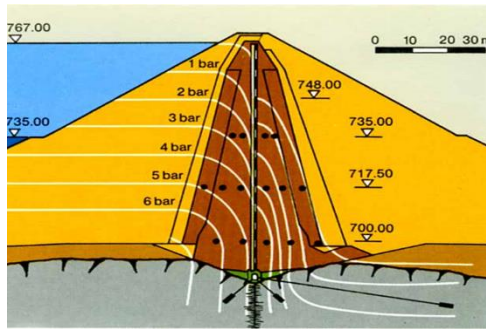


Figura 15 - Esquema de uma Barragem de aterro. Resultados da observação da pressão da água intersticial no núcleo da barragem. Fonte: Maranh das Neves.



Figura 16 - Equipamentos de leitura dos dispositivos de observação. Fonte: Maranh das Neves

Relativamente à monitorização de pontes, a deformação é medida horizontalmente e verticalmente, em pontos selecionados. Fazem-se observações periódicas a longo prazo, para monitorizar movimentos horizontais e assentamentos a partir de pontos de referência externos (rede de observação geodésica), materializados em zonas estáveis, fora da área da deformação, ou fazem-se observações a curto prazo para detetar movimentos devido a deflexões ou devido à carga sobre a ponte. Um processo rotineiro de observação do comportamento das pontes a curto prazo é, limitar a observação a pontos selecionados que têm uma determinada tendência de deslocamento ao longo da ponte (Kapović, *et al.*, 2005).

Os equipamentos geralmente utilizados para a observação de pontes são acelerómetros, sensores de fibra ótica, níveis óticos e digitais, estações totais, entre outros. Relativamente a técnicas de medição, são utilizadas técnicas de varrimentos laser, emissões acústicas, medição da resistividade do betão, técnicas de processamento de imagem, GNSS, entre outras. A utilização de alguns desses equipamentos de medição, nomeadamente os de observação geodésica, obriga a fechar a circulação rodoviária na ponte, durante o período em que decorrem as observações.

A maioria das pontes, a nível mundial, continua a ser vigiada por inspeção visual, para analisar tanto as condições externas como a superfície, o que na realidade revela pouco sobre a condição interna e o desempenho destas estruturas. São ainda em número reduzido as pontes monitorizadas com instrumentação colocada na sua superfície, ou com sensores incorporados nos seus componentes de betão ou nas juntas de metal (Gastineau *et al.*, 2009).

O desenvolvimento de novos sensores e métodos, a que se tem assistido nos últimos anos, tem sido acompanhado por muitos desenvolvimentos ligados com a monitorização de deformações em estruturas, no entanto, a especificidade associada à monitorização de pontes e de barragens, continua a levantar muitos desafios.

É recomendável efetuar vários testes, com métodos de observação diferentes, porque teoricamente há várias hipóteses para a alteração do comportamento das estruturas (Kapović *et al.*, 2005).

Desde há três décadas, a identificação prática das propriedades dinâmicas importantes de grandes estruturas, como as pontes (Cantieni *et al.*, 1994; Pietrzko *et al.*, 1996) e barragens (Keightley *et al.*, 1961; Cantieni, 2001), tem sido realizada com base em procedimentos convencionais de testes modais, sendo estes testes, já anteriormente desenvolvidos no campo da Engenharia Mecânica e da Aeronáutica. Assim, há cerca de 30 anos, foram lançadas as bases da monitorização da saúde estrutural (SHM-*Structural Health Monitoring*).

A SHM tornou-se uma área de investigação importante, de rápido desenvolvimento que evoluiu da monitorização estrutural baseada na recolha convencional de dados e processamento dos mesmos, para incluir sensores inteligentes, sistemas locais de armazenamento e transmissão de dados, sistemas centrais de gestão de dados e análise de dados locais (Brownjohn *et al.*, 2004).

Na última década, a construção de estruturas artificiais tornou-se ainda mais complexa, levando a um aumento significativo de sensores embutidos nas estruturas para monitorização de alguns parâmetros associados à deformação, que por vezes só são detetados por observações a longo prazo e que, devido às suas características, não são detetáveis por sensores convencionais como por exemplo os de base elétrica (extensómetros de resistência elétrica, sensores elétricos convencionais, entre outros).

A definição e os objetivos da monitorização da saúde estrutural foram sendo alterados e adaptados com a evolução tecnológica (Chang, 1999; Chang *et al.*, 2003; Worden and Dulieu-Barton, 2004; Farrar and Worden, 2007), mas, de uma maneira geral, incluem a monitorização em tempo real, usando redes de sensores para recolha de dados que permitem detetar alterações na estrutura ao longo do tempo. No entanto, a experiência atual revela que as inspeções visuais ainda são adequadas para a monitorização de algumas estruturas, sendo também usados alguns sensores, colocados numa base *ad hoc*. O uso de tecnologias inovadoras para monitorização, deve ser ponderado em relação aos custos, de acordo com o tempo de vida útil esperado para uma estrutura e aos seus requisitos técnicos e funcionais (Bakker *et al.*, 2006).



No nível mais simples, a SHM baseia-se na observação visual qualitativa para analisar a abertura de fendas, o desmoronamento do betão e deformações estruturais, mas o objetivo das práticas de investigação atual é identificar os meios mais simples e confiáveis de adquirir, gerir, integrar e interpretar dados fidedignos do desempenho estrutural, para obter o máximo de informações úteis a um custo mínimo (Brownjohn *et al.*, 2004).

No caso das pontes, a avaliação visual efetuada por especialistas é usada como a principal ferramenta no âmbito das atuais práticas de inspeção. São realizadas inspeções de rotina, para avaliar a qualidade dos trabalhos de manutenção da ponte, habitualmente com intervalos de doze a quinze meses, inspeções principais de cinco em cinco anos, inspeções especiais sem definição periódica, e inspeções subaquáticas, estas programadas, supervisionadas e interpretadas por engenheiros com competência comprovada no domínio de obras de arte (Cruz, 2006).

No entanto, as técnicas de inspeção visual, usadas para inspeções de rotina, devem ser realizadas por técnicos experientes, dada a possível subjetividade inerente a essa avaliação. Numa primeira abordagem, estes métodos podem parecer ineficazes, mas quando se considera o número de pontes em serviço, os recursos disponíveis e a falta de uma solução abrangente para avaliar a condição estrutural, esta parece ser uma boa alternativa. Outras técnicas são o ensaio de carga da ponte e o uso de sensores especializados.

De acordo com pesquisas minuciosas (Kapović, 1993), o intervalo de  $\frac{1}{20} < \frac{\sigma f}{f} < \frac{1}{10}$  é usado para definir a precisão ótima de medição em testes de carga das pontes, sendo:

$\sigma f$  - Desvio padrão de medição,

$f$  - Deslocamento teórico.

Embora, hoje em dia, os planos de monitorização das pontes variem de país para país, os métodos mais usados são:

- Métodos visuais com auxílio de Exames/Ensaio Não Destrutivos (NDE – *Non Destructive Examination*); métodos acústicos, usando ultrasons; métodos de campo magnético; métodos baseados em correntes de *Foucault*; radiografia; ou métodos térmicos.

Dependendo das características técnicas da estrutura e dos fenómenos físicos a serem estudados, diferentes sensores podem ser usados, destacando-se, os sensores eletromecânicos, os sensores óticos, os acelerómetros, o varrimento a laser, as

emissões acústicas, a medição da resistência do betão, o radar, entre outros, ou então, técnicas no âmbito de contacto/não contacto com a estrutura, monitorização de pontos isolados ou de múltiplos pontos. A [Figura 17](#) mostra um conjunto de sensores para monitorização na ponte 25 de abril.

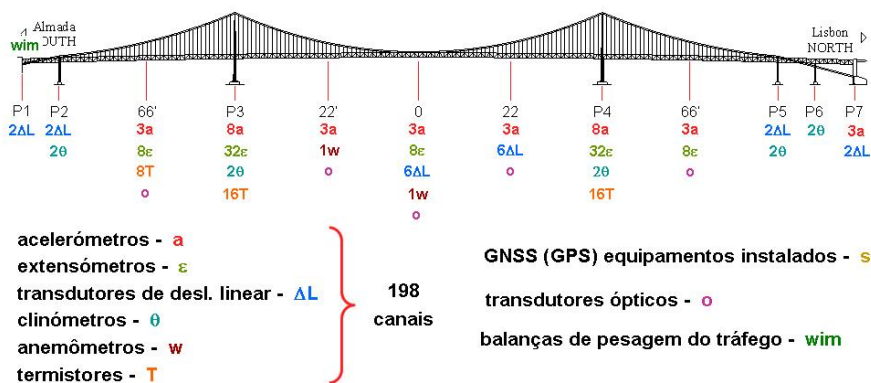


Figura 17 - Exemplo de ponte com os respetivos sensores de medição.

Em ([Adhikari et al., 2010](#)) é apresentada uma revisão do tipo de sensores mais comuns, utilizados na inspeção da deformação de pontes, destacando-se os extensómetros de corda vibrante, os extensómetros de resistência elétrica, os sensores de fibra ótica e os sensores sem fio. Por outro lado, ([Doebling et al. 1998](#)) apresentam uma revisão detalhada de métodos de identificação de deformações à base de vibração e ([Hunt, 2009](#)) apresenta uma visão geral da monitorização de 56 pontes de estrada (obras de arte) nos Estados Unidos, com sistemas de “varrimento” fixo, para monitorizar a erosão e o enfraquecimento das fundações.

Os métodos de monitorização usando GNSS, à semelhança dos métodos geodésicos convencionais, precisam de uma escolha adequada dos locais onde vão ser efetuadas as observações, daí que, no caso de medições em estruturas, a sua localização deva ser cuidadosamente selecionada. Algumas aplicações importantes para monitorização de pontes com GNSS podem ser encontradas em ([Baraka and El-Shazly, 2005](#); [Barnes et al., 2003](#); [Jianjing et al., 2002](#)).

Os sensores de fibra ótica, ([Figura 18](#)), também se tornaram uma técnica emergente para a medição da tensão no betão. A elevada sensibilidade bem como a imunidade às interferências eletromagnéticas assumem-se como as principais vantagens destes

sensores. Podem ser usados para medir uma grande variedade de parâmetros, incluindo a pressão, a temperatura, o desgaste, a formação de fissuras e os deslocamentos.

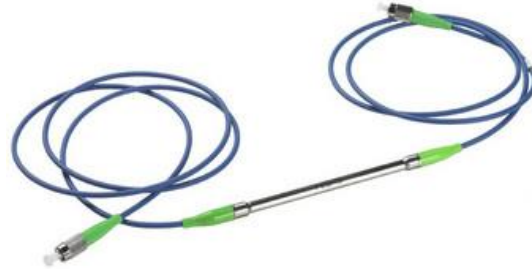


Figura 18 - Sensores de fibra ótica. Fonte: MRA Instrumentação, 2017.

A escolha dos métodos e instrumentos de observação depende da precisão ótima necessária para medir o deslocamento. Sendo essa precisão função do valor máximo previsto do deslocamento.

### 2.3. Novas tecnologias para monitorização

Apesar das tecnologias de deteção remota não estarem ainda, a ser muito exploradas no âmbito da monitorização (Ahlborn *et al.*, 2010), nas últimas décadas assistiu-se a significativos desenvolvimentos da tecnologia espacial, o que tem permitido a deteção de deslocamentos à superfície da terra com grande precisão e com vantagens inicialmente inesperadas para a realização de estudos relacionados com a observação global da terra a partir do espaço.

Este progresso tem vindo a ser possível, por um lado, graças à resolução das imagens obtidas na banda das micro-ondas, através de sensores SAR transportados por satélites e por outro lado, ao desenvolvimento das técnicas MT-InSAR (Hooper *et al.*, 2010; Kampes, 2005; Ferretti *et al.*, 2001; Berardino *et al.*, 2002, Van der Kooij *et al.*, 2006).

As técnicas MT-InSAR, têm potencial para apoiar o desenvolvimento de novos e mais eficazes meios de análise e de monitorização da saúde de grandes obras e, simultaneamente, adicionar redundância a baixo custo. No caso específico da monitorização de barragens, têm potencial para apoiar e ajudar os sistemas de alerta. Mais concretamente, com os métodos InSAR, é possível monitorizar pontes e barragens para identificar e analisar potenciais alvos sobre as estruturas com suspeitas de



deslocamentos, com resoluções temporais mensais (dados ERS 1 e 2, Envisat e RadarSAT) ou semanais (TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed). Com as novas missões Sentinel, da Agência Espacial Europeia (ESA, European Space Agency), essa resolução é sub-semanal. Devido à possibilidade de aquisição de inúmeros alvos sobre as estruturas, o conceito de otimização controlada pode ser dispensado com as técnicas InSAR.

Como resultado, a identificação atempada dos potenciais problemas e do seu impacto na saúde da estrutura, pode permitir intervenção com custos de reabilitação mais baixos.

Além disso, há duas características principais que tornam as técnicas interferométricas muito atrativas para a comunidade científica. A primeira consiste na elevada resolução oferecida na representação bidimensional da informação a analisar, ao longo de dezenas a centenas de quilómetros, a segunda na elevada precisão (até 1 mm/ano) da deformação que pode ser medida/observada (Hooper *et al.*, 2012). Muito importante também, é o facto de, em alguns casos, os dados poderem ser ordenados retrospectivamente para se obter o histórico da deformação.

As pontes e as barragens também podem ser monitorizadas por Radar de Abertura Sintética Terrestre (GB-SAR, *Ground Based Synthetic Aperture Radar*) (Tarchi *et al.*, 1999; Pieraccini *et al.*, 2006; Talich *et al.*, 2014). Este método é semelhante à fotogrametria terrestre (Tasci, 2013; Valença *et al.*, 2012) na medida em que também exige um ponto estação adequado, na parte inferior da ponte ou a jusante da barragem, e fornece, normalmente, informação em 2D sobre as deformações, do lado em que a estrutura está exposta. Por outro lado, o método GB-SAR também é semelhante ao InSAR, porque permite medições da deformação apenas na linha de vista do radar (Pieraccini *et al.*, 2006), contrariamente à fotogrametria terrestre que dá a deformação na direção perpendicular à linha de visão. Isto justifica-se pela diferente natureza do radar e da fotografia.

Os dados obtidos por satélite através de imagens de radar, podem ser uma fonte de informação independente para monitorizar remotamente a resistência/saúde estrutural de infraestruturas, permitindo a confirmação de resultados obtidos a partir de sensores *in-situ*. Para reabilitação preventiva de estruturas, estes dados permitem criar e alimentar Modelos e Ferramentas de Apoio à Decisão, além de que as tecnologias de deteção remota para monitorização, não entram em contacto direto com a estrutura a monitorizar. No caso de pontes, por exemplo, este facto revela-se bastante positivo visto que, não há necessidade de encerrar as faixas de rodagem, nem para monitorizar, nem

para preparar previamente a estrutura para realização das medições, não perturbando a sua normal utilização (Cusson *et al.*, 2012).

Esta evolução, só foi possível graças às imagens obtidas por meio de sensores SAR montados em satélites, que usam a banda de micro-ondas, e ao desenvolvimento das técnicas MT-InSAR (Hooper *et al.*, 2010; Kampes, 2005; Ferretti *et al.*, 2001; Bernardino *et al.*, 2002, Van der Kooij *et al.*, 2006).

A InSAR é uma técnica avançada de processamento, aplicada a imagens radar da superfície da Terra, que durante as últimas três décadas tem provado ser uma técnica valiosa para medir deformações tanto da superfície terrestre (Gabriel *et al.*, 1989; Hooper, 2006; Katelaar, 2009) como em obras de engenharia civil (Sousa and Bastos, 2012; Ghuman and McCardle, 2012; Grenerczy and Wegmüller, 2011; Cusson *et al.*, 2012). Enquanto no passado a maioria das medições foi efetuada com sistemas remotos com resolução temporal de um mês ou superior e produtos de baixa resolução espacial (50m ou mais) (Hensley *et al.*, 2005), as missões espaciais atuais oferecem uma resolução muito maior, acima de 1m (TerraSAR-X), e uma resolução temporal de alguns dias, como por exemplo no caso dos satélites Sentinel 1A e 1B.

Através da aplicação de técnicas de processamento InSAR a uma série temporal de imagens radar sobre a mesma região, é possível detetar movimentos verticais da infraestrutura na ordem dos milímetros, bem como movimentos horizontais, embora com menor precisão e, por conseguinte, identificar movimentos excessivos ou anormais, indicando possíveis problemas que podem requerer investigação detalhada no terreno. Uma grande vantagem desta tecnologia é que uma única imagem radar, que pode ser obtida em qualquer altura e em quaisquer condições atmosféricas, pode cobrir uma grande área e, portanto, todas as estruturas abrangidas pela imagem podem ser monitorizadas. Com o lançamento dos satélites Sentinel-1, a dimensão da área coberta por uma única imagem foi, ainda, consideravelmente aumentada (até 250 km x 250 km).

Na maioria dos países, existem muitas pontes com estruturas obsoletas ou estruturalmente fracas, ainda operacionais. A monitorização dessas estruturas, que fazem parte da rede rodoviária, é vital para garantir a segurança dos cidadãos. Para prolongar o tempo de vida útil dessas pontes, seria necessário recorrer a inspeções rigorosas e a uma manutenção adequada, no entanto, essas intervenções são morosas e com custos elevados, tornando, geralmente, impraticável a sua utilização exhaustiva, incluindo as pontes mais antigas, que, muitas vezes, representam riscos mais elevados. Os sensores espaciais do tipo SAR, modernos, proporcionam resoluções espaciais na ordem de um metro. Com dados de imagens SAR de alta resolução (TerraSAR-X,

Cosmo-SkyMed, etc.) até as pontes de menor dimensão são captadas por um grande número de pixéis numa imagem. Atualmente, esses dados são testados em aplicações para monitorização da saúde estrutural, apresentando resultados muito satisfatórios (Ghuman and Mc Cardle, 2012; Zhang *et al.*, 2010; Luo *et al.*, 2013; Sousa and Bastos, 2013). Nos últimos anos, a nova geração de imagens radar de alta resolução adquiridas por sensores SAR, associado ao desenvolvimento de algoritmos MT-InSAR avançados, como as técnicas de *Persistent Scatterer Interferometry* (PSI) (Ferretti *et al.*, 2001; Hooper *et al.*, 2004; Kampes, 2005;) e *Small Baseline Subsets* (SBAS), em que através de séries temporais de imagens SAR adquiridas sobre a mesma região, em épocas diferentes, é possível obter mapas de velocidade da deformação da superfície terrestre, têm sido exploradas para melhorar a capacidade de monitorizar deformações em infraestruturas de engenharia com alta precisão.

Com o aparecimento de uma nova técnica de processamento, MT-InSAR, ainda mais avançada, que combina os conjuntos de dados das duas metodologias anteriores, PSI e SBAS (Hooper, 2007; Hooper, 2008; Hooper, 2010; Ferretti *et al.*, 2011; Perissin and Wang, 2012), esses sensores têm sido usados para monitorizar as deformações de uma grande variedade de estruturas de origem natural e artificiais, destacando-se, pontes, barragens e diques.

Também sensores SAR, aerotransportados, podem ser usados para interferometria radar, se forem devidamente configurados, permitindo obter medições semelhantes aos modernos sensores SAR espaciais, obtendo, em alguns casos, uma capacidade de monitorização tão eficaz como a dos sensores espaciais. No entanto a cobertura regular é mais difícil.

A aplicação da interferometria radar, nos trabalhos de monitorização de estruturas, pode reduzir substancialmente os custos operacionais, proporcionando, ao mesmo tempo, observações contínuas e detalhadas que resultarão, naturalmente, numa melhor prevenção de desastres naturais ou tecnológicos.

De acordo com (Cusson *et al.*, 2012) o uso da InSAR para monitorização de pontes apresenta algumas vantagens, destacando-se o facto de ser possível:

- Monitorizar centenas de pontes remotamente e em simultâneo, com um intervalo de tempo de alguns dias, dependendo do sensor utilizado, e recorrendo a uma única imagem radar, mesmo quando obtida através das nuvens ou à noite;
- Identificar e medir deslocamentos verticais em inúmeros alvos numa única ponte, com elevada precisão, até milimétrica, dependendo da dimensão do tabuleiro e da resolução da imagem;

- Avaliar parâmetros gerais, a nível do assentamento da ponte, deflexão do tabuleiro, deformação devido a ciclos térmicos, assentamento da fundação e nível crítico de água/gelo do leito do curso de água.
- Ajudar a identificar pontes cuja monitorização seja prioritária;
- Complementar a monitorização *in-situ* com baixa densidade espacial/alta densidade de dados temporais e com densidade espacial elevada/baixa densidade de dados temporais para validação dos dados SHM;
- Efetuar monitorização mensal de deslocamentos da ponte, analisar a sua integridade e facilitar a sua manutenção, resolver problemas de acessibilidade e não ser necessário o encerramento das faixas de rodagem durante a observação, nem durante a preparação da estrutura para a aquisição de dados, uma vez que estas tecnologias não entram em contacto direto com a estrutura a monitorizar.

Em suma, existem vários métodos para monitorização de estruturas, como pontes ou barragens, dependendo da medição a efetuar. Os métodos de contacto, como por exemplo os sensores, permitem monitorizar a tensão, a inclinação, a vibração e outras características da estrutura de forma muito cuidadosa, mas só em pontos selecionados, onde o equipamento é instalado. Para pontes recém-construídas, estes sensores podem ser incorporados num sistema de monitorização em tempo real, com possibilidade de se avaliar remotamente a reação da construção a um ensaio de carga. A vantagem mais significativa destes métodos é a sua sensibilidade para monitorizar os pontos mais críticos da construção. No entanto para construções mais antigas, estes métodos são mais difíceis de aplicar.

As medições geodésicas tradicionais são realizadas, recorrendo a estações totais, níveis óticos e a laser como já foi referido, mas também com alinhamentos com fios ou com visadas entre pontos. Todas estas técnicas têm sido comparadas/integradas, ocasionalmente, com medições GNSS, quando se trata de monitorizar casos específicos de barragens ou pontes. Entre estas técnicas convencionais de levantamento geodésico para medir deformações em estruturas artificiais, o nivelamento efetuado com níveis óticos de precisão, destaca-se pela sua capacidade para medir a deformação da componente vertical com alta precisão, mesmo em condições ambientais desfavoráveis, onde outras técnicas não podem ser usadas. No entanto, pode levar a custos acrescidos quando é necessário inspecionar, também, a zona envolvente da barragem. Nesse caso, os deslocamentos horizontais são obtidos por aplicação dos métodos de Triangulação e Poligonação, recorrendo a medições com estações totais. Em ambos os casos para medição de deslocamentos verticais e

horizontais, define-se a época de referência, para as observações, como descrito na secção 2.1, sendo o controlo da deformação obtido por comparação das medições efetuadas nas várias épocas com a época de referência, o que pressupõe um deslocamento relativo. Praticamente todos os métodos geodésicos mencionados dispensam o contacto com a estrutura, exceto o GNSS que necessita, normalmente, da instalação de alguns recetores na parte superior da ponte, ou no coroamento da barragem, permitindo registar movimentos tridimensionais. A precisão alcançada com GNSS é significativamente melhor na componente horizontal, o que torna este método inadequado para o teste do ensaio de carga da ponte e, por outro lado, apropriado para a monitorização da deflexão da ponte ou da barragem. O registo da deformação é feito em pontos isolados da ponte, sendo também necessário garantir boas condições de visibilidade entre o recetor e os satélites, pois se houver obstrução, devido a árvores, ou no caso de barragens situadas em vales encaixados, a precisão diminui, ou não se conseguem observações. Uma vantagem dos GNSS, sobre os métodos terrestres convencionais é que a medição das deformações pode ser automática, contínua e em todas as condições meteorológicas.

Os métodos aéreos, como por exemplo a fotogrametria e o Lidar, precisam de uma aeronave para efetuar o voo, o que pode tornar dispendiosas as observações. Acresce o facto de só ser possível efetuar o voo com boas condições meteorológicas. No entanto, como podem ser observadas várias construções ao mesmo tempo, durante a realização do voo, os custos podem ser mitigados. Geralmente, os métodos aéreos monitorizam apenas o tabuleiro/convés superior da construção, pois, mesmo que seja registada uma outra parte adjacente da estrutura, o ângulo de observação não permite obter precisões adequadas. Além disso, estes métodos são especialmente úteis quando se pretende analisar deformações visíveis, sendo, por isso, adequados para ensaios de carga.

Os métodos terrestres requerem um ou dois pontos de observação na parte inferior da estrutura, para que seja possível observá-la como um todo. O custo depende diretamente do número de campanhas de observação realizadas e cada campanha deve ser processada isoladamente para proporcionar resultados com significância. Em todos os métodos terrestres, exceto com o GB-SAR, é necessária boa visibilidade entre o ponto de observação e o alvo. De forma semelhante aos métodos aerotransportados, também a interferometria SAR por satélite permite, geralmente, monitorizar o tabuleiro superior das construções, dependendo, a precisão das observações, da orientação da construção e do número de imagens disponíveis, o que pode ser um fator limitante. No entanto, pelo mesmo custo, é possível monitorizar todas as pontes presentes na área

coberta pela mesma imagem, sendo este o único método que permite obter informação da deformação da estrutura retrospectivamente.

Os métodos de monitorização têm características diferentes e devem ser utilizados em situações distintas. Os métodos aéreos e espaciais devem ser utilizados para a monitorização sistemática do estado estrutural das pontes e, em caso de resultados duvidosos, devem ser utilizados métodos com maior sensibilidade em termos de precisão (sensores, métodos terrestres, nivelamento). Tudo depende da natureza do problema a analisar.

No âmbito desta tarefa dedicada ao estudo dos métodos atuais mais avançados, para monitorização de estruturas, mais concretamente barragens e pontes foi possível analisar os aspetos teóricos e técnicos destas metodologias, focando-se nos aspetos inovadores de inspeção e nas oportunidades que estes poderiam proporcionar. Tal permitiu a identificação de oportunidades que poderiam melhorar, potencialmente, os processos de inspeção e de manutenção. A [Tabela 1](#) sintetiza os principais prós e contras dos diferentes métodos de monitorização, anteriormente discutidos.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos principais métodos usados na monitorização de estruturas, incluindo InSAR

Fonte: (Sousa *et al.*, 2014)

Método	Vantagens	Desvantagens
<p>Sensores: Extensómetros, Acelerómetros, Tiltímetros, Sensores de fibra óptica, etc.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• São usados para monitorizar os pontos mais críticos da construção.</li> <li>• Usados sem dificuldade em pontes e barragens recém-construídas.</li> <li>• Utilizados para monitorização em testes de carga e testes de vibração, com intervalos de tempo muito curtos (minutos).</li> <li>• Possibilidade de medir tensão, inclinação etc.</li> <li>• Têm alta sensibilidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fornecem apenas informações de medição pontual</li> <li>• Impossibilidade de monitorização para todas as pontes / barragens, Demorado e dispendioso para construções já edificadas em funcionamento.</li> </ul>
<p>Métodos terrestres: GB-SAR, GB-fotogrametria, Varrimento a Laser Terrestre (TLS), Estação Total Robótica (RTS), Estação Total Robotizada Refletora (RRTS) Nivelamento Geométrico</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitorização lateral da ponte ou barragem a partir da parte inferior da construção.</li> <li>• Não há necessidade de instalar nada no corpo da barragem ou ponte (exceto a colocação de alvos refletores para utilização da Estação Total).</li> <li>• Permitem obter mapas de deformação nas direções 1-D e 2-D.</li> <li>• RTS / RRTS, permitem monitorização em 3D</li> <li>• Adequados para testes de carga, ou para testes de vibração em alguns casos (depende do instrumento).</li> <li>• Cada época de observação é processada separadamente.</li> <li>• Precisão elevada em condições ambientais muito difíceis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não são eficazes em algumas condições meteorológicas (nevoeiro, sol forte, chuva, etc.) (exceto o GB-SAR).</li> <li>• Gestão de dados difícil.</li> <li>• Necessidade de encontrar um lugar adequado para colocar um instrumento na parte inferior da construção e usar o mesmo ponto para todas as épocas.</li> <li>• GB-SAR: fornece medidas apenas na direção da LOS</li> <li>• GB-fotogrametria: fornece medidas apenas no plano perpendicular à LOS</li> <li>• GB-SAR: artefatos de radar próximos de cabos, ambiguidade de fase, etc.</li> <li>• Apenas medições verticais 1D</li> </ul>

Método	Vantagens	Desvantagens
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control da integridade global economicamente viável (estrutura e área circundante).</li> <li>• Procedimentos de operação fáceis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa resolução temporal, necessidade de inspeções humanas frequentes e instalação de marcas de referência.</li> </ul>
Métodos aéreos: (LiDAR, Fotogrametria aérea)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilidade de analisar mais construções ao mesmo tempo (se localizadas próximas).</li> <li>• LiDAR: possibilidade de detetar pequenas fendas no tabuleiro da ponte (alta resolução).</li> <li>• Cada época é processada separadamente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custo elevado de cada época de observação, juntamente com a necessidade de clima aceitável.</li> <li>• Menor precisão e exatidão.</li> <li>• LiDAR: sucesso limitado.</li> </ul>
Posicionamento por Satélite (GNSS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite efetuar medições nas três direções</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fornece apenas informações de medição pontual, baixa densidade de informação.</li> <li>• Menor precisão na direção vertical.</li> <li>• A precisão depende da envolvente da ponte ou barragem (árvores podem obstruir o percurso do sinal desde o satélite até à estação GNSS).</li> <li>• Impossibilidade de monitorização dinâmica.</li> </ul>
InSAR Espacial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilidade de analisar o comportamento da ponte ou barragem retrospectivamente.</li> <li>• Possibilidade de monitorizar várias pontes ou barragens ao mesmo tempo (desde que estejam na área de cobertura da imagem).</li> <li>• Fornece mapa de deformação 1-D ou mesmo 2-D.</li> <li>• Deformações 3-D podem ser obtidas a partir de várias trajetórias do sensor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessidade de obter pelo menos 20 imagens SAR para um processamento (custos mais elevados devido ao tempo mais alargado).</li> <li>• A precisão depende do número de imagens processadas.</li> <li>• A precisão depende da orientação da estrutura e da sua envolvente.</li> <li>• Impossibilidade de efetuar testes de carga e monitorização dinâmica.</li> </ul>



Pode concluir-se que a construção de grandes obras de engenharia com o objetivo de trazer imensas vantagens económicas para a sociedade, traz, por outro lado, um risco acrescido para as populações no caso de haver acidentes. Assim devido à evolução tecnológica atual, nomeadamente com as técnicas de Interferometria SAR no âmbito da Detecção Remota, é possível de forma rápida e a custos relativamente baixos, analisar o comportamento dessas obras ao longo do tempo e a nível mundial.

Não se deve, no entanto, descartar o enorme historial de sucesso dos métodos convencionais em uso, embora muito morosos. Comparar métodos Geodésicos com Instrumentais ou métodos Interferométricos com Geodésicos será sempre uma mais-valia no controlo de deformações de origem natural ou em estruturas de engenharia civil.

# CAPÍTULO 3 - INTERFEROMETRIA SAR: PRINCÍPIOS E CONCEITOS

Este capítulo apresenta uma breve revisão sobre a teoria e os fundamentos necessários para compreender as técnicas Interferométricas. A teoria apresentada dá especial realce à definição dos princípios Radar, SAR e InSAR. São, ainda, apresentados e discutidos os fenómenos responsáveis pelo aparecimento de ruído na medição da fase interferométrica. Uma parte significativa deste capítulo é dedicada ao processamento interferométrico, sendo, também, discutidas as principais aplicações e limitações. Chama-se a atenção para o facto de o capítulo estar estruturado e aprofundado para que se torne acessível a qualquer leitor, mesmo os menos familiarizados com estas técnicas. Para um estudo mais aprofundado, sugerem-se os trabalhos de [Bamler and Hartl \(1998\)](#); [Rosen et al. \(2000\)](#); [Sousa, \(2009\)](#); [Cuenca, \(2012\)](#).

## 3.1 Um Pouco de História

O rápido desenvolvimento das tecnologias espaciais, a que assistimos nas últimas décadas, possibilitou o aparecimento de novos métodos de deteção de deslocamentos da superfície terrestre, ou de deformações de estruturas construídas pelo Homem, a partir do espaço, com elevada precisão e consequentes vantagens. Este progresso foi possível graças aos dados obtidos a partir de satélites, entre os quais se salientam os dados obtidos por sensores Radar de Abertura Sintética (SAR- Synthetic Aperture Radar), e ao desenvolvimento de novos métodos de processamento interferométrico MT-InSAR, recorrendo a séries temporais de imagens SAR. ([Hooper et al., 2007](#) ; [van der Kooij et al., 2006](#); [Kampes, 2005](#); [Berardino et al., 2002](#); [Ferretti et al., 2001](#)).

O termo Radar (*RADio Detection And Ranging*) é usado de uma forma genérica para classificar os sistemas que trabalham na banda de frequências de micro-ondas (1 GHz a 300 GHz). Esses sistemas foram desenvolvidos na primeira metade do século XX, inicialmente para fins militares, durante a Segunda Guerra Mundial para determinar a posição ou a trajetória de objetos em movimento, como navios ou aviões e, posteriormente, para fins civis a partir da década de 70. As técnicas de processamento de sinal que recorrem à compressão de impulsos são, tradicionalmente, utilizadas para melhorarem a relação sinal/ruído e, assim, melhorar a precisão da localização para

apenas alguns metros (Cumming and Wong, 2005; Soumekh, 1999). O SAR, é uma extensão do Radar, que usa um feixe direcional e técnicas de processamento de sinal sofisticadas para combinar informação de vários ecos e, dessa forma, estimar, com precisão, a posição do alvo. A grande vantagem da utilização desta técnica reside no facto de se conseguirem precisões de poucos metros, recorrendo a antenas de pequenas dimensões para emissão e receção de impulsos. Trata-se, por isso, de uma técnica baseada no sistema Radar de imagem, particularmente indicada para a observação remota da Terra.

Depois dos primeiros testes realizados nas décadas de 60 e 70 do século passado em plataformas aéreas, a Agência Espacial Americana, (NASA, *National Aeronautics and Space Administration*) lançou, em 1978, o primeiro satélite com um sensor SAR a bordo, o Seasat. Esse satélite foi lançado para estudos oceânicos e foi responsável por adquirir as primeiras imagens sintéticas e de alta resolução da superfície da Terra, cobrindo cerca de 100 milhões de km<sup>2</sup> de mar e de terra, nos seus 98 dias de operação (Fu and Holt, 1982).

Há duas décadas atrás, grande parte dos estudos interferométricos, usando imagens SAR, eram obtidos recorrendo à interpretação de um único interferograma, obtido através da combinação de apenas um par de imagens SAR.

Um dos primeiros trabalhos de aplicação da técnica InSAR na medição da deformação do terreno foi apresentada por Massonnet *et al.* (1993), quando obteve o mapa de deslocamentos do terreno após o terramoto de Landers, que ocorreu em 1992. Desde então, conseguiram-se diversos avanços neste campo, tanto do ponto de vista algorítmico, como do ponto de vista tecnológico.

No final da década de 1990, detetou-se que alguns pontos (pixéis na imagem SAR) mantinham um comportamento estável da fase por grandes períodos de tempo (Usai, 1997; Usai and Hanssen, 1997) e para diferentes ângulos de incidência (Ferretti *et al.* 2000, 2001). A identificação destes alvos no terreno permite detetar deformações milimétricas da crosta terrestre (Ketelaar, 2008; Hooper *et al.*, 2012). Foi, precisamente, esta descoberta que proporcionou o lançamento das bases para a exploração das técnicas MT-InSAR (*Multi-Temporal InSAR*), possibilitando, desta forma, a resolução das principais limitações da técnica InSAR convencional: decorrelação temporal, decorrelação geométrica e influência da atmosfera. Ao longo dos últimos anos, foram várias as técnicas MT-InSAR desenvolvidas com o objetivo de mitigar essas limitações da InSAR convencional, sendo que, podem todas ser enquadrados em duas categorias: *Persistent Scatterer Interferometry* (PSI) e *Small Baseline* (SB).

As primeiras aplicações MT-InSAR desenvolveram-se, no início da primeira década do séc. XXI, e desde então muitos grupos de investigação, a nível mundial, trabalharam nas diferentes técnicas MT-InSAR. Atualmente, neste domínio, são bem conhecidas, técnicas como o Subconjunto de Pequenas Linhas-Base (SBAS, *Small Baseline Subset*), na categoria SB, a Análise Interferométrica do Ponto Alvo (IPTA, *Interferometric Point Target Analysis*), a Técnica de Coerência de Pixéis (CPT, *Coherence Pixel Technique*), o Método Stanford para PS (StaMPS, *Stanford Method for PS*), a Rede de Pontos Estáveis (SPN, *Stable Point Network*) e os Pares de Difusores Persistentes (PSP, *Persistent Scatterer Pairs*) na categoria PSI. Todas estas técnicas têm por base a exploração de dados de um conjunto de imagens SAR, adquiridas durante passagens sucessivas do satélite sobre a mesma zona, as quais são focadas e co-registadas a uma única imagem (designada de *master*) selecionada de entre as adquiridas. Os dados são depois analisados, *pixel a pixel*, de modo a poder identificar-se uma malha de pontos dispersos, habitualmente relativa a estruturas artificiais (ex. edifícios, pontes, monumentos, antenas, postes, condutas, etc.). Esta estratégia permite, uma filtragem mais eficiente do ruído devido à componente da atmosfera e compensar de forma rigorosa os erros devidos à topografia, (os quais normalmente prejudicam a análise em interferogramas isolados) melhorando, assim, a precisão que era conseguida com o anterior método DInSAR.

Em (Sousa, 2009; Sousa *et al.*, 2010; Sousa *et al.*, 2011) foram comparados duas técnicas MT-InSAR representativas das duas categorias PSI e SB: a técnica DePSI, *Delft University of Technology PSI package* e a técnica StaMPS/MTI, *Stanford Method for Persistent Scatterers/Multi-Temporal Interferometry*. Concluiu-se que o desempenho de cada uma, depende do tipo de deformação existente e do tipo de área a monitorizar.

A técnica StaMPS, na categoria PSI, evoluiu para a técnica StaMPS/MTI, quando os algoritmos desenvolvidos passaram a integrar a categoria SB e ainda a junção de ambas (PSI+SB).

A aplicação das técnicas MT-InSAR permite antecipar o registo de potenciais problemas, a título de exemplo, refere-se que estas técnicas, estão a ser aplicados na Holanda, num projeto de monitorização de mais de 17000 km de diques (van Leijen *et al.*, 2010). Trata-se de um programa financiado pelo estado holandês e que prevê, a curto prazo, a redução das equipas móveis que atualmente tratam da inspeção visual dos diques. No âmbito desse projeto, as áreas identificadas como de potencial risco são primeiro detetadas a partir do processamento MT-InSAR e posteriormente verificadas localmente.

Os resultados preliminares deste, e de outros projetos similares em curso, serviram para constatar as vantagens destas metodologias, comparativamente com os métodos de observação/monitorização convencionais, o que permitiu estabelecer algumas conclusões:

- As técnicas MT-InSAR podem ser utilizadas para identificar e monitorizar alterações de comportamento num número elevado de pontos (PS), pertencentes a estruturas (por exemplo, pontes e barragens);
- As imagens SAR podem cobrir toda uma área metropolitana, permitindo a monitorização de quaisquer estruturas existentes, independentemente das condições atmosféricas;
- A monitorização remota pode ser usada para identificar estruturas com problemas, permitindo hierarquizar as intervenções *in situ*.

A monitorização de frequência semanal, possível com os satélites de nova geração (TerraSAR-X, COSMO-SkyMed, Sentinel-1) permitiu melhoramentos consideráveis na integridade, continuidade e disponibilidade dos serviços de monitorização de estruturas.

Uma das maiores vantagens das técnicas que usam imagens SAR reside no facto de uma só imagem radar possibilitar obter uma cobertura de 100 km por 100 km (ou 250 km por 250 km, no caso do satélite Sentinel-1A/B, da Agência Espacial Europeia (ESA, *European Space Agency*), em quaisquer condições atmosféricas, permitindo, estudar todas as estruturas visíveis nessa imagem, a custos muito baixos. Se a área coberta for urbana, podem considerar-se centenas, ou mesmo milhares de estruturas.

Os primeiros sensores SAR, colocados em plataformas espaciais, nas décadas de 70 a 90 do século passado, foram usados em muitas aplicações de controlo de deformações da crosta terrestre, ainda que não tivessem sido lançados com esse objetivo, como por exemplo os satélites ERS1/2 e Envisat da ESA, atualmente sem funcionarem. A ESA continua a dar continuidade a este tipo de missões através do programa “Copernicus” com o recente lançamento dos satélites Sentinel-1A, em abril de 2014 e Sentinel-1B em abril de 2016. A [Figura 19](#) apresenta, cronologicamente, as missões espaciais mais relevantes com sensores SAR. A densidade destas missões nos últimos anos, muitas delas exclusivamente dedicadas à interferometria, são prova do grande sucesso que estas técnicas têm alcançado, sendo, hoje, uma técnica madura e efetiva na determinação de deformações.

A evolução dos sensores SAR levou a melhoramentos substanciais nas resoluções espacial e temporal, permitindo, assim, que a informação registada nestas imagens

possa ser usada em casos tão específicos como é o controlo/monitorização de estruturas.

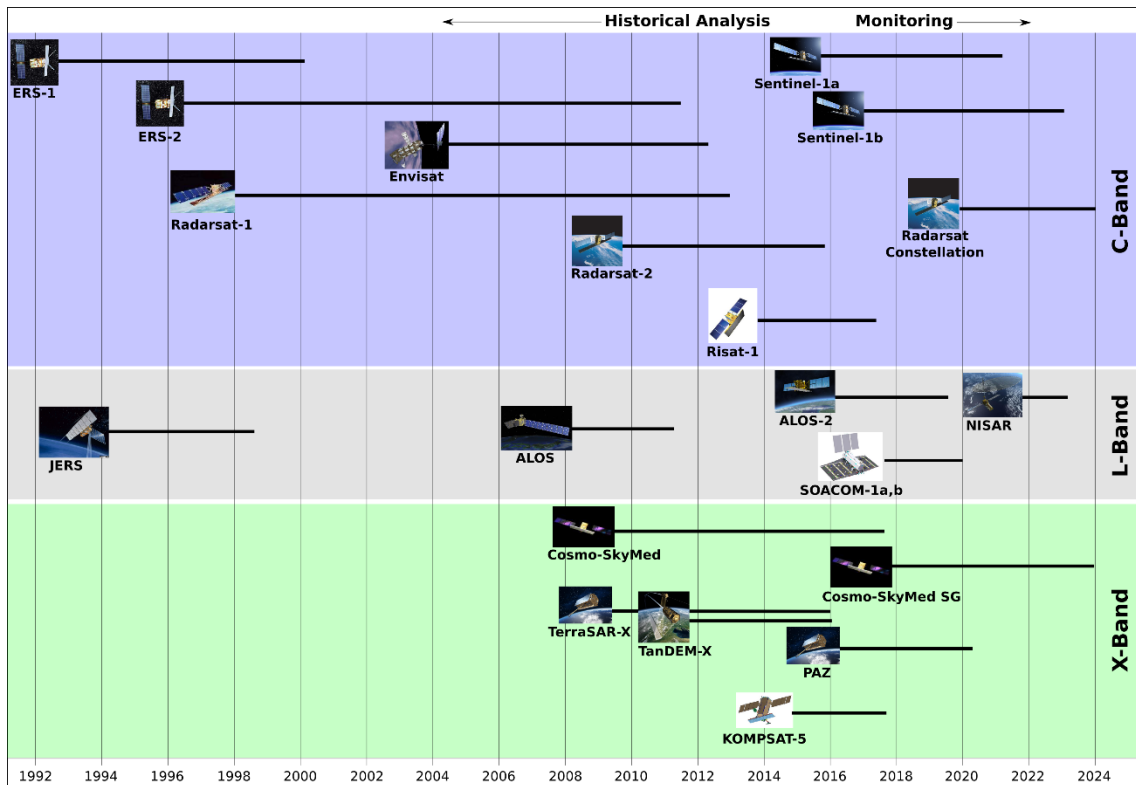


Figura 19 - As missões SAR mais relevantes apresentadas por data e banda (C, L e X). Fonte: Unavco.org

A Figura 20 apresenta as missões SAR planeadas por algumas das agências espaciais e permite concluir que esta aposta será para continuar no futuro.

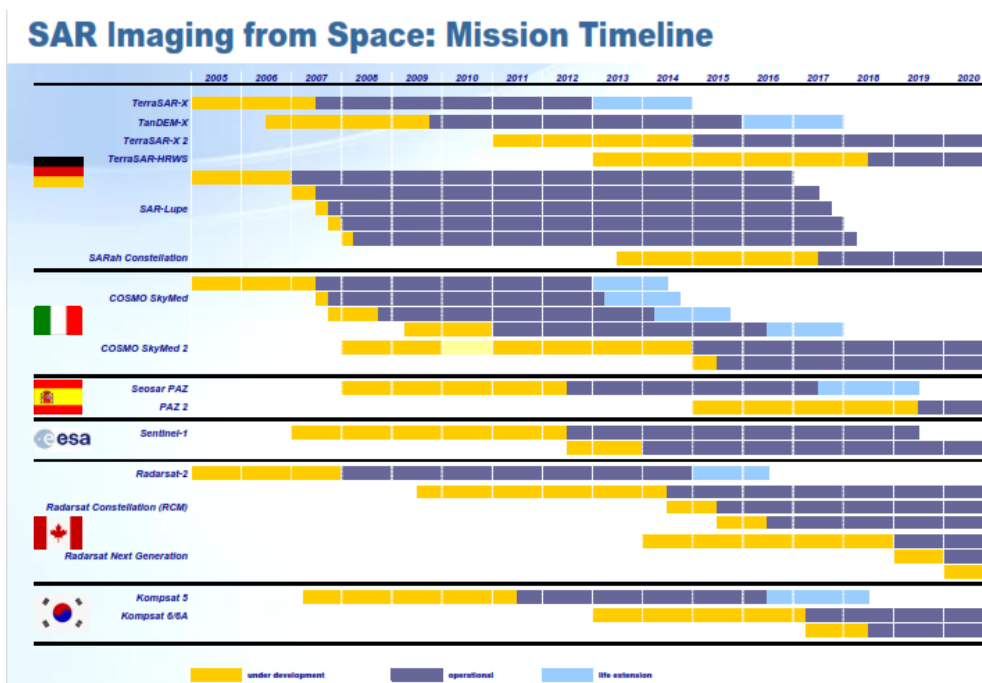


Figura 20 - As missões SAR mais relevantes, planeadas por algumas agências espaciais até 2020. Fonte: EADS Astrium

### 3.2 Radar de Abertura Sintética (SAR)

Os sistemas SAR, aéreos ou espaciais, normalmente dispõem de uma antena fixa apontada lateralmente, que “ilumina” uma faixa de terreno paralela à trajetória do sensor, com uma série de impulsos de micro-ondas monocromáticos (Figura 21).

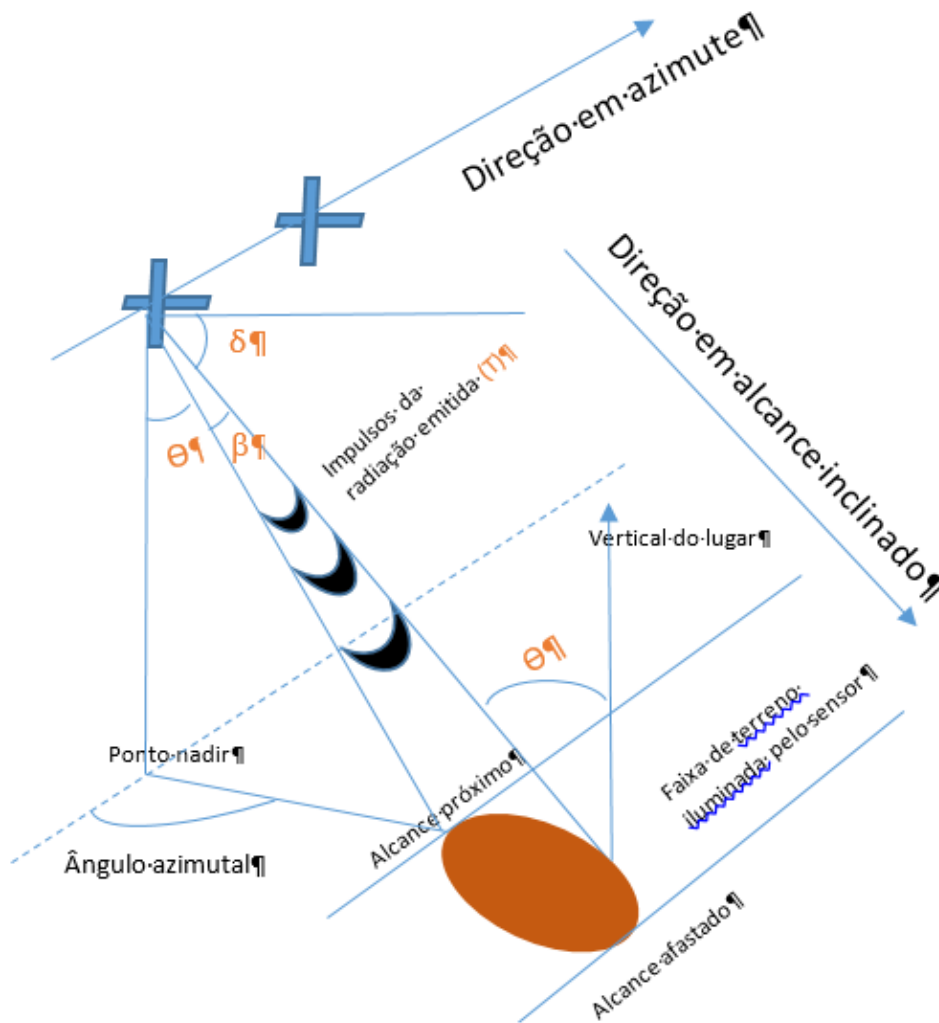


Figura 21 - Geometria de aquisição das imagens SAR. Fonte: Própria.

A direção de voo da plataforma é, geralmente, designada por direção azimutal (ou azimute) e a direção segundo a qual o lóbulo principal da antena transmite o sinal é a direção de alcance (*range*). O ângulo  $\theta$ , formado pela vertical do lugar e a direção de alcance, é designado por ângulo de incidência, o ângulo  $\delta$ , representa o ângulo de depressão e o ângulo  $\beta$ , indica a abertura da antena ou largura do feixe.

Quando inativa, entre impulsos transmitidos, a antena recebe os ecos refletidos da superfície terrestre. Resulta, diretamente da teoria, que a área iluminada no terreno é inversamente proporcional à dimensão da antena (Skolnik, 2001). Assim, para ser possível obter resoluções azimutais da ordem de poucos metros recorrendo ao Radar de Abertura Real (RAR), teriam de ser usadas antenas de dimensões quilométricas.

Na direção azimutal a resolução ( $R_a$ ) depende do tamanho da antena (Equação 3.1).

$$R_a = \frac{\lambda R}{L} \quad (3.1)$$

Sendo,  $\lambda$  o comprimento de onda do sinal emitido,  $R$  a distância percorrida pelo impulso radar e  $L$  o comprimento da antena.

A resolução azimutal do sensor, antes do processamento do sinal SAR para simular uma antena maior, é constante, e corresponde à largura de uma célula de resolução, sendo dada simplesmente por metade do comprimento da antena (Equação 3.2)

$$R_a = \frac{L}{2} \quad (3.2)$$

Por exemplo, no caso do satélite ERS-1, que tem uma antena de 10 m, para ser possível obter 4,7 m em resolução azimutal com abertura real, seria necessária uma antena com dimensão de 10 km. Para se obter a mesma resolução azimutal com abertura sintética é suficiente uma antena de 10m de diâmetro.

A técnica SAR permite, então, superar a limitação do RAR, simulando uma antena de grandes dimensões que corresponde à distância percorrida pela plataforma enquanto a antena Radar recolhe informações sobre o alvo. Este conceito consegue separar dois alvos no mesmo alcance em diferentes azimutes, através da diferença de velocidades, relativas à plataforma. A onda monocromática, refletida por dois alvos distintos iluminados pelo mesmo feixe, sofre um desvio *Doppler* associado àqueles alvos, o que permitirá determinar a fase correspondente a cada alvo, recorrendo ao conhecimento da trajetória da plataforma. É combinada a informação de múltiplos ecos, todos provenientes do mesmo alvo (Figura 22), simulando uma antena de abertura sintética de grandes dimensões.

Na direção de alcance, a resolução ( $R_r$ ), depende do tempo de duração do impulso emitido e é traduzida pela Equação:



$$R_r = \frac{cT}{2} \tag{3.3}$$

em que  $T = \frac{1}{\beta}$  representa a duração do impulso, sendo  $\beta$  a largura de banda da frequência SAR emitida.

A resolução será, então, função do número total de ecos recebidos de cada alvo, pelo que, quanto mais tempo um alvo for iluminado, melhor será resolvido. Consegue-se, desta forma, adquirir imagens de grande resolução, recorrendo a antenas pequenas e usando um dos algoritmos de processamento disponíveis (Cumming and Wong, 2005; Soumekh, 1999).

A resolução espacial horizontal específica, obtida através da atual técnica SAR por satélite, varia de 8 a 150 m, e as resoluções normalmente usadas para o InSAR estão entre 5 e 30 m.

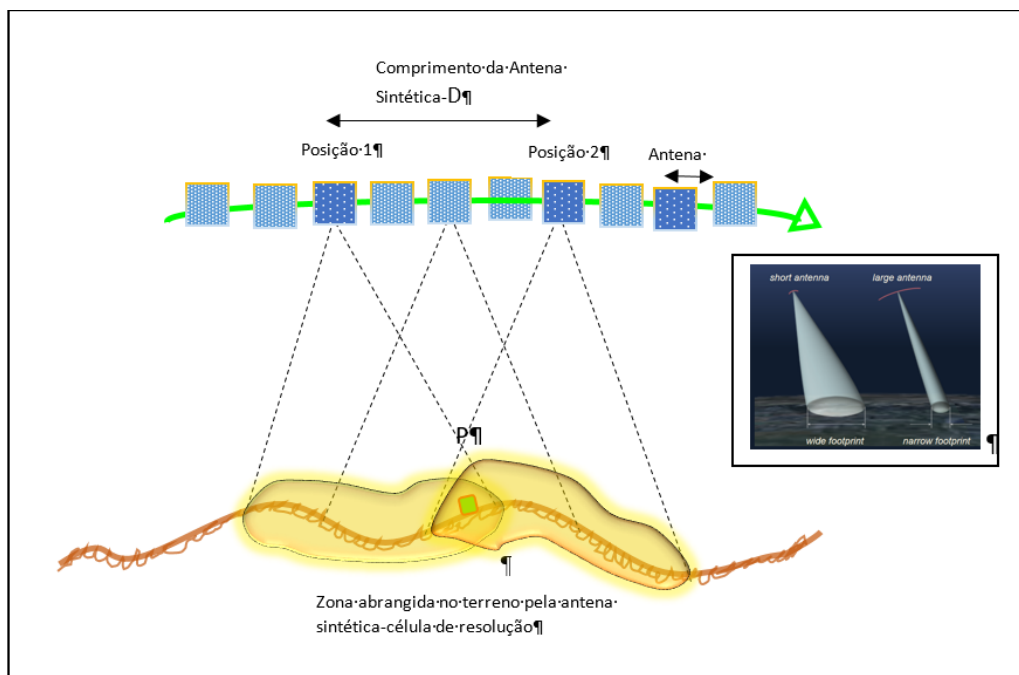


Figura 22 - O conceito Radar de Abertura Sintética (SAR). Fonte: Adaptado de Sousa, J.J

A geometria de aquisição de imagens mais comum usando o sensor SAR de visada lateral é designada por *Stripmap* (Figura 21). Neste modo de aquisição de imagens SAR designado de “faixa padrão”, a faixa do terreno é iluminada com uma sequência contínua de pulsos, enquanto o feixe de irradiação da antena aponta de um azimute e ângulo de

inclinação fixos. Os sistemas mais recentes, baseiam-se em outros tipos de geometria mais complexos, designados por *ScanSAR* e *Spotlight SAR*, exemplificados na [Figura 23](#), que possibilitam o aumento da área coberta e/ou da resolução espacial, porque permitem maior tempo de iluminação do solo pelo sensor, comparativamente com o modo de visada lateral da “faixa padrão”.

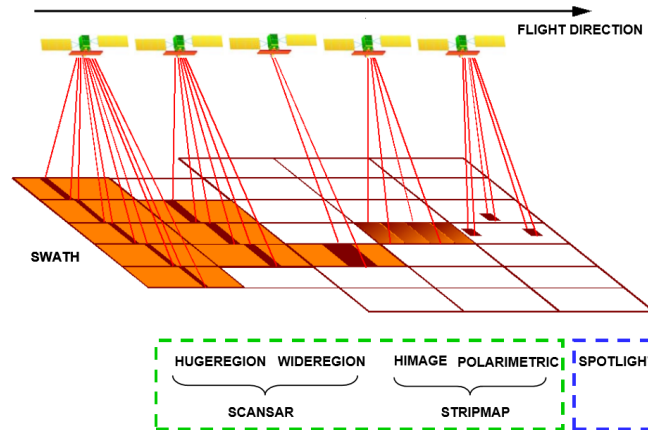


Figura 23 - Exemplo dos três modos de aquisição, ScanSAR, Stripmap e Spotlight SAR, do sensor COSMO - Sky-Med. Fonte: COSMO-SkyMed User Guide.

Numa imagem SAR constituída por uma matriz de linhas e colunas, as linhas estão associadas com diferentes localizações em azimute e as colunas estão associadas com diferentes localizações em alcance inclinado. A localização e a dimensão das células de resolução dependem das características do sistema SAR utilizado. Um *pixel* na imagem é definido pelas coordenadas SAR, azimute e alcance. No caso das imagens ERS, a célula de resolução SAR tem dimensão de 5m em azimute e 25 metros em alcance inclinado.

Cada *pixel* de uma imagem SAR é representado por um número complexo com duas componentes, a amplitude e a fase, que contêm informação do campo de micro-ondas retro-refletidas na superfície da Terra pelos difusores persistentes, (rochas, vegetação, construções, etc.). A medida da amplitude nas imagens, que resulta da retro-reflexão, é analisada por meio de uma escala de cinzentos. Essa reflexão depende mais da rugosidade da superfície em causa, do que da sua constituição química. Por exemplo, zonas urbanas e rochosas têm mais reflexão, e conseqüentemente, na imagem, a amplitude é maior e os pixels mais brilhantes do que em zonas planas de bacias hidrográficas calmas. Nestas a reflexão é menor e, por conseguinte, a amplitude é mais baixa e os pixels mais escuros, como se pode ver na imagem de amplitude do Golfo da Finlândia na [Figura 24](#).



Figura 24 - Imagem de amplitude (Golfo da Finlândia em 8-2-2017). Os aglomerados de reflexos de radar brancos e brilhantes em toda a imagem representam cidades, entre as quais Helsínquia na margem superior do Golfo. Fonte: ESA.

As imagens SAR obtidas são focadas recorrendo a algoritmos de processamento SAR, obtendo-se uma imagem complexa bidimensional, que representa o brilho (amplitude) e a fase de cada difusor no terreno. Estas imagens são designadas por *Single Look Complex* (SLC).

Considerando que para cada imagem, o sinal enviado pelo sensor é retro-refletido na superfície do terreno, pode escrever-se a seguinte equação para a fase:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2r = \frac{4\pi r}{\lambda} \quad (3.4)$$

Sendo:

$\varphi$ - Fase do sinal retro-refletido;

$r$ - Distância percorrida pelo sinal radar entre o sensor e o alvo;

$\lambda$ - Comprimento de onda SAR.

### 3.3 Interferometria Radar de Abertura Sintética (InSAR)

A Interferometria Radar de Abertura Sintética (InSAR) baseia-se na combinação de pelo menos duas imagens SAR. A natureza monocromática dos ecos refletidos permite-nos combinar a informação de fase de duas ou mais imagens SAR obtidas sobre a mesma área, simultaneamente ou em instantes diferentes. Estas imagens sobre a mesma área são normalmente adquiridas de perspetivas ligeiramente diferentes pelo que a segunda imagem, imagem *slave*, terá de ser rigorosamente registada e transformada na geometria da primeira, imagem *master*, para formar um interferograma (Zebker and Goldstein, 1986; Sansosti et al., 2006). Uma só imagem *master* poderá formar vários interferogramas com diferentes imagens *slave*.

A imagem *slave* deve ser primeiro registada e depois reamostrada para a geometria da imagem *master* (Hanssen and Bamler, 1999; Hanssen, 2001).

O processo de registo das imagens começa com o co-registo em que se calcula um deslocamento inicial entre as imagens *master* e *slave* com base na informação orbital. Esse deslocamento inicial é designado por co-registo aproximado, ou primeiro alinhamento entre as imagens. O InSAR requer o co-registo ao nível do subpixel para garantir interferogramas coerentes. Just e Bamler (1994), afirmam que uma precisão no co-registo maior que 1/8 do tamanho do *pixel* leva a que a descorrelação possa ser desprezível.

Em seguida, o valor resultante do co-registo inicial, é calculado com maior precisão procurando a localização que maximiza a correlação entre as imagens de amplitude. Isso é realizado pelo método de correlação de imagens através da definição de matrizes de busca, definindo um conjunto de “janelas” uniformemente distribuídas

A estimativa do deslocamento aproximado é melhorada ainda mais usando esse conjunto de “janelas” de amostras sobrepostas, uniformemente distribuídas e procurando novamente os pixels que maximizam a correlação entre as imagens de amplitude *master* e *slave*. O resultado deste processo é um valor preciso de deslocamento por cada janela. Usando os deslocamentos precisos como observações é determinada uma função de mapeamento, que geralmente é um polinómio de segundo grau. Finalmente, com a função de mapeamento, toda a imagem *slave* é reamostrada para a geometria da imagem *master* formando um Interferograma [Figura 26](#).

A [Figura 25](#) do lado esquerdo, ilustra a geometria de aquisição das imagens. Cada posição do satélite permite a aquisição de uma imagem SAR.

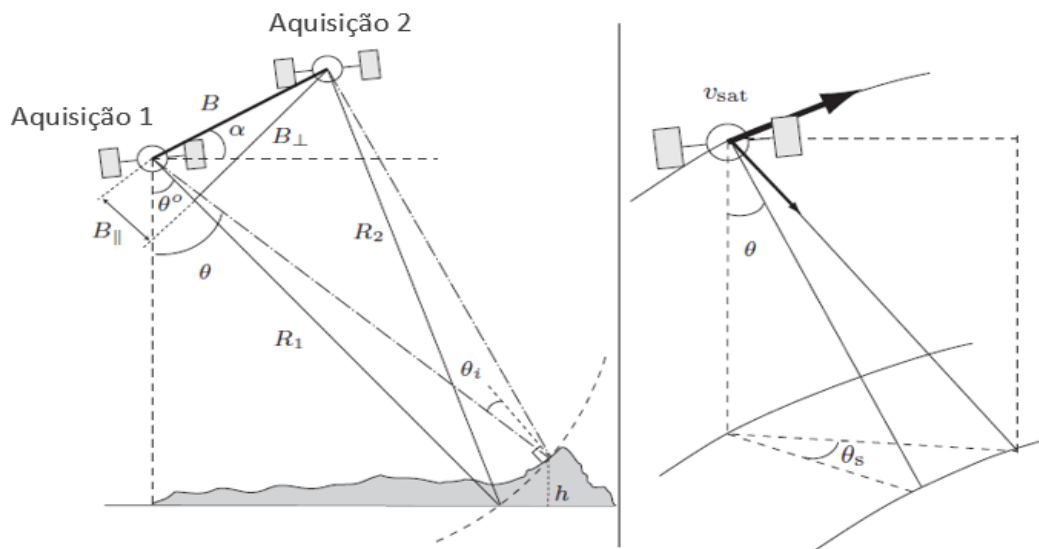


Figura 25 - Geometria de aquisição InSAR, relativa ao alvo com altura  $h$  em relação à superfície de referência (esquerda) e imagem 3-D com o ângulo squint (direita). Fonte: Cuenca, M.

Os elementos representados na [Figura 25 do lado esquerdo](#) são:

*Aquisição 1*- Posição do satélite, no instante  $t_1$ ;

*Aquisição 2*- Posição do satélite, no instante  $t_2$ ;

$R_1$ - Distância entre o sensor e o alvo no terreno, na primeira aquisição;

$R_2$ - Distância entre o sensor e o alvo no terreno, na aquisição seguinte;

$$\Delta_R = R_2 - R_1$$

$\theta$ - Ângulo de incidência;

$\alpha$ - Ângulo entre a base espacial e a direção horizontal, (depende da posição relativa dos sensores no instante de aquisição);

$\theta_i$ - Ângulo de incidência local;

$h$ - Altura do alvo em relação à superfície de referência;

$\theta^\circ$ - ângulo de incidência em relação à superfície de referência;

$B$ - Base espacial. Distância entre as duas posições do sensor (definida pela base perpendicular e pela base paralela).

$B_{\perp}$ - Base perpendicular. Corresponde à distância efetiva entre as duas posições do sensor SAR no instante de cada aquisição e é perpendicular à direção da visada;

$B_{\parallel}$ - Base paralela. Corresponde à distância entre as duas posições do sensor, na direção da linha de vista do satélite.

Na [Figura 25 do lado direito](#), os elementos representados são:

$\theta_s$ - Ângulo *squint*. Indica a direção de pontaria da antena e é medido relativamente ao eixo perpendicular à direção do voo. É o ângulo de reticulação;

$v_{sat}$ - Velocidade do satélite;

$\theta$ - Ângulo de incidência.

A fase interferométrica esperada, medida relativamente a uma superfície de referência terrestre como por exemplo o elipsóide WGS84, é designada por fase de referência ([Hanssen, 2001](#)) e é dada pela expressão:

$$\varphi_{ref} = \frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta^o - \alpha) \quad (3.5)$$

Se as distâncias  $R_1$  e  $R_2$ , são muito grandes relativamente à base espacial  $B$ , pode assumir-se que a direção dos raios é aproximadamente paralela. Neste pressuposto, da base espacial  $B$  resultam a base paralela  $B_{\parallel}$  e a base perpendicular,  $B_{\perp}$ :

$$B_{\parallel} = B \sin(\theta - \alpha) \quad (3.6)$$

$$B_{\perp} = B \cos(\theta - \alpha) \quad (3.7)$$

Assim, a diferença de distâncias  $R_1$  e  $R_2$  entre o sensor e o alvo no terreno, nas duas posições do sensor, dada por  $\Delta_R$ , ([Figuras 25](#)) pode relacionar-se com a base paralela,  $B_{\parallel}$ , sendo  $\Delta_R \cong B_{\parallel}$  quando se considera o ângulo de incidência para o ponto de altitude  $h$ .

Se for considerado o terreno com altitude  $h$ , relativamente à superfície de referência, a componente da fase que tem interesse para o estudo da deformação do terreno é dada por:

$$\varphi_{defo} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R \quad (3.8)$$

Mas, a fase interferométrica total  $\Delta\varphi$ , que resulta num interferograma, é a soma de vários sinais ou componentes (Equação 3.9).

$$\Delta\varphi = \varphi_{B_{\perp}} + \varphi_{topo} + \varphi_{defo} + \varphi_{atm} + \varphi_{ruído} \quad (3.9)$$

em que,  $\varphi_{B_{\perp}}$ , representa a componente da fase devido à posição orbital, isto é a diferença de fase resultante da variação da posição do sensor no instante de cada aquisição;  $\varphi_{topo}$ , representa a componente da fase devido à topografia do terreno;  $\varphi_{defo}$ , representa a componente de deformação no terreno,  $\varphi_{atm}$ , representa a componente da influência da atmosfera no momento da aquisição e  $\varphi_{ruído}$ , refere o ruído devido a outras perturbações do sinal, como por exemplo variação das propriedades de refletividade nos pixéisl.

A fase interferométrica,  $\Delta\varphi$ , permite medir distâncias entre a posição do sensor e o terreno, sendo necessário, no entanto, efetuar correções às componentes  $\varphi_{B_{\perp}}$  e  $\varphi_{topo}$ , importantes na definição da topografia, e tratar as componentes  $\varphi_{atm}$  e  $\varphi_{ruído}$ , como ruído. (Zebker and Goldstein, 1986).

A componente da fase,  $\varphi_{B_{\perp}}$  pode ser corrigida com informação adicional de órbitas precisas ou usando um modelo elipsoidal da superfície da Terra.

A componente relativa à imprecisão da fase topográfica  $\varphi_{topo}$  para o terreno com altitude  $h$  é dada por:

$$\varphi_{topo} \approx \frac{-4\pi B_{\perp}}{\lambda R_2 \sin \theta} h \quad (3.10)$$

Sendo esta componente da fase, diretamente proporcional à altitude do terreno, a sua correção pode ser efetuada usando um Modelo Digital do terreno, MDT, como por exemplo o SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). (Farr *et al.*, 2007).

Para um ciclo inteiro de fase a altitude é dada por:

$$h_{2\pi} = 2\pi \frac{\lambda R_1 \sin \theta^o}{-4\pi B_{\perp}^o} = - \frac{\lambda R_1 \sin \theta^o}{2B_{\perp}^o} \quad (3.11)$$

Verifica-se pelas equações acima que a descorrelação geométrica além de depender da base espacial, depende também da topografia local da área observada.

O que significa que para os satélites da banda C, com ( $\lambda \sim 5,6\text{cm}$  e  $\theta \sim 23^\circ$ ) e com 100m de linha de base perpendicular a ambiguidade da altura é cerca de 100m. Se a linha de base passar para o dobro a ambiguidade na altitude é metade, 50m.

Nas técnicas InSAR as imagens são adquiridas de diferentes ângulos de incidência devido à linha de base perpendicular. A mudança do ângulo de incidência devido à base perpendicular leva a um deslocamento relativo das duas imagens SAR por causa do intervalo do espectro eletromagnético. Apenas a parte de espectro comum a ambas as imagens é útil para gerar um interferograma. Esse intervalo espectral explica o conceito de linha de base crítica. Se aumenta a linha de base perpendicular entre duas ou mais aquisições, o intervalo espectral também aumenta, e pode aumentar de tal forma que não haja bandas de frequência comuns nas aquisições, sendo nesse caso perdida a informação interferométrica.

A base espacial crítica é obtida como uma função da resolução em alcance ( $R_r$ ) e da inclinação do terreno  $i$  e é dada pela [Equação 3.12](#):

$$B_{critica} = \frac{\lambda R \tan(\theta - i)}{2R_r} \quad (3.12)$$

Em relação à base temporal, esta depende da tipologia do terreno e da grandeza do movimento que se pretende observar. Alguns modelos de ajustamento requerem informação à priori da área de interesse. Se não for possível obter informação à priori, deve ser estimado o parâmetro da coerência diretamente, para se obter um indicador da descorrelação temporal. (Perissin *and* Wang, 2011). Mudanças no meio ambiente



causadas por atividades humanas podem ser um bom exemplo do fator de decorrelação temporal, que não pode ser modelado quantitativamente devido à sua natureza imprevisível e discreta (Sousa, 2009).

Após a aquisição das duas imagens, multiplicando a primeira pelo complexo conjugado da segunda, é calculada a diferença de fase  $\Delta\varphi$  entre os seus pixéis, dando origem a uma imagem de fase interferométrica que é um interferograma  $I$  (Figura 26).

$$I = M.S^* = A_M e^{j\varphi_M} A_S e^{-j\varphi_S} = A_{MS} e^{j\Delta\varphi} \quad (3.13)$$

Na Equação 3.13, \* representa o termo complexo conjugado,  $A_M$  e  $A_S$  são a amplitude da imagem *master* e *slave* respetivamente e  $\varphi_M$  e  $\varphi_S$  são as fases. A amplitude interferométrica  $A_{MS}$ , é igual a  $A_M A_S$  e a fase interferométrica  $\Delta\varphi$  representa a diferença de fase entre as duas imagens. Esta operação é feita *pixel a pixel*.

A Figura 26 mostra um exemplo de interferograma relativo ao sismo de Aquila, Itália, ocorrido a 6 de abril de 2009.

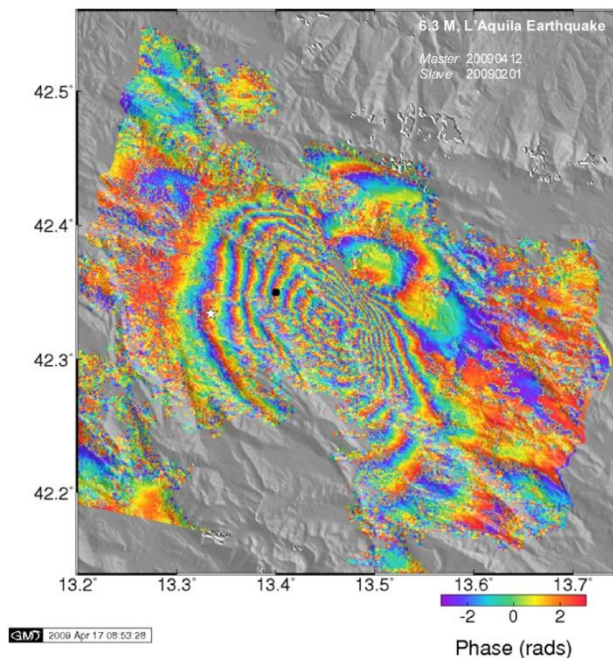


Figura 26 - Interferograma do sismo de Aquila, Itália. Fonte: Adaptado de Sousa, 2009; Doris (TUDelft).

No Interferograma da [Figura 26](#), podem observar-se deformações significativas provocadas pelo evento sísmico. As interferências coloridas, designadas por franjas, representam variações de fase que correspondem ao movimento do solo em relação ao satélite e cada franja (entre o vermelho e o azul) corresponde a cerca de 28 mm de deformação na direção da linha de vista do satélite (LOS). Uma franja interferométrica corresponde aproximadamente a metade do comprimento de onda do sensor.

As franjas representam ciclos de fase enrolados que aparecem devido à natureza cíclica das fases observadas. Um procedimento para desenrolamento das fases é integrar o número de franjas entre dois pontos pertencentes ao interferograma e estimar a variação do intervalo relativo entre eles. ([Hooper et al.; 2011](#)).

Um indicador da descorrelação num interferograma é a coerência, que é dada pelo coeficiente de correlação cruzado normalizado entre duas imagens SAR,  $M$  e  $S$ .

$$\gamma^{M,S} = \frac{E\{MS^*\}}{\sqrt{E\{|M|^2\}E\{|S|^2\}}} \quad (3.14)$$

Onde  $*$  é o operador complexo conjugado e  $E\{\cdot\}$  é o operador da média.

Os pixéis de uma imagem com coerência próxima de 1 representam zonas de baixa descorrelação temporal, que significa menor variação nas características do terreno entre as duas imagens e melhor qualidade do interferograma. Pixéis na imagem com valor de coerência baixa, indicam elevada descorrelação. O número obtido por  $|\gamma|$  indica o grau de descorrelação do sinal.

Como uma quantidade estatística a coerência interferométrica só pode ser estimada. O estimador do coeficiente de correlação complexo correspondente é dado por  $\hat{\gamma}$ . ([Equação 3.15](#)).

$$\hat{\gamma} = \frac{\sum |M||S|e^{i\varphi}}{\sqrt{\sum |M|^2 \sum |S|^2}} \quad (3.15)$$

A descorrelação temporal é a principal causa da perda de coerência na interferometria de passagem repetida devido a ocorrerem variações nas características refletoras do terreno. Mas a perda de coerência pode ser causada por outros efeitos, como por exemplo, o ruído termal, descorrelação geométrica, variação na frequência do Centróide

Doppler, descorrelação induzida no processamento (Hanssen, 2001; Ferretti *et al.*, 2001; Franceschetti *and* Lanari, 1999).

A Equação 3.16, apresenta os parâmetros da descorrelação total,  $\gamma_{total}$ .

$$\gamma_{total} = \gamma_{termal} \cdot \gamma_{temp.} \cdot \gamma_{geom.} \cdot \gamma_{FCentroidesDoppler} \cdot \gamma_{Proces.} \quad (3.16)$$

O termo  $\gamma_{termal}$  é a componente do ruído do sinal que tem origem no equipamento espacial SAR, dependendo do mecanismo de aquisição da imagem e pode variar em valor absoluto entre 0 e 1. A razão sinal/ruído (SNR), que depende inteiramente do sensor radar (Bamler *and* Just, 1993, Zebker *and* Villassenor 1992) é dada por:

$$SNR = \frac{\text{Energia do sinal}}{\text{Energia do Ruído}} \quad (3.17)$$

Esta quantidade (SNR), quando combinada com o comprimento de onda permite definir a sensibilidade do sensor no registo das variações topográficas (Hanssen, 2001)

A correlação termal é dada por:

$$\gamma_{termal} = \frac{SNR}{1-SNR} \quad (3.18)$$

O termo  $\gamma_{geom.}$ , corresponde à descorrelação geométrica devida a variações no comprimento da linha de base espacial, que leva a variações no ângulo de incidência. Existem ainda erros que ocorrem durante a etapa do processamento. O termo  $\gamma_{Proces.}$  representa a descorrelação devida a possíveis imprecisões no alinhamento (co-registo) das duas imagens durante o processamento ou interpolação das imagens *master* e *slave*, podendo ser corrigidos com a aplicação de filtros.

Na análise da coerência de um interferograma, a dispersão da fase é medida na imagem *slave* em relação à imagem *master*.

O número total de Interferogramas N, que é possível formar, depende do número de imagens adquiridas. Sendo necessário adquirir N+1 imagens para obter N interferogramas. A formação dos vários interferogramas entre cada duas imagens, é efetuada com base na imagem que maximiza a correlação da soma de todos os

interferogramas. Essa imagem é designada por *master* e cada uma das restantes por *slave*.

Na equação da diferença de fase,  $\Delta\varphi$ , definida na [Equação 3.9](#) a fase está enrolada, significando que os valores absolutos da fase não são conhecidos. Valor absoluto é o conhecimento do módulo de  $2\pi$  da fase.

O valor da fase desenrolada  $\phi$  ([Equação 3.19](#)) é obtida a partir da fase enrolada  $\Delta\varphi$  quando são resolvidas as ambiguidades da fase, obtendo-se assim o número inteiro de ciclos da fase,  $N$ .

$$\phi = \Delta\varphi + 2\pi N \text{ com } \varphi \in [-\pi, \pi]; \quad \phi \in \mathbb{R}; \quad e \quad N \in \mathbb{Z} \quad (3.19)$$

O desenrolamento da fase, consiste em recuperar dados da fase não ambíguos de um conjunto bidimensional de valores, que são conhecidos apenas no módulo  $2\pi$ . O procedimento é efetuado com recurso a algoritmos, entre eles o (SNAPHU, Statistical-cost Network Algorithm for *Phase Unwrapping*) proposto por [Chen and Zebker, 2001](#). É um Algoritmo de Fluxo de Rede para Desenrolamento de Fases, que apresenta o desenrolamento da fase como um problema de estimativa da probabilidade máxima a *posteriori* (MAP), cujo objetivo é calcular a solução desenrolada mais provável com as quantidades observáveis de entrada. Então, o algoritmo inclui três modelos de dados estatísticos internos, para os dados de entrada relativos à topografia, deformação e outros dados genéricos. De seguida é utilizado um procedimento de otimização iterativo para obter o valor das fases desenroladas. ([ESA, 2018](#)).

Na interferometria SAR, as imagens *master* e *slave* podem ser obtidas por sensores de passagem simples ou de passagem repetida. Na passagem simples, com duas antenas, é possível a aquisição de duas imagens em simultâneo com linha de base perpendicular,  $B_{\perp}$ , constante. Na passagem repetida embora a linha de base perpendicular seja variável, é possível graças às características das órbitas dos satélites, registar regularmente a superfície da Terra com um determinado intervalo de tempo, (normalmente fixo) correspondente à passagem dos satélites. Considerando, a “pegada” da antena (lugar na Terra iluminado por um único pulso) ([Figura 27](#)), registada num único *pixel*, o sensor adquire uma primeira imagem SAR para a posição do satélite, no instante  $T_1$ , e mede a fase correspondente,  $\varphi_{PT_1}$ , o mesmo acontece para o instante  $T_2$ . medindo a fase correspondente  $\varphi_{PT_2}$ .

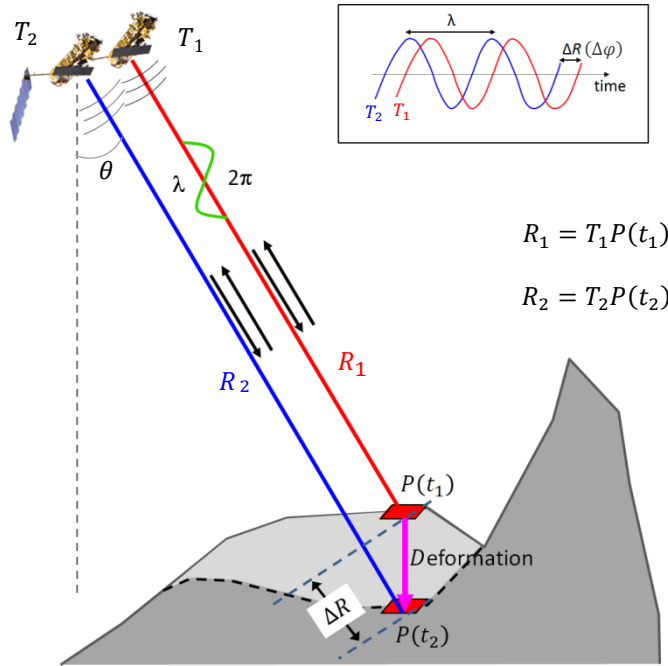


Figura 27 - Relação entre o deslocamento no terreno  $\Delta R$  e o deslocamento da fase do sinal.  
 Fonte: Adaptado de Sousa *et al.*: 2013.

No canto superior direito da [Figura 27](#), a diferença de fase  $\Delta\phi$  quantifica o atraso entre dois sinais eletromagnéticos. Como as micro-ondas são caracterizadas por comprimentos de onda entre (1cm e 1m), a fase permite obter deslocamentos milimétricos da superfície do terreno, desde que seja usado um MDT adequado para estimar a componente da fase relativa à topografia. Por exemplo para os parâmetros do ERS-1, com um MDT de 30m de precisão e uma linha de base perpendicular de 100m, obtém-se 1cm de precisão no cálculo do deslocamento.

Se no intervalo de tempo entre aquisições da imagem, o ponto  $P$  sofrer um deslocamento no terreno, então a distância entre o sensor e o ponto  $P$  altera-se, alterando também o valor da fase registado pelo sensor SAR. A fase interferométrica é influenciada pelo deslocamento do terreno ocorrido entre os dois tempos de aquisição. A [Figura 27](#), apresenta a relação entre o movimento do ponto  $P$ , no solo, e o correspondente deslocamento na fase, entre dois sinais SAR adquiridos em épocas diferentes. Com a técnica InSAR é possível analisar a fase interferométrica medida,  $\Delta\phi$ , entre as duas aquisições  $\phi_{T_2}$  e  $\phi_{T_1}$ . A diferença de fase interferométrica  $\Delta\phi$  pode ser obtida por:

$$\Delta\phi = \phi_{T_2} - \phi_{T_1} = \frac{R_2 - R_1}{\frac{\lambda}{4\pi}} + \phi_{scattT_2} - \phi_{scattT_1} \tag{3.20}$$

As fórmulas a seguir mostram a origem das componentes  $\varphi_{topo}$  e  $\varphi_{defo}$ , da fase interferométrica já referidas acima.

Substituindo  $R_1$  e  $R_2$  na [Equação 3.20](#) por  $T_1P(t1)$  e  $T_2P(t2)$  obtém-se:

$$\Delta\varphi = \varphi_{T_2} - \varphi_{T_1} = \frac{T_2P(t2) - T_1P(t1)}{\frac{\lambda}{4\pi}} + \varphi_{scattT_2} - \varphi_{scattT_1} \quad (3.21)$$

Onde  $R_i$  representa a distância do sensor ao alvo na época  $i$  e  $\varphi_{scatt}$ , representa a diferença de fase gerada durante a interação do feixe de micro-ondas com o ponto  $P$ , nos instantes  $T_1$  e  $T_2$ ,  $\lambda$  é o comprimento de onda do radar e  $\theta$  o ângulo de incidência.

Adicionando e subtraindo, o termo  $T_2P(t_1)/(\frac{\lambda}{4\pi})$ , obtém-se:

$$\Delta\varphi = \varphi_{T_2} - \varphi_{T_1} = \frac{T_2P(t_2) - T_2P(t_1)}{\frac{\lambda}{4\pi}} + \frac{T_2P(t_1) - T_1P(t_1)}{\frac{\lambda}{4\pi}} + \varphi_{scattT_2} - \varphi_{scattT_1} \quad (3.22)$$

Em que o primeiro termo da fase, na [Equação 3.22](#), é proporcional à altura do ponto  $P$ , e é designado por componente topográfica da fase ( $\varphi_{topo}$ ). Esta componente mostra que os interferogramas são sensíveis ao relevo topográfico da área observada.

O segundo termo da fase na [Equação 3.22](#) refere-se à componente do deslocamento  $\varphi_{defo}$ . Esta componente do deslocamento é obtida segundo a direção da linha de vista do sensor,  $\Delta R$  ([Figura 27](#)).

Para aplicações que visam a deteção de deformações da superfície terrestre, o termo  $\varphi_{defo}$  é o único com interesse, pelo que todos os outros deverão ser tratados como ruído e, por isso, devem ser estimados.

Na ausência dos outros termos, nomeadamente a componente topográfica, a componente relativa à variação da posição do sensor na órbita e a componente relativa à perturbação da atmosfera, a fase interferométrica pode ser diretamente relacionada com a variação da distância,  $\Delta R$ , percorrida pelo sinal na direção em que este é transmitido, ou seja, na direção da linha de vista do sensor (LOS, *Line Of Sight*).

A fase interferométrica também é designada por fase geométrica devido a mudanças no ângulo de vista do sensor. Na [Equação 3.23](#) é apresentada a relação entre a fase

interferométrica  $\Delta\varphi$  e o deslocamento  $\Delta R$  na direção LOS em que o sinal menos (-) resulta da definição da fase medida no sensor, que é relativa ao atraso da fase (Hooper *et al* 2007).

$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R \quad (3.23)$$

O facto de as imagens serem adquiridas com geometrias ligeiramente distintas produz um efeito de paralaxe, sobretudo se a área observada for acidentada. Para estimar este efeito e resolver este problema, pode recorrer-se a um Modelo Digital de Terreno (MDT) da área de interesse, por exemplo, o obtido pela Missão Topográfica Radar *Shuttle* (SRTM- *Shuttle Radar Topography Mission*) (Farr *et al.*, 2007), ou a outro interferograma (Gabriel *et al.*, 1989) da mesma área.

Assume-se que a componente  $\varphi_{topo}$  pode ser estimada usando órbitas precisas, um modelo elipsoidal da Terra e um MDT.

A necessidade de utilização de um MDT para estimar a componente  $\varphi_{topo}$  levou a que a produção de Modelos Digitais do Terreno fosse a primeira aplicação desenvolvida com Interferometria SAR, sobre a superfície terrestre.

A técnica que permite estimar os efeitos provocados pelo desvio orbital e pela topografia do terreno é chamada de Interferometria Diferencial ou (DInSAR, Differential SAR Interferometry). A Equação 3.24 representa a equação simplificada da fase observada para a técnica DInSAR, depois das correções da topografia e da diferença de posição orbital.

$$D\Delta\varphi = W\{\varphi_{defo} + \varphi_{atm} + \varphi_{topo\_res} + \varphi_{orb\_res} + \varphi_N\} \quad (3.24)$$

$W\{\cdot\}$ - Operador do desenrolamento da fase.

Onde  $\varphi_{topo\_res}$  representa a componente do erro topográfico residual,  $\varphi_{atm}$  a diferença no atraso da fase devido à diferença de comportamento da atmosfera entre as épocas de aquisição. O termo  $\varphi_{orb\_res}$ , representa a componente residual da fase sujeita aos erros orbitais em cada imagem e  $\varphi_N$  indica o ruído da fase.

A variação na distribuição do vapor de água presente na atmosfera provoca um atraso nos sinais radar, influenciando a fase interferométrica. Portanto a precisão milimétrica

esperada nas medidas do deslocamento passa a uma precisão na ordem dos centímetros se não for corrigido o efeito da variação do vapor de água, enquanto que, a precisão métrica esperada na estimativa da altitude poderá passar rapidamente a dezenas de metros.

A fase interferométrica,  $\Delta\varphi$ , é muito sensível aos deslocamentos, no entanto, essa sensibilidade é maior na direção da linha de vista do sensor (LOS), o que significa que não é possível recriar a direção do deslocamento. Por exemplo, para um ângulo de incidência,  $\theta$ , de  $30^\circ$ , quase 90% da componente vertical do deslocamento pode ser detetada pelo sensor. Por outro lado, na componente horizontal, só 50% será detetada.

Esta elevada sensibilidade ao deslocamento na vertical, é o que torna a técnica InSAR uma poderosa ferramenta para detetar deformações verticais no solo.

### 3.4 Limitações da técnica InSAR convencional

A Interferometria SAR Diferencial é uma técnica muito promissora, no entanto pode ser influenciada por diversos fatores. Em primeiro lugar, os interferogramas são afetados pela decorrelação temporal e/ou espacial (Hanssen, 2001). Em segundo lugar, a fase interferométrica está enrolada, isto é, apresenta valores entre  $[-\pi, +\pi]$  podendo ser muito difícil (até impossível em alguns casos) de desenrolar corretamente de forma a encontrar o seu valor absoluto, usando um único interferograma (Ghiglia and Pritt, 1998). Finalmente, mesmo que os problemas referidos sejam solucionados, podem ocorrer ainda outras complicações devido aos efeitos da variação do comportamento atmosfera

A qualidade com que as deformações são estimadas, pode ser aferida através de um fator de correlação (Zebker and Villasenor, 1992), e depende da natureza da superfície em estudo. Alterações das condições refletoras ao longo do tempo, designadas por decorrelação temporal, provocadas pela vegetação ou pela existência de neve em alguns períodos, por exemplo, ou outros fenómenos, poderão tornar a fase totalmente decorrelacionada, ou seja, sem possibilidade de se estimar a deformação. Por estas razões, a maioria dos estudos que recorrem à técnica InSAR convencional, incidem sobre regiões secas ou com pouca cobertura florestal.

A Figura 28 ilustra a contribuição das linhas de base temporal e espacial para a coerência dos interferogramas.



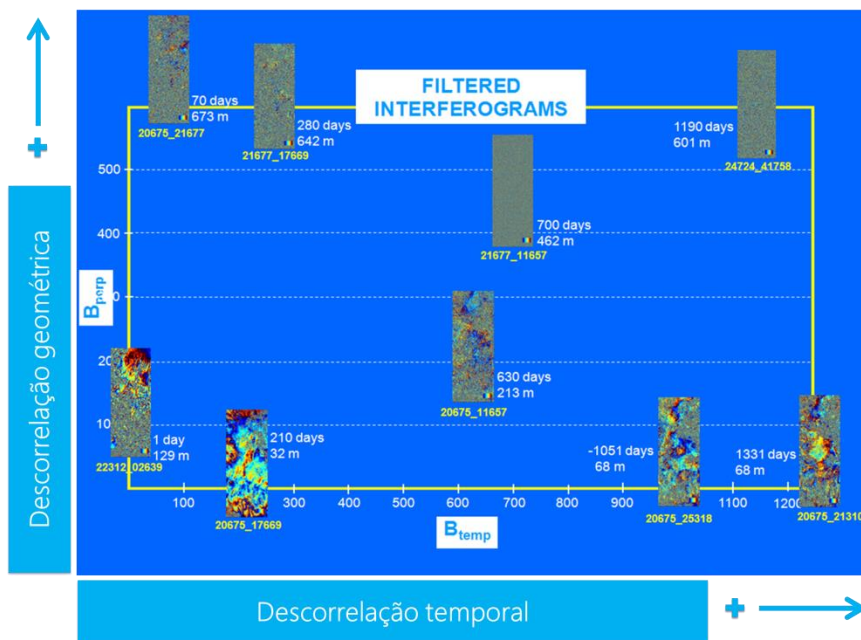


Figura 28 - Contribuição das linhas de base temporal e espacial na criação de interferogramas.

O número de interferogramas que podem ser utilizados é condicionado pelos efeitos da descorrelação temporal e da descorrelação espacial, o que, na prática, se traduz por uma diminuição efetiva da resolução temporal, ou seja, a frequência de aquisição das imagens. A contribuição atmosférica, vulgarmente designada por APS (*Atmospheric Phase Screen*), componente ( $\varphi_{atm}$ ) nas Equações 3.9 e 3.24 caracteriza o atraso que os sinais sofrem ao atravessarem a atmosfera. Esse atraso introduz uma variação de fase na imagem (Hanssen, 2001). A maior contribuição para a perturbação atmosférica deve-se à distribuição do vapor de água, na camada da troposfera. Essa camada contém cerca de 90% de ar seco e 10% de vapor de água, mas enquanto a composição do ar seco (oxigénio, azoto, dióxido de carbono e gases raros) mantém a percentagem relativa dos seus constituintes, a quantidade de vapor de água varia rapidamente de local para local, podendo variar com a topografia, com o facto da zona em estudo ser próxima de oceanos ou não, etc. (Onn and Zebker, 2006) deixando de existir acima de 10km de altitude aproximadamente.

A troposfera, para frequências abaixo de 30 Ghz, pode ser considerada um meio não dispersivo, ou seja, a sua refratividade não é uma função da frequência, dependendo apenas das características do ar.

Como as imagens são adquiridas com intervalos temporais de vários dias (dependendo do sensor, esta separação temporal pode ir de poucos dias até mais de um mês), pelo

que o termo  $\varphi_{atm}$ , nas duas imagens usadas para formar o interferograma, é temporalmente descorrelacionado.

A degradação da qualidade da fase interferométrica, também ocorre por causa de variações na geometria de aquisição da imagem devido a variações no ângulo de observação e no ângulo *squint* (ângulo de reticulação). O ângulo *squint* é responsável por provocar mudanças nas frequências *Doppler* ( $\Delta F_{DC}$ , diferenças na Frequência *Doppler Centroide*), levando a descorrelações (Zebker e Villasenor, 1992), que se tornam mais significativas com o aumento da componente perpendicular  $B_{\perp}$  da linha de base espacial.

A diferença no ângulo de *squint* entre as passagens do sensor introduz um termo de erro visto que, a focagem azimutal SAR pressupõe que o centro de fase do *pixel* está localizado no centro do respetivo *pixel*. A fase adicional, introduzida se o centro de fase se desvia do centro do *pixel* na direção do azimute por uma quantidade  $\eta$ , anula-se quando o ângulo *squint* é o mesmo para a aquisição da imagem *master* e da *slave*. Quando os ângulos *squint* diferem, é introduzido um termo  $\Delta\varphi_v$ , que representa o erro na fase interferométrica (Agram, 2010).

$$\Delta\varphi_v = \frac{2\pi}{v} \Delta F_{DC} \eta \quad (3.25)$$

Onde  $v$  é a velocidade do sensor.

Se a  $\Delta F_{DC}$  tiver um valor pequeno espera-se que  $\Delta\varphi_v$  tenha uma variação menor do que  $0,2 \text{ rad}$ . A  $\Delta F_{DC}$  pode considerar-se correlacionada no tempo. Como a deformação, também está correlacionada no tempo, então existe a possibilidade de que a fase relativa à deformação, que normalmente é muito maior, inclua de algum modo a estimativa de  $\Delta\varphi_v$  (Hooper et al. 2007).

A frequência *Doppler Centroide*  $f_{DC}$  (Equação 3.26) é o deslocamento *Doppler* do eco vindo de um alvo pontual para o centro do feixe de irradiação da antena e é um parâmetro importante nos dados de entrada para processamento de imagens SAR. (Cuenca, 2012)

$$f_{DC} = \frac{2v_{sat} \sin \theta_s \sin \theta}{\lambda} \quad (3.26)$$

Os algoritmos *Doppler Centróide* (DC) estimam a frequência central do espectro *Doppler* dos dados relacionados com o centro do feixe de irradiação da antena na direção de azimute e localizam a energia do sinal na direção de azimute no domínio da frequência *Doppler*, de modo que toda a energia do sinal enviada no espectro *Doppler* possa ser corretamente capturada pelo filtro de compressão em azimute, proporcionando a melhor relação sinal-ruído e a melhor resolução em azimute. O seu valor varia de forma lenta e gradual em função da distância em alcance, numa visada.

Outros erros resultantes da posição da plataforma espacial, afetam a estimativa da fase relativa à componente da base espacial e manifestam-se como “rampas” de fase nos interferogramas. A posição da plataforma deverá ser conhecida com precisão submétrica, para determinação precisa das linhas de base e da correção da fase topográfica.

As “rampas” de fase podem ser corrigidas calculando-se a taxa de franjas em áreas sem deformação esperada e aplicando depois essa correção em toda a imagem (Agram, 2010).

Os erros residuais que aparecem no momento de correção da “rampa” de fase não se conseguem distinguir do efeito causado pela atmosfera na fase.

Como solução, para resolver algumas das limitações mencionadas com DInSAR, incluindo a contribuição do efeito atmosférico, foram desenvolvidos métodos que combinam vários interferogramas, surgindo, assim, as técnicas baseadas em séries temporais de imagens SAR, MT-InSAR. A precisão do sinal estimado para a deformação melhora com o aumento do número de interferogramas, por isso deve ser utilizado o maior número de imagens possível.

No entanto, deve ser destacado que a técnica DInSAR foi aplicada com sucesso, proporcionando resultados extraordinários, para estimar deformações provocadas por fenómenos vulcânicos (Amelung *et al.*, 2000; Pritchard *and* Simons, 2002), co-sísmicos (Zebker *et al.*, 1994; Simons *et al.*, 2002), pós-sísmicos (Pollitz *et al.*, 2001; Jacobs *et al.*, 2002) e deformações induzidas por exploração do subsolo (Sousa *et al.*, 2010; Amelung *et al.*, 1999).

### 3.5 Interferometria SAR Multi-Temporal (MT-InSAR)

As técnicas MT-InSAR representam uma extensão da técnica InSAR convencional e foram desenvolvidas no final da década de 1990 no Politécnico de Milão, com o objetivo de ultrapassar as limitações impostas pelas decorrelações temporal e espacial e pela perturbação atmosférica. Estas técnicas envolvem o processamento simultâneo de múltiplas imagens SAR, adquiridas sobre a mesma área, permitindo reduzir e/ou mitigar os erros provocados pelos termos decorrelacionados e, assim, reduzir os erros associados ao cálculo da deformação.

Atualmente, várias abordagens MT-InSAR são possíveis, no entanto, todas exploram conjuntos de imagens SAR adquiridas sobre a mesma zona aplicando metodologia de processamento e de análise de dados apropriadas para separar a componente da fase relativa ao deslocamento,  $\varphi_{defo}$ , das outras componentes da fase indicadas na [Equação 3.9](#). Esta nova abordagem no processamento foca-se na identificação de pixels na imagem SAR, caracterizados por valores baixos de ruído,  $\varphi_N$ . A obtenção desses valores está relacionada com dois tipos de difusores no terreno: aqueles em que a resposta ao radar é dominada por um objeto com reflexão forte, permanecendo constante ao longo do tempo, Difusor Persistente (PS, *Persistent Scatterer*); e aqueles onde a resposta ao radar, embora também constante ao longo do tempo, apresenta pequenas diferenças na reflexão entre os objetos, Difusores Distribuídos (DS, *Distributed Scatterers*) ou (SDFP, *Slowly Decorrelating Filtered Phase*), quando é referida a técnica de processamento dos elementos difusores DS. Esta designação é usada no *software* StaMPS/MTI (Stanford Method for PS/Multi-Temporal InSAR) ([Hooper et. al; 2008](#)), um dos mais utilizados para o processamento MT-InSAR. O StaMPS/MTI foi aplicado neste trabalho e é descrito mais em detalhe no Capítulo 4.

Atualmente, os algoritmos MT-InSAR são classificados em duas categorias *Persistent Scatterer Interferometry* (PSI) e *Small BASeline Subset* (SBAS). Cada um destes métodos foi delineado para detetar mecanismos de reflexão distintos. O sinal refletido por cada elemento de resolução no solo, depende da distribuição e da refletividade do centro desse elemento. Como, neste caso, utilizamos fontes monocromáticas, o sinal refletido corresponde à soma coerente das várias contribuições recebidas pelo sensor. No caso de o elemento de resolução ser composto por um difusor dominante, o sinal recebido mantém uma grande estabilidade temporal. Nestes casos, todos os interferogramas poderão ser utilizados na determinação da deformação, que poderá ser obtida sem erros. Contudo, na realidade, estes casos, considerados ideais raramente aparecem ([Figura 29a](#)).

Se os vários difusores que ocupam um elemento de resolução tiverem reflexões comparáveis, em termos de intensidade (Figura 29c), então a fase desses elementos varia aleatoriamente no intervalo  $[-\pi, +\pi]$ . Nestes casos, é possível melhorar a relação sinal-ruído fazendo a média do sinal interferométrico dos elementos de resolução adjacentes. Este é, precisamente, o princípio dos métodos SBAS (Berardino *et al.*, 2002).

Por outro lado, se houver um difusor dominante no elemento de resolução (Figura 29b), a interferência provocada por outros elementos é mínima, pelo que a deformação pode ser determinada através da fase interferométrica deste difusor dominante. Estes elementos de resolução, pixéis, estão na base dos métodos PSI (Ferretti *et al.*, 2001). Estes métodos aplicam técnicas estatísticas para identificar pixéis com difusores individuais dominantes, que são menos afetados pelas decorrelações, pelo que a sua fase interferométrica poderá ser usada para estimar a deformação da série temporal.

Mas, enquanto a estabilidade da fase só pode ser avaliada depois da estimativa e remoção das diferentes contribuições da fase (APS, erros de MDT, deformação do terreno, indeterminação da órbita, etc.) é possível, analisar as séries temporais de amplitude na área de interesse procurando a dispersão da amplitude  $D_A$  em alvos pouco afetados por decorrelação espacial e temporal. Os pixéis que exibem uma sequência muito “estável” de valores de amplitude (apesar de poderem ter uma elevada variação temporal e geométrica da linha de base) devem ser selecionados como candidatos a Difusores PersistentesPS, (*PSC Persistent Scatterer Candidate*).

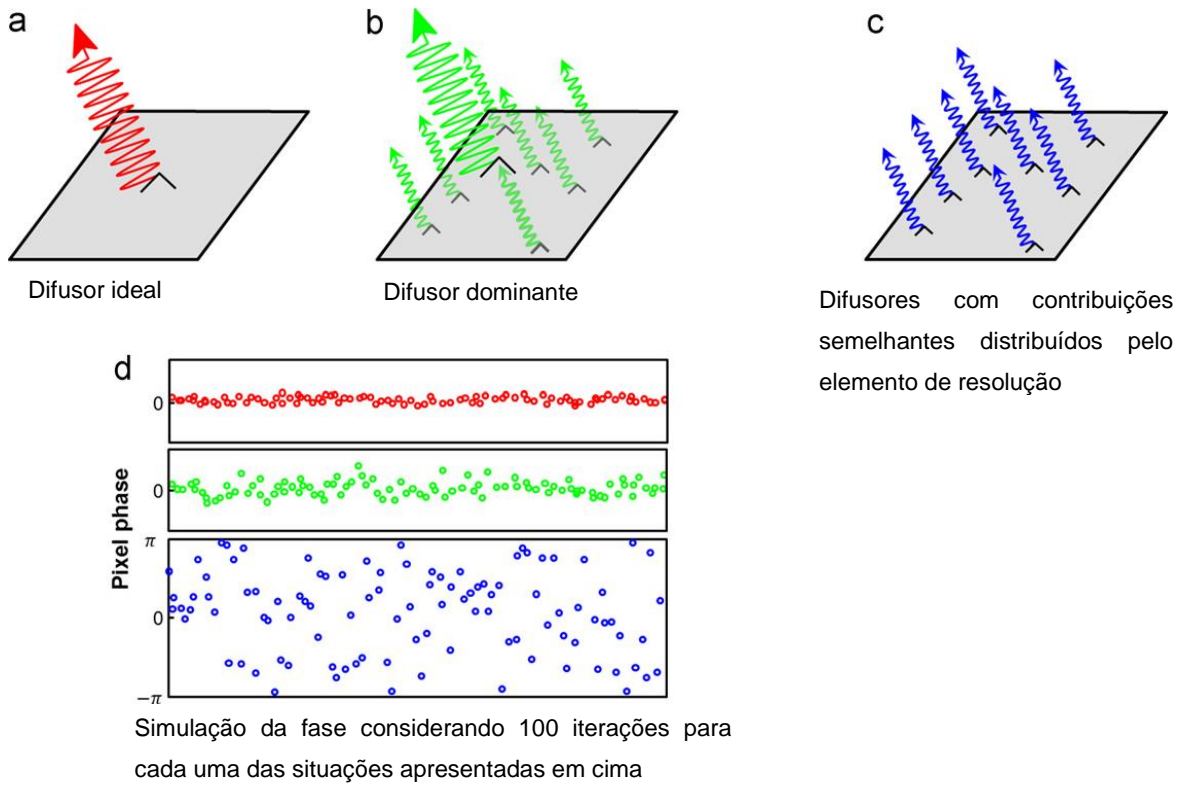


Figura 29 - Representação dos mecanismos de reflexão que contribuem para a formação de um pixel da imagem SAR.  
 Fonte: Adaptado de Hooper 2006

Assim, as técnicas PSI, aplicadas, a uma série temporal de imagens InSAR, começaram numa fase inicial por analisar pixéis com elevada estabilidade da amplitude, para seleção dos candidatos a PS. (Ferretti, 2000) O índice de dispersão de amplitude é uma medida de estabilidade da fase, pelo menos para valores elevados da razão sinal/ruído.

O PSC pode então ser selecionado calculando o índice de dispersão dos valores de amplitude relativos a cada *pixel* na área de interesse. Como critério de seleção são considerados apenas os alvos que exibem valores abaixo de um determinado limite de dispersão,  $D_A < 0,25$  (Ferretti et al., 2001), o que pode significar que a relação sinal-ruído é próxima de 8 [dB].

Na Equação 3.9, (secção 3.3) que representa a fase interferométrica  $\Delta\varphi$ , os termos,  $\varphi_{defo}$ ,  $\varphi_{topo}$ , e  $\varphi_{atm}$  estão espacialmente correlacionados em distâncias curtas e podem ser estimados por meio de uma filtragem espacial de cada interferograma. Lyons e Sandwell (2003) mostraram que o ruído em observações de fase interferométrica pode ser significativamente reduzido pela ponderação das amplitudes dos pixéis por uma medida de sua estabilidade, antes do *multilooking* ou da filtragem adaptativa no domínio

complexo da imagem. Com base nesta ideia, a amplitude dos pixéis é avaliada pelo inverso da dispersão de amplitude (peso da amplitude) (Hooper, 2009).

No caso de regiões urbanas este é um bom critério de seleção de pixéis, pois como existe um elevado valor para a razão sinal-ruído a distribuição da amplitude aproxima-se da função da distribuição de Gauss. O desvio da fase de cada *pixel* pode então ser obtido pela dispersão da amplitude (Equação 3.27).

$$\sigma_{\varphi} \approx \sigma_n = \frac{\sigma_b}{\mu_b} = D_A \quad (3.27)$$

onde  $\mu_b$  e  $\sigma_b$  representam a média e o desvio padrão da amplitude do *pixel* SAR e  $\sigma_{\varphi}$  o valor do desvio da fase.

Em zonas de terreno natural podem existir pixéis com baixa razão sinal/ruído, mas com características da fase estáveis. Nesse caso, este não é o melhor critério para seleção de PS. (Agram, 2010)

O objetivo da seleção inicial de PSC é estimar a componente da fase referente à atmosfera na posição de cada *pixel* em todos os interferogramas.

Para cada PSC, as distintas contribuições das diferenças de fase (topografia, deformação e efeitos da atmosfera) são separadas analisando as suas características espaciais e temporais. Os efeitos da componente atmosférica da fase são então interpolados para cada imagem para determinar a concentração do vapor de água no momento da aquisição da imagem. Os pixéis PS finais são identificados por análise da dispersão dos resíduos da fase através da coerência. A precisão da medida depende da coerência e do desvio das bases temporal e espacial (Ferretti *et al.*, 2001; Perissin e Wang, 2011).

Os resíduos da fase são interpretados como termos de ruído  $\varphi_n$  para cada *pixel* e usados para calcular uma medida de coerência temporal  $\gamma_{temp,i}$  numa base *pixel-a-pixel* da seguinte forma:

$$\gamma_{temp,i} = \sum_{k=1}^N \left[ \frac{e^{j\varphi_{n,k,i}}}{N} \right] \quad (3.28)$$

Onde  $N$ , é o número total de interferogramas,  $i$  representa o *pixel* e  $k$  o interferograma. (Agram, 2010).

Depois da estimativa e remoção da APS, são calculados os erros do MDT.

Os parâmetros desconhecidos, altitude do alvo  $h_p$  e velocidade do alvo  $v_p$ , podem ser calculados maximizando o valor absoluto da coerência temporal  $\gamma_{temp,i}$ .

$$\Delta h_{p,p0}, \Delta v_{p,p0} = arg\{max(|\gamma_{temp,i}|)\} \quad (3.29)$$

Onde

$$\gamma_{temp,i} = \frac{1}{K} \sum_{(i,j)} e^{j(\Delta\varphi_p^{i,k} - \Delta\varphi_{H,P}^{i,k} - \Delta\varphi_{D,P}^{i,k})} \quad (3.30)$$

$K$ - é o número de pares de imagens  $i$  e  $k$ .

$\Delta\varphi_p^{i,k}$ - Componente da fase interferométrica corrigida dos erros de achatamento do terreno;

$\Delta\varphi_{H,P}^{i,k}$ - Componente da fase interferométrica dependente da altitude  $\Delta h_{p,p0}$ ;

$$\Delta\varphi_{H,p,p0}^{i,k} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{1}{R \sin \theta} \Delta h_{p,p0} B_n^{i,k} \quad (3.31)$$

$\Delta\varphi_{D,P}^{i,k}$  – Componente da fase interferométrica dependente da tendência da deformação  $\Delta v_{p,p0}$ ;

$$\Delta\varphi_{D,p,p0}^{i,k} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta v_{p,p0} B_t^{i,k} \quad (3.32)$$

Considerando que  $p_0$  é a posição do alvo na superfície de referência, a fase interferométrica do ponto  $p$  depende da localização do alvo assim como do seu deslocamento, perturbações atmosféricas e ruído.

$B_n^{i,k}$  e  $B_t^{i,k}$  representam a linha de base interferométrica perpendicular e a linha de base temporal, respetivamente. O comprimento de onda é  $\lambda$ , o ângulo de incidência  $\theta$  e  $R$  é a distância entre o sensor e o alvo.



A variância da estimativa da altitude e da tendência de deformação ( $\sigma_{\Delta h}^2$ ,  $\sigma_{\Delta v}^2$  respetivamente) dependem da dispersão da fase, do número de interferogramas e da decorrelação relativa ao comprimento das linhas de base perpendicular e temporal. (Perissin and Wang, 2011).

Pode, no entanto, acontecer que no período total da série temporal de imagens em análise, o valor da coerência dos pixels seja elevado apenas num determinado período intercalar. Nesse caso usa-se um subconjunto de imagens e aplica-se a técnica de Quasi Difusores Persistentes (QPS- InSAR, Quasi-Persistent Scatterer InSAR). Esta técnica usa alvos parcialmente coerentes para determinar a sua altitude e velocidade à superfície da terra.

Dos vários interferogramas possíveis que resultam da ligação de todas as imagens é maximizada a coerência espacial (coeficiente de correlação cruzada normalizado) para um determinado conjunto de difusores persistentes. Ou seja, para cada difusor é selecionado um subconjunto de interferogramas através da coerência espacial. (Perissin and Wang, 2011)

Depois da estimação e remoção da APS, calculam-se os erros do MDT e a velocidade do alvo numa base *pixel-a-pixel*: (Ferretti, et al., 2001)

Os parâmetros desconhecidos  $h$  e  $v$  são então estimados maximizando a coerência  $\gamma$  da fase de cada *pixel* na imagem. A precisão das estimativas depende da distribuição da linha de base espacial e temporal e da estabilidade da fase do alvo.

A seleção de PS por esta técnica QPS-InSAR, baseia-se no mesmo princípio da seleção de PS já referida e serve para adensar ainda mais a rede de PS já existente.

Pode concluir-se que todos os mecanismos de reflexão têm importância para o processamento interferométrico, dependendo do tipo de obra e da precisão pretendida. Para o controlo do deslocamento em estruturas, tem mais vantagem o critério do difusor dominante, pois é menos afetado pela decorrelação temporal e espacial.

## CAPÍTULO 4 - MÉTODOS DE PROCESSAMENTO INSAR

A importância que as técnicas InSAR têm vindo a adquirir como ferramenta de monitorização, também pode ser medida pela quantidade de programas informáticos disponíveis para análises DInSAR e MT-InSAR. Atualmente, existem muitos pacotes de *software* totalmente gratuitos (*freeware* ou *open-source*) e comerciais para processamento de imagens SAR.

A maioria destas ferramentas foi desenvolvida por instituições ligadas à investigação, responsáveis pelos desenvolvimentos verificados nos últimos anos. A evolução, metodológica e técnica, acompanhou e motivou o desenvolvimento de novos sensores, aumentando a disponibilidade deste tipo de dados.

No âmbito deste trabalho recorreu-se à aplicação de dois métodos: o StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) e o SARPROZ (SAR PROcessing tool by periZ).

A escolha do StaMPS foi natural, pois trata-se de um *software* que é disponibilizado gratuitamente para atividades de investigação existindo na FCUP experiência anterior na sua utilização (Sousa, 2009).

O SARPROZ, embora de utilização restrita, pode ser utilizado em atividades de investigação, também gratuitamente (Perissin, 2012), como aconteceu durante a evolução deste trabalho, tendo sido estabelecida ligação com o grupo de trabalho do SARPROZ no âmbito da realização do projeto de investigação RemotWatch -*Alert and Monitoring System for Physical Structures*, tornando possível a sua utilização.

Nas secções seguintes, apresenta-se uma breve descrição dos *software* utilizados, remetendo-se, os eventuais interessados em aprofundar os seus conhecimentos, para a leitura de trabalhos já publicados, como por exemplo (Hooper, 2004); (Hooper, 2008); (Hooper, 2012); (Perissin et al., 2011); (Sousa et al., 2011); (Sousa and Bastos, 2012).

#### 4.1. StaMPS/StaMPS-Multi Temporal InSAR

Uma das principais características do *software* StaMPS, é o facto de utilizar a informação da fase do sinal para seleccionar Difusores Persistentes (PS) no terreno em vez de utilizar a análise das características de amplitude, tal como referido em (Ferretti *et al.* 2001), (Colesanti *and* Wasowski 2006), (Kampes, 2006) e (Ketelaar, 2009). As características de fase revelam-se adequadas para encontrar alvos naturais que apresentam baixa amplitude da fase e uma estabilidade que não é identificada a partir da correlação espacial da fase quando se usam algoritmos do tipo PS baseados na amplitude para identificação de pixéis.

O método (StaMPS) foi inicialmente desenvolvido para aplicações em terrenos naturais (Hooper *et al.*, 2004), usando apenas o método PSI, sendo depois desenvolvida a técnica SDFP, baseada na seleção de pixéis DS. A técnica SDFP é semelhante ao método SBAS.

O StaMPS evoluiu para um *software* híbrido, passando para a versão StaMPS/MTI (StaMPS/Multi Temporal InSAR), o que significa que se baseia na identificação de pixéis PS e DS, mantendo-se, contudo, o mesmo objetivo do StaMPS original: calcular a deformação recorrendo à utilização de séries temporais de imagens SAR; estimar a velocidade de deformação sobre os pontos PS e DS analisados e o erro topográfico residual. Este erro representa a diferença entre a altitude verdadeira de um determinado ponto do terreno considerando a reflexão do seu centro de fase e a altitude obtida a partir do MDT para esse mesmo ponto. Este é um parâmetro fundamental para se obter boa precisão na georreferenciação.

Atualmente o método StaMPS/MTI, passou a integrar o método StaMPS original. Nos processamentos efetuados neste trabalho foi usada a versão StaMPS/MTI.

A estrutura do StaMPS/MTI baseia-se num conjunto de rotinas de filtragem espacial e temporal que permitem estimar individualmente cada uma das componentes da fase permitindo isolar a componente da fase relativa à deformação.

Os algoritmos para seleção de PS trabalham com séries temporais de interferogramas, todos formados em relação a uma única imagem *master*. A seleção inicial de pixéis PS pode ser feita usando vários critérios, sendo o mais comum a avaliação da dispersão de amplitude. Em última análise, é o nível de ruído da descorrelação que define se os pixéis são ou não pixéis PS. (Hooper *et al.*, 2012).

Há, então, essencialmente, duas abordagens para determinar o nível de ruído da decorrelação para cada um dos pixéis candidatos a PS. A primeira baseia-se na modelação da deformação temporal (Ferretti *et al.*, 2001; Adam *et al.*, 2003; Crosetto *et al.*, 2003; Lyons and Sandwell, 2003; Werner *et al.*, 2003; Kampes, 2005). O erro do sinal referente à componente atmosférica e à variação da posição nas órbitas é reduzido considerando a diferença de fase entre os candidatos a PS próximos. A contribuição da fase da deformação e da fase devida ao erro do MDT para o cálculo da diferença de fase dos PS vizinhos, diferenças-duplas, são modeladas para toda a série temporal, e os resíduos obtidos entre esse modelo e as diferenças-duplas de fases dos PS fornecem uma estimativa do nível de ruído. Depois é aplicado um ajustamento à rede de pontos para determinar o nível de ruído para cada candidato a PS.

O método das diferenças-duplas de fase foi desenvolvido para processamento GPS para resolver de forma rápida as ambiguidades, e adaptado para dados InSAR por Kampes, (2005).

A segunda abordagem para estimar o ruído da decorrelação depende da correlação espacial da maioria dos termos de fase (Hooper *et al.*, 2004; van der Kooij *et al.*, 2006). Esta segunda abordagem é a utilizada no StaMPS.

É aplicada filtragem espacial para estimar os termos da fase correlacionados espacialmente, incluindo a fase relativa à deformação, à atmosfera e a fase relativa à variação da posição orbital, para cada candidato a PS.

A fase dos termos correlacionados espacialmente é subtraída e a contribuição residual do erro do MDT na fase resultante é modelada para toda a série temporal. O resíduo obtido entre a fase resultante e o modelo dá uma estimativa do ruído da fase que é utilizada para avaliar se os pontos cumprem os requisitos para serem considerados como difusores persistentes (Hooper *et al.*, 2012).

Na primeira abordagem, a fase é desenrolada durante o processo de seleção dos candidatos a PS, ajustando um modelo temporal de evolução à fase de diferenças-duplas, enquanto na segunda abordagem um algoritmo de desenrolamento da fase é aplicado aos pixéis seleccionados sem assumir um modelo particular para a evolução temporal da fase (Hooper, 2010).

Em ambas as abordagens, a fase relativa à deformação é separada da fase relativa à componente atmosférica e ao ruído, sendo filtrada no tempo e no espaço.

O StaMPS considera o facto de os deslocamentos serem correlacionados no tempo e no espaço, a atmosfera ser correlacionada no espaço, mas não no tempo e o ruído não

ser correlacionado nem no espaço nem no tempo. Foi o primeiro método a considerar a estabilidade da fase como um critério de coerência para seleção de pixéis PS e integrar informação de pixéis vizinhos para determinar a estabilidade da fase de cada *pixel* (Hooper *et al.*, 2006). Uma vantagem importante deste método, deve-se ao facto, de não ser necessário recorrer a um modelo prévio de deformação.

A técnica *PSI standard* usa uma série temporal de imagens para identificar pixéis com um comportamento estável ao longo do tempo que não estão correlacionados (Ferretti, 2000).

No StaMPS/MTI, os algoritmos para seleção de pixéis do tipo PS ou DS são basicamente os mesmos sendo, contudo, usados diferentes interferogramas, resultantes de diferentes combinações das imagens. Interferogramas individuais com uma imagem *master* comum, para a seleção de pixéis PS, ou seja, usando o método PSI clássico (Figura 30). Interferogramas múltiplos, formados por pares de imagens, *master* e *slave* para seleção de pixéis DS, considerando apenas as linhas de base espacial e temporal mais pequenas entre cada par (método SDPF), semelhante ao método SBAS, (Figura 31). Nas Figuras 30 e 31 são apresentadas a distribuição de linhas de base temporais e espaciais referentes aos dados interferométricos ERS e ASAR SAR, utilizados num dos estudos efetuados neste trabalho, tanto para processamento de pixéis PS como DS, suportados pelo StaMPS.

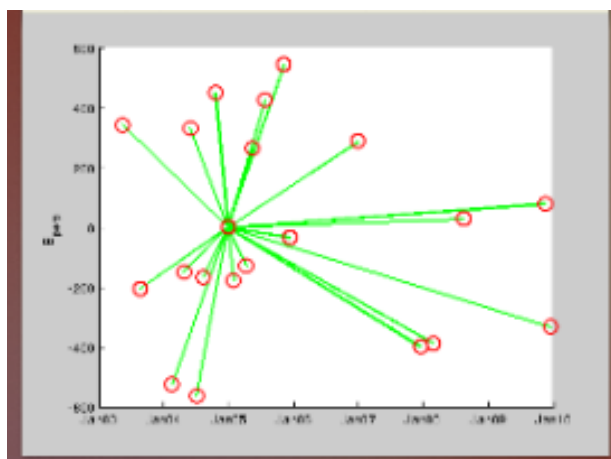


Figura 30 - Método PSI para formação de interferogramas.  
Fonte: Própria, processamento no StaMPS

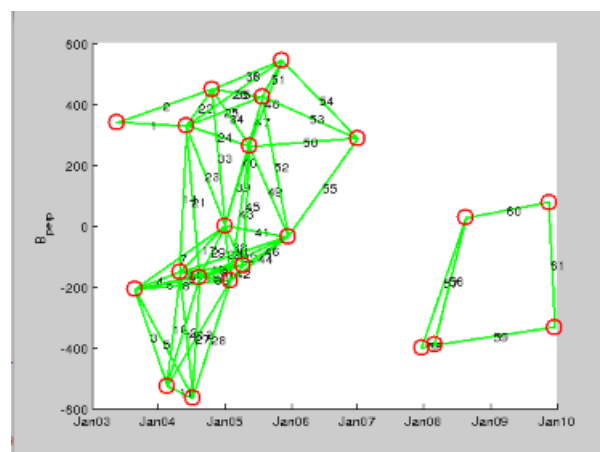


Figura 31 - *Small Baseline* para formação de interferogramas.  
Fonte: Própria, processamento no StaMPS

Depois da seleção de candidatos a PS, a seleção de pixels PS final baseia-se na análise da convergência da Função Distribuição de Probabilidade (FDP) desses PS, tal como apresentado em (Hooper *et al.*; 2007). A estratégia de seleção consiste em comparar, para cada candidato a PS, a estimativa da probabilidade máxima com um valor limite predeterminado (correlação). Caso a probabilidade estimada seja maior do que o valor limite, então o candidato será selecionado como um *pixel* PS, caso contrário, este será descartado. O sucesso da implementação dos algoritmos para seleção de PS baseia-se na escolha do limite para a correlação (Agram, 2010).

Se for selecionado um valor muito alto para o limite, muitos potenciais pixels PS não serão incluídos e a rede de PS resultante é dispersa. Se o limite definido for um valor muito baixo, então muitos candidatos a PS serão incluídos e a rede contém muitos pontos que podem não ser verdadeiramente difusores persistentes. Atualmente a seleção de limite é bastante arbitrária, porque não se podem calcular facilmente as estatísticas de dispersão para possíveis pixels persistentes em todo o tipo de terrenos (Agram and Howard Zebker, 2007).

A Função da Distribuição da Probabilidade máxima pode ser pré- calculada para vários níveis de ruído da fase  $\sigma_n^2$  e guardada para aplicações posteriores. Para a amplitude e a fase interferométrica para vários valores de (SNR), as funções de distribuição da probabilidade são mostradas na Figura 32.

$$f_{\varphi_n}(\varphi_n) = \int_{-\pi}^{\pi} f_{\varphi_n, \varphi_{sum}}(\varphi_n, \varphi_{sum}) \cdot d\varphi_{sum} \quad (4.1)$$

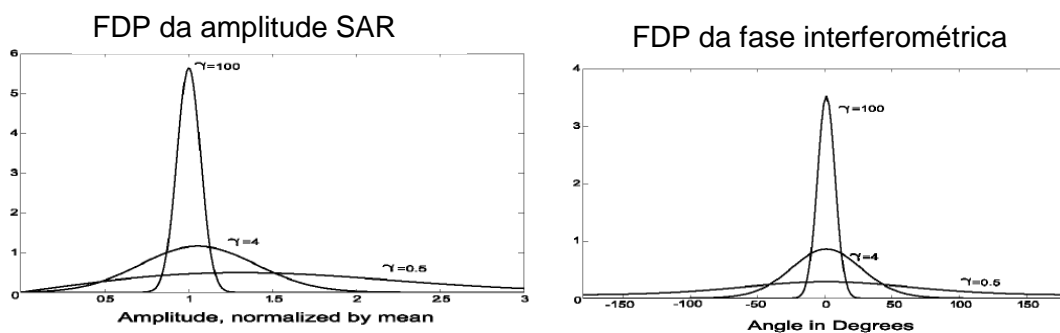


Figura 32 - Função Distribuição de Probabilidade para a amplitude (esquerda) e Função Distribuição de Probabilidade para a fase residual (direita) para um modelo de sinal constante avaliado para SNR de 0.5, 4 e 100. Fonte: Agram, 2010.

A Função Distribuição de Probabilidade para a fase interferométrica de um *pixel* neste modelo é dada por (Just and Bamler, 1994; Lee *et al.*, 1994).

$$f_{\varphi}(\varphi) = \frac{1-|\rho|^2}{2\pi} \cdot \frac{1}{1-b_{\varphi}^2} \left[ 1 + \frac{B_{\varphi} \cdot \cos^{-1} - B_{\varphi}}{\sqrt{1-B_{\varphi}^2}} \right] \quad (4.2)$$

Onde  $B_{\varphi} = |\rho| \cos \varphi$

$|\rho|$  é a decorrelação que depende da razão sinal/ruído.

A [Equação 4.2](#) reduz para uma função *delta de Dirac* se os sinais estão perfeitamente correlacionados,  $|\rho| = 1$ , e para uma distribuição uniforme em  $[-\pi, \pi[$  se os sinais estão perfeitamente decorrelacionados,  $|\rho| = 0$ .

Após esta etapa interferométrica, são corrigidos os erros do desenrolamento da fase, no domínio espacial, com recurso a um algoritmo para dados dispersos. Qualquer algoritmo para desenrolamento de dados dispersos pode ser usado, uma vez que se trata de reduzir o problema de desenrolamento da fase em dados dispersos a um problema de desenrolamento da fase numa grelha regular, ou seja um problema com aplicação do diagrama de Voronoi numa Triangulação Delaunay.

No caso do StaMPS foi desenvolvido e implementado um algoritmo independente para desenrolamento da fase. ([Hooper, 2009](#))

Contudo, no StaMPS/MTI, a parte espacial não-correlacionada em interferogramas com a fase enrolada é corrigida antes do desenrolamento da fase, incluindo a parte espacial não-correlacionada do sinal devida ao erro do ângulo de observação e à contribuição da imagem *master*. Em seguida, as fases corrigidas são filtradas para reduzir o ruído, antes do desenrolamento ([Goldstein and Werner, 1998](#)). Após a aplicação da filtragem, utilizando o filtro de Goldstein, os pixéis PS são usados para formar uma Triangulação Delaunay, sendo, os elementos constituintes dos triângulos, usados para identificar os PS mais próximos de cada rede de triângulos ([Barber and Huhdanpaa, 2009](#)). Esses pixéis PS, mais próximos de todas as redes de triângulos, são selecionados para formar uma rede maior, mais densa.

O StaMPS ([Hooper, 2006](#)) foi o primeiro método de processamento a considerar a estabilidade de fase como um critério para seleção de dispersão coerente e incluir informações de pixéis vizinhos para determinar a estabilidade de fase de cada *pixel*.

A técnica de PSI tem a vantagem de se poder localizar a deformação num *pixel* PS específico, em vez de se considerar uma célula de resolução de dimensões definidas

pelo sistema de radar, habitualmente da ordem de vários metros. Isso permite uma monitorização de alta resolução no caso de estruturas. Relativamente a estudos de deformação da superfície terrestre, geralmente, não é necessário um nível de detalhe tão grande, embora possa ser útil para separar a deformação correspondente à superfície terrestre da deformação local em estruturas específicas.

A precisão da técnica PSI, depende do sensor, do número de imagens, do tempo durante o qual as imagens são adquiridas, da distância do ponto de referência e da coerência dos PS. Nos casos em que a deformação é linear no tempo, a precisão pode ser melhor do que 1 mm/ano. ([Adam et al., 2009](#)).

Com o método SBAS, são formados os interferogramas possíveis com várias imagens *master* distintas, que são depois invertidos recorrendo a equações lineares, de forma a reduzir o ruído e aumentar a razão sinal/ruído relativa à deformação do terreno. O desenrolamento da fase nos interferogramas formados com o método SBAS tem vantagens em relação ao método PSI visto que as fases não são referenciadas para o mesmo instante, sendo que da sua análise estatística pode verificar-se que os valores da fase têm mais qualidade ([Schmidt and Bürgmann, 2003](#)). Neste método, consideram-se apenas interferogramas construídos a partir de pares de imagens com bases perpendiculares pequenas, com o objetivo de diminuir a descorrelação espacial. O algoritmo efetua uma seleção de pixéis, realizando o desenrolamento da fase apenas sobre pontos com coerência espacial acima de um determinado limiar, cujos resultados são utilizados para fazer uma interpolação para os restantes pixéis. Na primeira parte do desenrolamento da fase são estimadas as componentes da fase correspondentes aos deslocamentos e ao erro do MDT. Estas duas componentes são subtraídas aos interferogramas originais, que são sujeitos a uma nova operação de desenrolamento da fase, mais refinada que a anterior. A soma dos interferogramas desenrolados com as componentes do deslocamento e do erro do MDT permite obter os interferogramas finais onde é aplicada uma decomposição de valor singular para obter o vetor da velocidade dos deslocamentos. No entanto, esta componente da fase ainda está afetada pelo efeito atmosférico, que é estimado através da aplicação de um filtro passa-baixo espacial e um filtro passa-alto temporal, sendo depois removido ao resultado ([Berardino et al., 2002](#)).

Por fim, as fases desenroladas de um *pixel* isolado são utilizadas para estimar a relação linear entre as linhas de base espaciais, usando um ajustamento por mínimos quadrados. Depois de estimados os erros associados ao ângulo de observação e à



perturbação atmosférica na imagem *master*, é estimado o efeito da atmosfera na imagem *slave*, recorrendo à interpolação dos PS ou DS, sendo esse efeito removido do interferograma.

O desempenho da filtragem atmosférica varia de caso para caso visto que pode, facilmente, levar a estimativas erróneas dos sinais de deformação se tanto a deformação como o ruído atmosférico apresentarem padrões e comportamentos temporais semelhantes (Peltier *et al.*, 2010).

Em suma há quatro passos que devem ser seguidos no StaMPS/MTI, (Hooper, 2007)

- Formação dos interferogramas;
- Estimativa da estabilidade da fase com uma seleção inicial de candidatos a PS, com base na estabilidade da amplitude seguida da análise da fase para determinar a estabilidade da fase desses pixéis PS, usando um processo iterativo. Finalmente, há um passo opcional para estimar a estabilidade da fase daqueles pixéis que foram inicialmente rejeitados com base nas características da amplitude;
- Para seleção dos PS estima-se para cada *pixel* a probabilidade de ser um *pixel* PS com base numa combinação estimada de amplitude e estabilidade de fase. Então usa-se a probabilidade estimada para selecionar pixéis PS, rejeitando aqueles que parecem ser persistentes apenas em certos interferogramas e aqueles que parecem ser dominados pela reflexão dos pixéis PS adjacentes;
- Para estimar o deslocamento, uma vez selecionados os pixéis, isola-se o sinal devido à deformação nesses pixéis PS. Isso inclui desenrolar os valores de fase e subtrair as estimativas de vários termos com ruído.

A Figura 33 apresenta o diagrama de fluxo do método StaMPS/MTI.

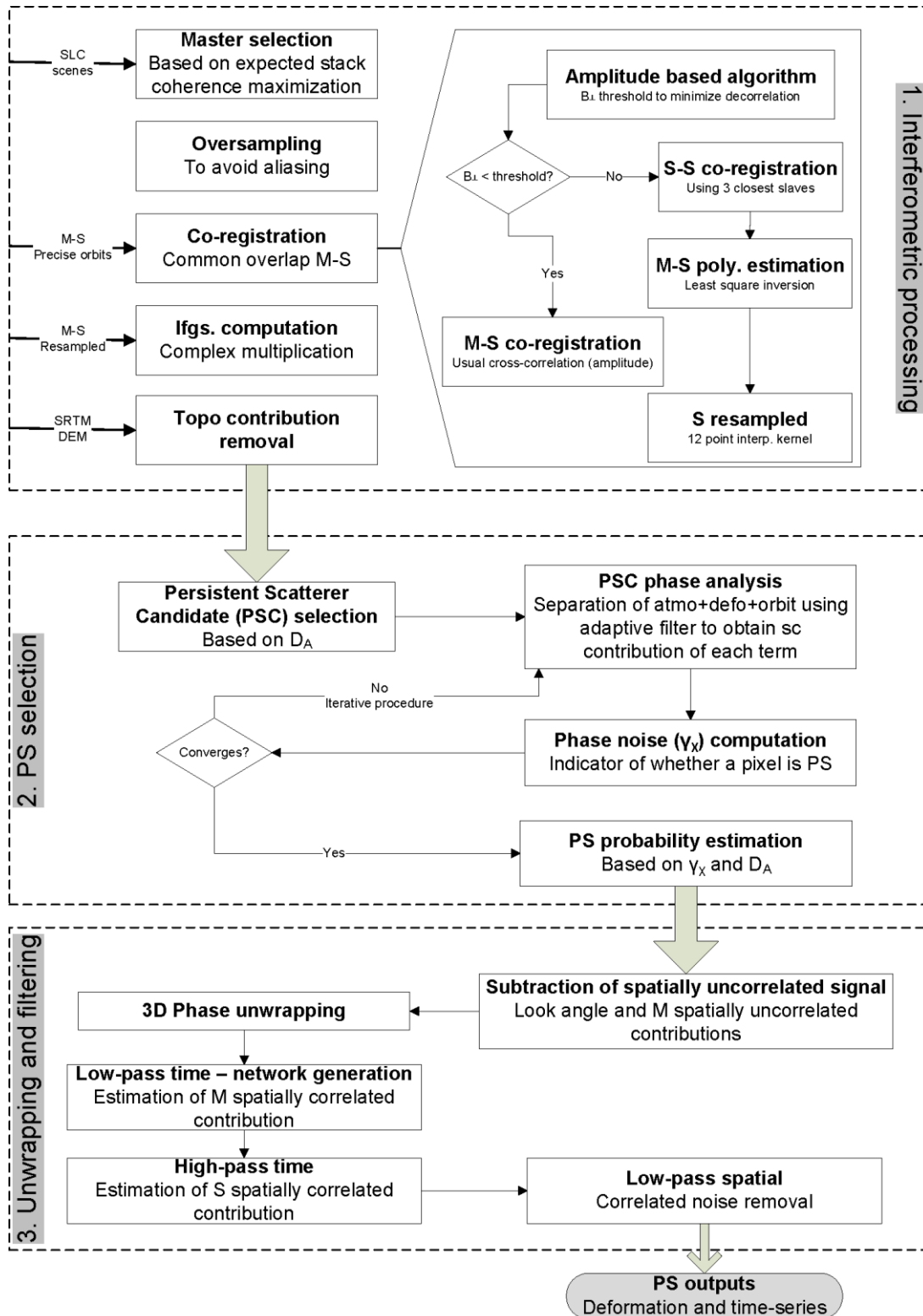


Figura 33 - Diagrama de fluxo de processamento com StaMPS/MTI. Fonte: Sousa, JJ., 2009

O funcionamento interno do *método* StaMPS/MTI é descrito, de forma mais detalhada, em (Hooper, 2006, 2008, 2010; Hooper *et al.* 2004, 2007; Sousa, 2009; Sousa *et al.* 2010, 2011).

## 4.2. SARPROZ

O programa SARPROZ pode caracterizar-se como um *software* versátil, desenvolvido em MATLAB (Matrix Laboratory), capaz de processar dados dos vários tipos de imagem SAR existentes. Inicialmente este *software* foi desenvolvido com o propósito de resolver o problema da combinação de dados coerentes com diferentes comprimentos de onda, como era o caso da interferometria cruzada ERS vs. Envisat, recorrendo a técnicas MT-InSAR avançadas (Perissin, 2006). Este problema está diretamente relacionado com a natureza física dos alvos radar e com a sua capacidade de serem “visíveis” sob diferentes ângulos de observação ou frequências de iluminação. Assim, foi desenvolvido um módulo para caracterização e reconhecimento dos alvos, sendo também possível processar e extrair informação a partir da amplitude das imagens de radar (Perissin, 2007). Como consequência o uso de séries temporais de amplitude levou a que esta ferramenta se tornasse capaz de lidar com alvos temporários (Ferretti, 2003).

Adicionalmente, o reconhecimento de um alvo numa imagem SAR implica uma localização precisa, sendo que, no âmbito do SARPROZ, foram desenvolvidas diversas técnicas para aperfeiçoamento da estimativa da altitude do alvo e da georreferenciação (Perissin, 2006). Como consequência, foram incluídos algoritmos para extração de MDT e MDS a partir de pontos dispersos. (Perissin, 2006 and Perissin, 2008). O problema resultante do aumento da densidade de PS nas áreas não urbanas foi abordado mais tarde tendo sido estudado e implementado o algoritmo QPS (Quasy PS) (Perissin, 2010). Atualmente, o SARPROZ disponibiliza diversas opções para combinação de grandes séries de dados, podendo o utilizador escolher o conjunto de interferogramas que quer processar e quais as técnicas a aplicar. O *software* também inclui algumas funções auxiliares, tais como classificação e deteção da deformação.

É também possível exportar e visualizar os resultados, através das diversas ferramentas disponibilizadas, especificamente para georreferenciar a informação, permitindo, entre outros, a sua visualização no *Google Earth*.

O SARPROZ é uma ferramenta de investigação e, por esse motivo, encontra-se em contínuo desenvolvimento. Tendo sido escrito em MATLAB, o programa dá ao utilizador a possibilidade de aceder de forma muito fácil aos dados além de permitir alterar ou

acrescentar módulos. Ao mesmo tempo, graças às ferramentas disponíveis no MATLAB, o SARPROZ consegue melhorar o desempenho computacional e processar facilmente *frames* SAR em vários CPU's, ou *clusters* de computadores.

A listagem seguinte apresenta os módulos de processamento disponíveis no SARPROZ ([www.sarproz.com](http://www.sarproz.com)).

- **Synthetic Aperture Radar (SAR) image processing:** SLC coregistration, SLC equalization and calibration, Reflectivity Map calculation, extraction of pointwise targets.
- **SAR Interferometry (InSAR):** orbital data processing, interferogram calculation, interferogram flattening, interferogram filtering, phase unwrapping.
- **Differential SAR Interferometry (DInSAR):** DEM conversion and resampling, topographic phase removal, residual phase processing, motion estimation.
- **Stacking of Differential Interferograms (SDInSAR):** processing of series of interferograms for atmospheric delay suppression and motion estimation.
- **Persistent Scatterers InSAR (PSI):** full-processing chain for ground average deformation trend, ground elevation and atmospheric delay estimation.
- **Urban Advanced PSI:** PS real targets identification and classification (roofs, poles, dihedrals, trihedrals, fences, floor gratings, ...).
- **Temporary PSI:** estimation of temporary targets (new constructions, demolitions, short-time structures)
- **Multiple scattering centers PSI:** estimation of double or multiple scattering centers per resolution cell in urban sites.
- **Non-Linear PSI:** estimation of non-linear trends (seasonal polynomial and non-parametric) in target displacement.
- **Quasi-PSI:** an advanced technique to estimate ground average deformation and ground elevation in areas where no PS targets can be detected.
- **Unwrapped-PSI:** time series analysis of unwrapped interferograms.
- **Multi-Sensor analysis:** combination (coherent or un-coherent) of data acquired by different sensors, with different characteristics (frequency, polarization, ...) under different geometries
- **DEM processing** based on InSAR/Multi-Temporal InSAR results for DTM and/or DSM extraction
- **Change detection** exploiting pairs of images.
- **Time Series Change detection** exploiting image time series.
- **Image classification** based on results of previous modules (partly under development).

Na [Figura 34](#), é apresentado o diagrama de fluxo do SARPROZ.

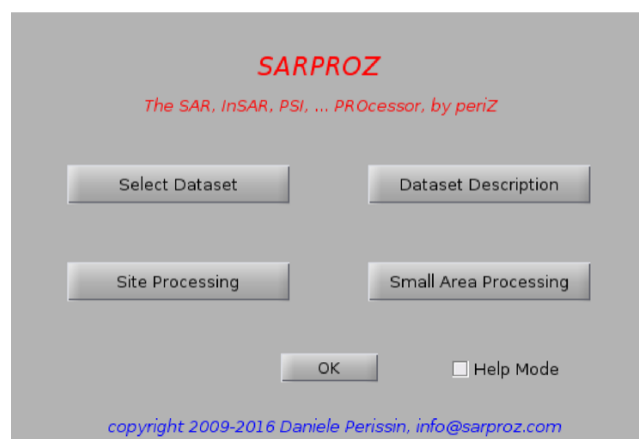


Figura 34 - Diagrama de fluxo de processamento do SARPROZ.

Fonte: Manual do Software SARPROZ

O programa apresenta uma estrutura modular podendo cada módulo ser acedido através de diferentes janelas, as quais contêm botões e menus com as opções possíveis.

A [Figura 35](#) apresenta a interface de processamento do SARPROZ.

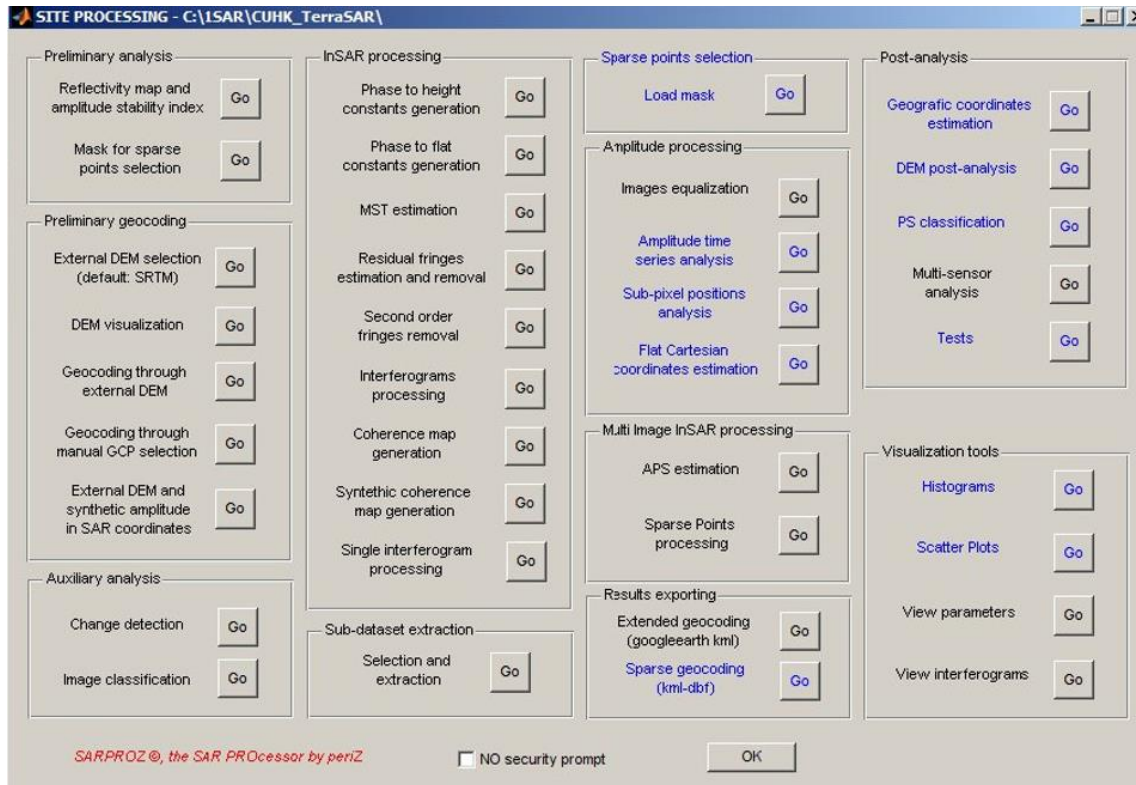


Figura 35 - Interface de Processamento do SARPROZ. Fonte: Manual do Software SARPROZ

A [Figura 36](#), mostra, a título de exemplo, o módulo para a estimativa do *Atmospheric Phase Screen* (APS).



Figura 36 - Recuperação do APS. Fonte: Manual do Software SARPROZ

Como se pode observar, os passos para a recuperação do APS são bastante usuais ([Ferretti, 2001](#)) e consistem na seleção de candidatos a PS (PSC), na criação de gráficos, na estimativa de parâmetros e, por fim, na estimativa do APS.

Podem ser seleccionadas diversas opções. Além da tendência da deformação linear e em altitude ([Ferretti, 2001](#)), outros parâmetros podem ser estimados, tais como a posição em azimute de uma subcélula ([Perissin, 2006](#)), uma interrupção de fase que seja constante (como por exemplo na combinação ERS-Envisat, ([Perissin, 2006](#)), e a tendência da variação sazonal ([Perissin, 2006](#)). Foram também implementadas a deformação polinomial não-linear ([Ferretti, 2000](#)) e mais centros de difusores ([Ferretti, 2005](#)). Os parâmetros podem ser estimados, através do clássico algoritmo PSI ([Ferretti, 2001](#)), ou através do algoritmo QPS ([Perissin, 2010](#)). No final, o APS pode ser estimado, através de diferentes algoritmos para a inversão de gráficos.

Os dois métodos, PSI e SBAS, podem ser combinados para aumentar a densidade de pontos e melhorar a relação sinal-ruído, (SNR), sendo uma vantagem em relação à utilização isolada de cada dos métodos.

Mais informações sobre a aplicação destes métodos podem ser encontradas em (Perissin *et al.* 2012) (Perissin and Wang, 2011) e na página oficial da internet ([www.sarproz.com](http://www.sarproz.com)).

A Tabela 2 resume os principais *software* de processamento SAR atualmente disponíveis, indicando-se também as suas características essenciais.

Relativamente às imagens obtidas pelo sensor do satélite Sentinel-1, que não estão incluídas na Tabela 2, é de referir que entretanto têm sido desenvolvidas ferramentas para leitura e processamento de dados, nomeadamente o *Sentinel-1 Toolbox (S1TBX)*, que consiste num conjunto de ferramentas para leitura, visualização e análise de dados não só para o Sentinel-1 e para os produtos de dados das missões ESA anteriores, ERS-1 e 2, e Envisat, mas também para dados SAR de terceiros, o ALOS PALSAR, TERRASAR-X, COSMO-SkyMED e RADARSAT-2.

O Sentinel-1 Toolbox, está a ser desenvolvido para a ESA pela empresa *Array Systems Computing*. (ESA, 2018).

Devido à elevada frequência temporal dos dados obtidos com Sentinel 1A e 1B, aproximadamente 6 dias, a utilização destes dados permitirá efetuar monitorização em tempo quase real.

Tabela 2 - Software comerciais e livres com capacidades de processamento DInSAR e MT-InSAR.

Fonte: Adaptado de Sousa *et al.*, 2013

	Software	Licença	Companhia/universidade	Web site	Satélites suportados (sensores)						
					ers	env	rad	alo	jer	tsx	csm
Capacidades DInSAR	Doris	Público	TUDelft	<a href="http://doris.tudelft.nl/">http://doris.tudelft.nl/</a>	x	x	x	x	x	x	x
	ROI_PAC	Público	University of Berkeley	<a href="http://www.roipac.org/">http://www.roipac.org/</a>	x	x	x	x	x	x	
	NEST	Público	ESA + International consortium	<a href="http://nest.array.ca/web/nest">http://nest.array.ca/web/nest</a> or <a href="http://www.ppolabs.com/nestdoris.html">http://www.ppolabs.com/nestdoris.html</a>	x	x	x	x	x	x	x
	Adore_doris	Público	University of Miami	<a href="http://code.google.com/p/adore-doris/">http://code.google.com/p/adore-doris/</a>	x	x	x	x	x	x	x
	$\pi$ _rate	Público	University of Leeds	<a href="http://homepages.see.leeds.ac.uk/~earhw/pirate/">http://homepages.see.leeds.ac.uk/~earhw/pirate/</a>	x	x	x	x	x	x	x
	RAT	Público	TUBerlin	<a href="http://radartools.berlios.de/">http://radartools.berlios.de/</a>	x	x		x			
	GMTSAR	Público	University of California	<a href="http://topex.ucsd.edu/gmtsar/">http://topex.ucsd.edu/gmtsar/</a>	x	x		x			
	Diapason	Comercial	CNES	<a href="http://www.altamira-information.com">http://www.altamira-information.com</a>	x	x	x	x	x		
	Imagine SAR	Comercial	ERDAS/DLR	<a href="http://geospatial.intergraph.com/products/erdasimagine/imagineradarmappingsuite/Details.aspx">http://geospatial.intergraph.com/products/erdasimagine/imagineradarmappingsuite/Details.aspx</a>	x	x	x	x	x	x	x
EarthView	Comercial	MDA	<a href="http://www.mdacorporation.com">www.mdacorporation.com</a>	x	x	x	x	x			
Capacidades DInSAR + MTI	SarScape (ENVI)	Comercial	SARMAP	<a href="http://www.sarmap.ch/">http://www.sarmap.ch/</a>	x	x	x	x	x	x	x
	Gamma	Comercial	Gamma Remote Sensing	<a href="http://www.gamma-rs.ch/">http://www.gamma-rs.ch/</a>	x	x	x	x	x	x	x
	StaMPS-MTI	Público	TUDelft	<a href="http://radar.tudelft.nl/~ahooper/stamps">http://radar.tudelft.nl/~ahooper/stamps</a>	x	x	x	x	x	x	x
	DePSI (*)	Público	TUDelft	<a href="http://www.tudelft.nl/hanssen">www.tudelft.nl/hanssen</a> (for contacting)	x	x	x	x	x	x	x
	Sarproz (*)	Público	University of Hong Kong (Daniele Perissin)	<a href="http://ihome.cuhk.edu.hk/~b122066/manual/index.html">http://ihome.cuhk.edu.hk/~b122066/manual/index.html</a>	x	x	x	x	x	x	x

ers – ERS-1/2; env – Envisat; rad – Radarsat-1/2; alo – ALOS; jer – JERS-1; tsx – TerraSAR X; csm – COSMO-SkyMed

(\*) Público (livre) para projetos



## CAPÍTULO 5 - ÁREAS DE TESTE

Neste capítulo são apresentadas as áreas que serviram para os testes de processamento realizados no âmbito desta tese, e também as correspondentes séries temporais de imagens SAR utilizadas. As várias áreas de teste foram selecionadas com o propósito de se conseguir responder às questões apresentadas no Capítulo 1, partindo do princípio que os resultados obtidos permitiriam extrair conclusões que, por sua vez respondem às questões centrais deste trabalho.

Foram selecionadas áreas que incluíam diferentes tipos de estruturas, sobretudo pontes e barragens, mas também estradas e ainda, encostas/taludes de estradas e de albufeiras, não só em Portugal, mas também noutras partes do globo indicadas na [Figura 37](#).



Figura 37 - Localização geográfica das áreas que serviram para a realização de testes. Fonte: [www.launiondigital.com.ar](http://www.launiondigital.com.ar)

O tipo de áreas e estruturas a monitorizar, tanto em Portugal como noutros países, foram selecionados em função não só da disponibilidade de imagens SAR, mas também tendo em vista o potencial de aplicação ao estudo de casos concretos com interesse para algumas entidades, como por exemplo a monitorização de barragens, que é do interesse da entidade Eletricidade de Portugal (EDP).

Para cada AOI (*Area Of Interest*), o número de imagens usadas foi limitado em alguns casos pelo número de imagens previamente adquiridas à ESA. O [Anexo 4](#), apresenta informação sobre as séries temporais de imagens SAR usadas neste trabalho.

Nos casos em que foi possível, foram recolhidos dados sobre o histórico da deformação nas respetivas estruturas, obtidas a partir de observações efetuadas usando outros métodos de monitorização já implementados, permitindo assim também comparar a técnica MT-InSAR com outras técnicas tradicionais de monitorização já validadas.

Apresentam-se, a seguir, agrupadas por tipo de estrutura, as áreas que se consideram mais interessantes para a realização dos testes com SAR.

## 5.1. Encostas e Taludes

Uma aplicação importante da metodologia MT-InSAR consiste na monitorização de encostas e taludes, sempre muito sujeitos a movimentos e escorregamentos de terras. No âmbito deste trabalho, foram realizados vários testes em encostas e escombrelas de barragens, sujeitas a movimentos devido à variação dos níveis de água no reservatório e conseqüente alteração das pressões exercidas na envolvente.

Foram analisadas encostas na cidade de Zilina (Eslováquia), a falha da Serra Tejada na Cordilheira Bética (Espanha), a escombrela da barragem de Salamonde, o talude/encosta do Itinerário Complementar 5 (IC5) na zona de Alfandega da Fé e encostas da barragem da Raiva (Portugal), etc. Mais informações sobre os testes realizados neste tipo de áreas são apresentadas no [Capítulo 6](#).

## 5.2 Barragens

Para desenvolver este estudo, selecionaram-se barragens localizadas quer em Portugal quer noutros países. Para seleção das barragens portuguesas houve colaboração da EDP e também da empresa Norvia, que, entretanto, demonstraram interesse nos resultados deste estudo. A nível internacional, foram selecionadas barragens da Eslováquia aproveitando a facilidade de acesso a imagens de diferentes sensores SAR sobre áreas de interesse daquela região.

As barragens escolhidas em Portugal foram a barragem do Alto Ceira, a barragem da Raiva e de Paradela.

No estrangeiro foram usadas imagens da barragem de Gabčíkovo-Nagymaros, na Eslováquia.

A seguir apresenta-se uma breve descrição das principais características das estruturas monitorizadas com recurso a imagens SAR.

### 5.2.1 Barragem da Paradela

A barragem de Paradela ([Figura 38](#)) localiza-se no concelho de Montalegre, distrito de Vila Real, na bacia hidrográfica do rio Cávado. Foi concluída no ano de 1956, sendo uma barragem de aterro, do tipo enrocamento, com o maciço formado por fragmentos de rocha granítica compactados. O comprimento no coroamento é de 540m, tendo 110m de altura acima do terreno e cota ortométrica de 743,5m. O volume de aterro é de 2.700.000m<sup>3</sup>.

Esta barragem foi monitorizada com técnicas InSAR sem o conhecimento prévio de qualquer referência de deformações. Utilizou-se o *software* SARPROZ, para processar imagens Envisat de duas trajetórias ascendentes com sobreposição temporal, a trajetória 273 com 14 imagens, referidas ao período de outubro de 2002 a maio de 2007 e a trajetória 44 com 16 imagens, no período de maio de 2003 a dezembro de 2007.



Figura 38 - Barragem da Paradela. Fonte: Google Earth

### 5.2.2 Barragem da Raiva

A barragem da Raiva, (Figura 39) concluída no ano de 1981, é uma barragem de betão do tipo gravidade, cujas fundações são de xisto e grauvaques. Situada na zona centro de Portugal, perto da localidade de Coiço, no rio Mondego, tem 200m de comprimento no coroamento, a altura acima das fundações é de 36m e a cota ortométrica é de 64,5m. A altura visível da barragem a jusante é de 34m, sendo a monitorização por InSAR, realizada desse lado. Para a monitorização com MT-InSAR, foram usados dados recolhidos pelo satélite Envisat, obtidos em duas trajetórias ascendentes deste satélite, sendo a orientação da barragem quase ideal, isto é, paralela à direção da linha de voo. A resolução do radar é aproximadamente 4-5 m, na direção paralela à estrutura/corpo da barragem, enquanto na direção perpendicular é de 20-30 m (diferente para cada trajetória).



Figura 39 - Barragem da Raiva. Fonte: Google Earth.

Foram processadas 20 imagens, obtidas entre 2003 e 2007, na trajetória 44, e 19 imagens, obtidas entre 2002 e 2009, na trajetória 316. O facto de as bases perpendicular e temporal serem muito grandes, levou a que o número de imagens fosse reduzido para a formação dos interferogramas. A trajetória 316 é menos apropriada para a monitorização, no entanto tem uma resolução melhor na direção perpendicular à barragem. Em ambas as trajetórias do satélite, a barragem está sujeita a grandes efeitos de *layover*, porque os pontos PS na parte superior da barragem são registados primeiro, do que os pontos na parte inferior da barragem aquando da passagem do radar.



### 5.2.3 Barragem Cunovo, Gabčíkovo-Nagymaros (Eslováquia)

A barragem Gabčíkovo-Nagymaros (Figura 40) fica situada no rio Danúbio a 24 km a sudoeste de Bratislava. O projeto desta barragem foi iniciado após assinatura do tratado de Budapeste, entre a Checoslováquia e a Hungria em 1977.



Figura 40 - Barragem Gabčíkovo-Nagymaros. Fonte: Google Earth

A Checoslováquia ficou responsável pela construção da barragem em *Gabčíkovo* e a Hungria pela construção da barragem em *Nagymaros* (Figura 41).



Figura 41 - Enquadramento da barragem de Gabčíkovo-Nagymaros. Fonte: UN watercourses Convention.

Os objetivos da construção da barragem foram essencialmente, a prevenção de catástrofes devido a inundações, a melhoria da navegabilidade do rio Danúbio e a produção de energia elétrica. (Coutinho and Ribeiro, 2015).

Foi então numa primeira fase, construída a barragem de *Cunovo* pela Checoslováquia em 1991, sendo o primeiro escalão do sistema hidráulico Gabčíkovo-Nagymaros, que tem de comprimento 16km e de largura entre 1 e 4 km. A cota de serviço do nível de água é de 131,1m acima do nível médio água do mar. Atualmente a barragem de *Cunovo- Gabčíkovo* é na Eslováquia, devido à cisão da Checosláváquia.

Para a análise desta barragem com a metodologia MT-InSAR, foram usadas 52 imagens TerraSAR-X no período entre 2011 a 2013.

#### 5.2.4 Barragem do Alto Ceira

A barragem do Alto Ceira (Figura 42) começou a ser construída em 1939 e foi inaugurada em 1949. Foi uma obra da responsabilidade da então “Companhia Eléctrica das Beiras”, com projeto elaborado por *Sir William Halcrow & Partners*. Está implantada no limite Norte do concelho de Pampilhosa da Serra, freguesia de Fajão, na divisão com a freguesia de Piódão, concelho de Arganil, local de confluência entre o Rio Ceira e a Ribeira de Fórnea. É uma barragem de betão, em arco, com fundações em xisto. O comprimento da barragem no coroamento é de 85m, a altura acima das fundações 33,5m e a cota ortométrica é de 666,9m. O volume de betão é de 7x 1000 m<sup>3</sup>.

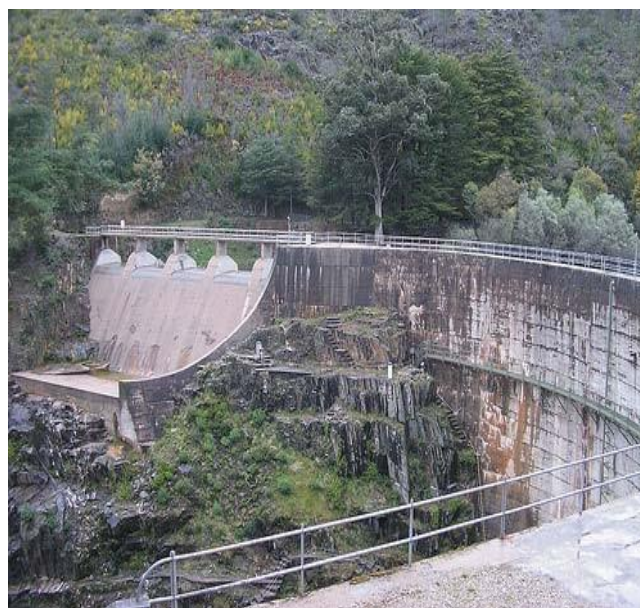


Figura 42 - Barragem do Alto Ceira. Fonte: Serras da Pampilhosa, Jornal online.

À semelhança de outras construções similares, que naquela época recorreram à mesma tecnologia de construção, a estrutura da barragem foi revelando algumas anomalias logo após o seu enchimento inicial, nomeadamente várias fissuras, deslocamentos horizontais para montante e verticais ascendentes, assim como expansão no próprio betão. Durante muitos anos esta situação foi acompanhada por técnicos do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), entidade responsável pela monitorização do comportamento da estrutura, que constatou que o seu estado se foi agravando progressivamente. Sendo uma barragem com um longo período de anomalias que obrigou a realizar monitorização frequente, como já referido, o estudo das deformações tem sido efetuado usando metodologias convencionais apoiadas na grande quantidade de observações geodésicas que a EDP possuía, e que foram facultadas para este trabalho (ver [Capítulo.6](#)). Para a metodologia MT-InSAR, foram usadas 42 imagens SAR obtidas com o satélite ERS e 21 imagens SAR obtidas com o satélite Envisat nos períodos de (1992-1998) e (2003-2009) respetivamente.

### 5.3 Pontes

A seleção de uma área/estrutura para ser incluída como área de teste ficou condicionada pela disponibilidade de acesso a imagens SAR e aos eventuais custos associados à sua aquisição. Embora seja possível obter informações importantes recorrendo a sensores da banda C, por exemplo ERS e ASAR (ver, por exemplo, estudos realizados por ([Sousa and Bastos 2013](#)) com a vantagem de estes dados poderem ser obtidos sem custos, para se conseguirem resultados com a densidade de pontos e o rigor tais que permitam a utilização das técnicas interferométricas na monitorização de quase qualquer tipo de estrutura, tem que se recorrer às imagens captadas pelos sensores de última geração, nomeadamente, aqueles que operam na banda X, como é o caso do satélite TerraSAR-X e CosmoSky-Med. No entanto, a desvantagem, é que as imagens obtidas por estes sensores têm custos associados por serem satélites comerciais. As pontes analisadas neste estudo são todas localizadas no estrangeiro, visto que foram cedidas imagens para a realização deste trabalho, que tinham sido previamente adquiridas no âmbito de um outro projeto de investigação que coincidiu com o início deste doutoramento. Todas as informações sobre os testes realizados nas áreas que contêm pontes são apresentadas no [Capítulo 7](#).



## 5.4 Acesso aos dados SAR

A aquisição de imagens SAR gratuitas, só é possível nos casos em que se destinam a fins científicos. Assim qualquer projeto interferométrico que necessite imagens SAR, estas deverão ser obtidas junto da agência espacial responsável pela operação do satélite que transporta o sensor SAR. A primeira fase de qualquer estudo interferométrico passa, então, pela utilização de uma aplicação que permita verificar a disponibilidade de imagens sobre a área de interesse, pois, só assim, será possível verificar se a área é elegível para um estudo deste tipo. O [Anexo 1](#) apresenta um exemplo da consulta do catálogo da ESA. Numa segunda fase, deverá ser submetida à agência responsável pelo respetivo satélite, um projeto que enquadre o estudo proposto e apresente, entre outros, a equipa que participará no projeto, os objetivos e os resultados expectáveis. No [Anexo 2](#), apresenta-se um exemplo do projeto submetido à ESA para obter parte das imagens utilizadas neste trabalho. De referir que, atualmente ([2018](#)) é possível obter imagens SAR do satélite Sentinel-1 de forma mais fácil, bastando para tal aceder ao site da ESA e efetuar o *download* de imagens da área de interesse.

No [Anexo 3](#), apresenta-se, a título de exemplo, um relatório de progresso dos trabalhos, normalmente exigido pela agência que fornece os dados. O [Anexo 4](#) apresenta, de forma resumida, informações sobre as séries temporais SAR usadas em algumas das áreas mais relevantes deste estudo. E os [Anexos 5 e 6](#), mostram a distribuição das linhas de base temporal, perpendicular e a diferença no Centróide de Doppler resultantes de todas as séries usadas nos testes de processamento.

## CAPÍTULO 6 - ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Este trabalho foi, naturalmente, desenvolvido de forma faseada, primeiro com a familiarização dos conceitos e princípios interferométricos e depois com as técnicas e metodologias de processamento interferométrico mais recentes e análise dos resultados.

Neste capítulo, são apresentadas as metodologias utilizadas e os principais resultados obtidos no âmbito deste trabalho. O trabalho desenvolvido e os testes realizados foram orientados para responder a algumas questões, nomeadamente:

1. As técnicas InSAR permitem atingir resultados comparáveis aos obtidos com os métodos clássicos/convencionais (por exemplo ao nivelamento geométrico)?
2. Qual o número de imagens SAR, necessário para garantir a qualidade e a fiabilidade dos resultados?
3. O que é que se entende por “ruído” no caso da análise das barragens? (Dilatação térmica? Alterações no nível da água? Outra coisa?)
4. Ainda no caso das barragens, serão todos os tipos de barragens passíveis de serem monitorizadas por recurso a esta técnica? Dependerá do material, da orientação, da envolvente, ...?
5. Como é que as técnicas InSAR podem contribuir, efetivamente, para a monitorização de estruturas, barragens, pontes, ...?

Assim, a primeira secção deste capítulo começa por fazer uma pequena introdução relativa às metodologias de processamento interferométrico, com objetivo de integrar as secções seguintes, onde se apresentam por tipo de estrutura, os resultados obtidos nos diversos processamentos interferométricos e os melhoramentos propostos e/ou efetuados no âmbito deste trabalho, com vista a contribuir para o avanço das metodologias de monitorização de estruturas, recorrendo a métodos interferométricos.

## 6.1. Introdução

A análise das várias metodologias MT-InSAR, teve como objetivo verificar o seu desempenho na monitorização de estruturas artificiais. A partir dos diversos estudos realizados, foi possível concluir que, por vezes, as abordagens padrão não são bem-sucedidas, nomeadamente no caso de existirem grandes taxas de deformação ou deformações não-uniformes, que ocorrem muitas vezes em estruturas artificiais (mesmo recorrendo a órbitas precisas). Conclui-se, também, de acordo com outros estudos (Sousa, 2009; Sousa *et al.*, 2010; Sousa *et al.*, 2011) que o desempenho de cada um dos métodos de processamento é condicionado pelo tipo de deformação e pelo tipo de área a monitorizar.

Assim, as principais limitações são as seguintes:

- Seleção de pontos, ou seja, em algumas aplicações MT-InSAR, não se pode aumentar, significativamente o número de pontos selecionados;
- A maioria das aplicações MT-InSAR não está preparada para trabalhar com informação relativa a temperaturas ou níveis de água;
- A maioria das aplicações são, geralmente, preparadas para processamento InSAR de um determinado local ou área. Como tal, alguns parâmetros poderão não ser calculados de forma eficaz quando essa aplicação é usada em outro local. Por exemplo, as altitudes podem ser estimadas de modo mais fiável em estruturas lineares, contribuindo para que outros parâmetros sejam, também, calculados de forma mais confiável.

No âmbito deste trabalho, para monitorização de estruturas foram adotados os seguintes procedimentos:

- Seleção de pontos de forma mais flexível, com base na estabilidade da amplitude e na coerência espacial, com recurso a máscaras.
- Inclusão de alguns parâmetros para modelação, nomeadamente a temperatura e os níveis da água, de modo a conseguir uma estimativa dos movimentos devido à componente da dilatação térmica ou alteração dos níveis da água, no caso de barragens;
- Remoção de *outliers*, com base na avaliação da localização, do movimento, da coerência e da altitude;

- Avaliação da precisão de parâmetros desconhecidos, para distinguir as estimativas fiáveis;
- Utilização de resultados obtidos por medições geodésicas convencionais, para comparar com resultados InSAR, com objetivo de avaliar a qualidade dos resultados InSAR de forma a ajudar a melhorar a estimativa de parâmetros e/ou avaliar a direção do movimento;
- Conversão do movimento obtido na direção da linha de vista do sensor, para a direção real ou esperada, comparando com valores modelados esperados.

A aplicação destes procedimentos conduzirá a melhorias significativas na atual cadeia de processamento MT-InSAR para monitorização de estruturas. Tal cadeia de processamento pode ser descrita de forma simplificada pelo fluxograma da [Figura 43](#).

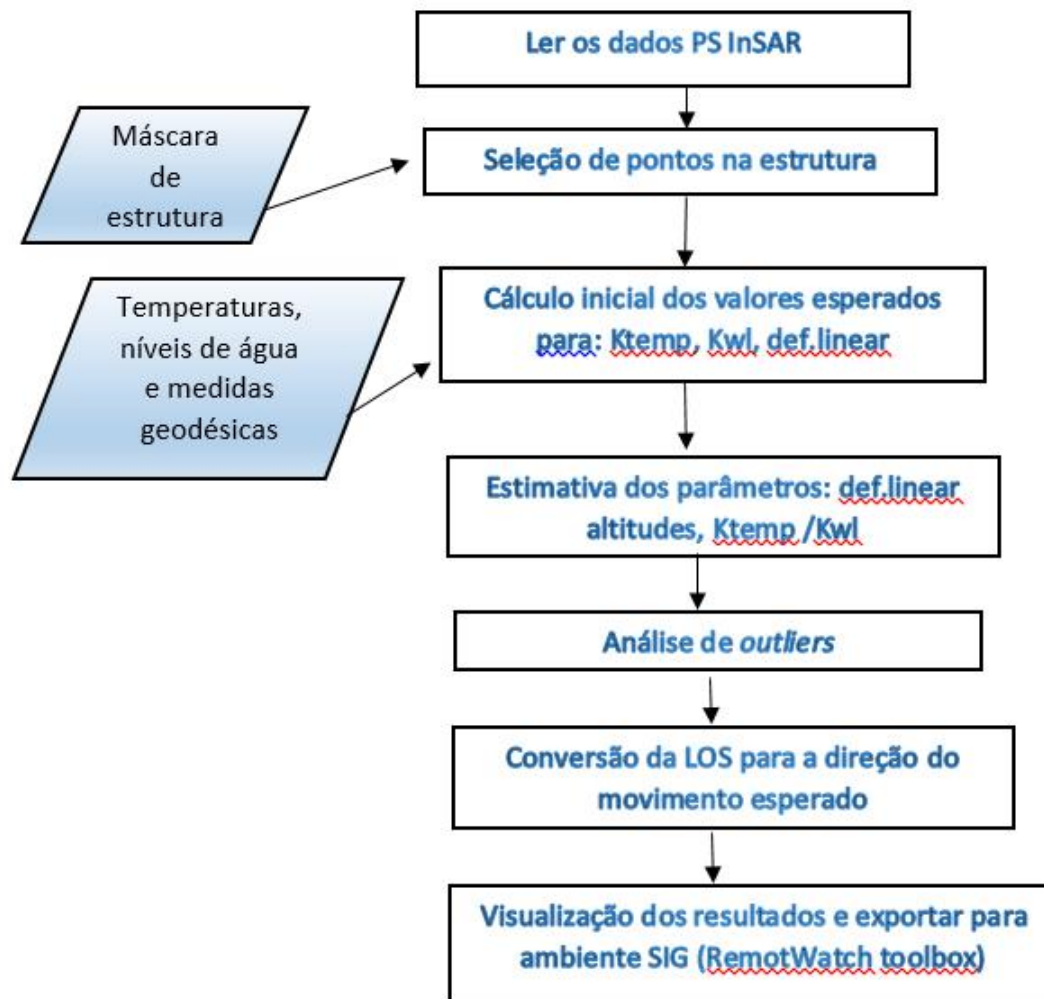


Figura 43 - Melhorias a implementar nos métodos MT-InSAR atuais. Fonte: Lazecky, M. *et al.*

Adicionalmente, foram desenvolvidas experiências com o modelo PSI convencional, recorrendo a dados ERS/ENVISAT mais antigos, tendo em conta o contexto sazonal, que poderá provocar mudanças no nível de água e/ou na temperatura.

## 6.2. Monitorização de encostas e de taludes

De acordo com as várias áreas selecionadas, nesta secção do trabalho são descritos testes de processamento, relativos a três áreas de encostas e taludes, que revelavam indícios de deslizamentos de terras. Essas encostas e taludes localizam-se em Zilina (Eslováquia), na Cordilheira Bética (Espanha) e em Salamonde e Alfândega da Fé (Portugal). As imagens usadas no processamento foram obtidas com sensores na banda-C ou na banda-L de acordo com as características da superfície do solo. De uma maneira geral, com o conhecimento adquirido em relação ao uso desta tecnologia aplicada à monitorização deste tipo de áreas, pode referir-se o seguinte:

- Caso uma encosta esteja orientada de forma, aproximadamente, perpendicular à linha de vista do radar, poderá ocorrer uma distorção das medidas/imagens, provocada por artefactos relacionados com a geometria de aquisição do radar (encurtamento/inversão/sombra), dependendo do ângulo de observação, mas, normalmente, não é possível dar resposta adequada a tal distorção;
- Caso uma encosta esteja coberta por vegetação, normalmente, a banda-L, devido ao elevado comprimento de onda, será a mais indicada para detetar deformações;
- Caso uma encosta esteja orientada, de modo a que as deformações previstas sejam segundo uma direcção paralela à trajetória do satélite, as deformações detetadas serão muito pequenas em comparação com as reais, pois o InSAR é essencialmente sensível à componente da deformação na linha de vista do radar.

### 6.2.1. Deslizamento de terras numa Encosta perto de Zilina (Eslováquia)

A encosta com deslizamentos próxima da cidade de Zilina (Eslováquia) está enquadrada pela rede de monitorização permanente dos sistemas de distribuição de água de Zilina. Foram processadas imagens ERS e Envisat ([Figura 44](#)) de modo a avaliar o potencial

das técnicas MT-InSAR, para serem integradas como técnicas complementares para monitorização desta área.

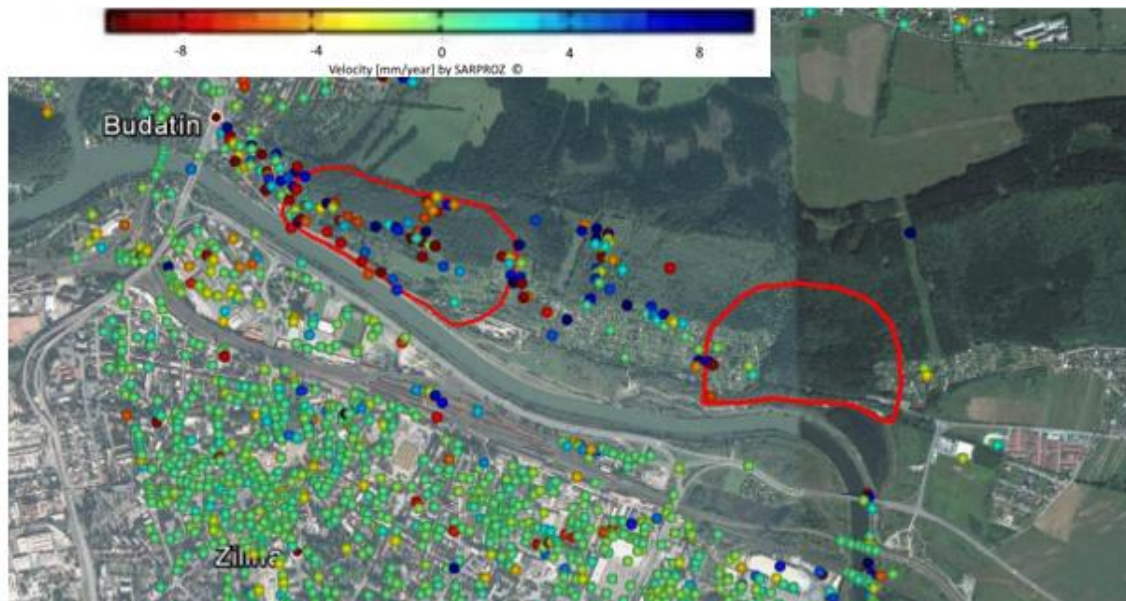


Figura 44 - Velocidades médias de deformação na linha de vista do sensor (mm/ano), como resultado da análise clássica de PSInSAR sobre deslizamento de encostas em zona urbana (marcadas com linha vermelha na imagem) em Zilina, Eslováquia.

Da análise efetuada, concluiu-se que a parte urbanizada de *Zilina* pode ser considerada estável, com poucas evidências de movimentos. No entanto aparece algum movimento significativamente mais elevado, que poderá indicar deformações locais. Os pontos divergentes foram, na sua maioria, confirmados como *outliers*, devido ao facto de o ruído interferométrico ser mais elevado e a coerência ser baixa, isto é, inferior a 0,7. Por outro lado, o principal alvo de interesse da análise (marcas a vermelho na imagem) mostra escassez de difusores persistentes, maior instabilidade e falta de homogeneidade no tempo e no espaço e, de uma maneira geral, valores baixos de coerência, e movimentos ascendentes e descendentes não naturais. Devido à baixa densidade de pontos, a área não foi avaliada como um todo e fez-se a análise recorrendo a séries temporais de cada ponto. Verificou-se que o sinal de deformação de muitos pontos correspondia à interpretação geológica, contudo, este processo foi complicado, especialmente, para pontos com coerência muito baixa.

Nos [Gráficos 1 e 2](#) pode verificar-se que a distribuição da base temporal é relativamente grande em alguns casos, o que poderá justificar a baixa coerência de alguns PS.

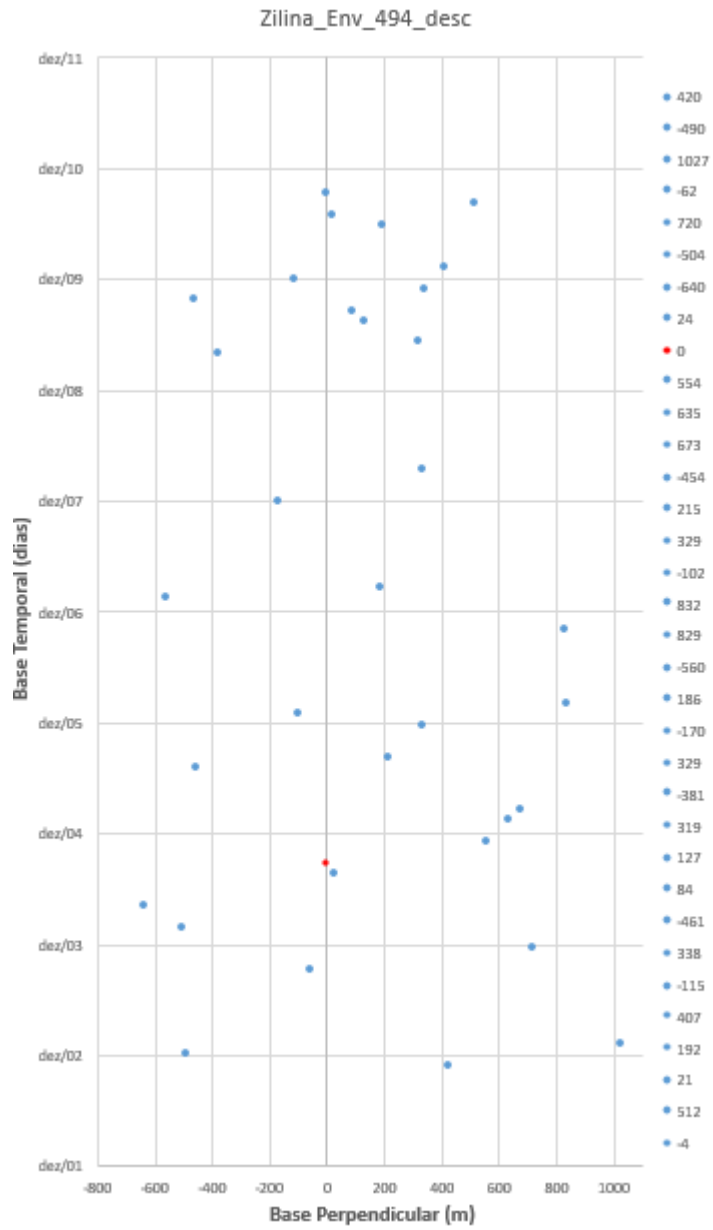


Gráfico 1 - Distribuição da linha de base perpendicular no conjunto de dados Envisat na trajetória 494 descendente. A marca vermelha representa a imagem master.

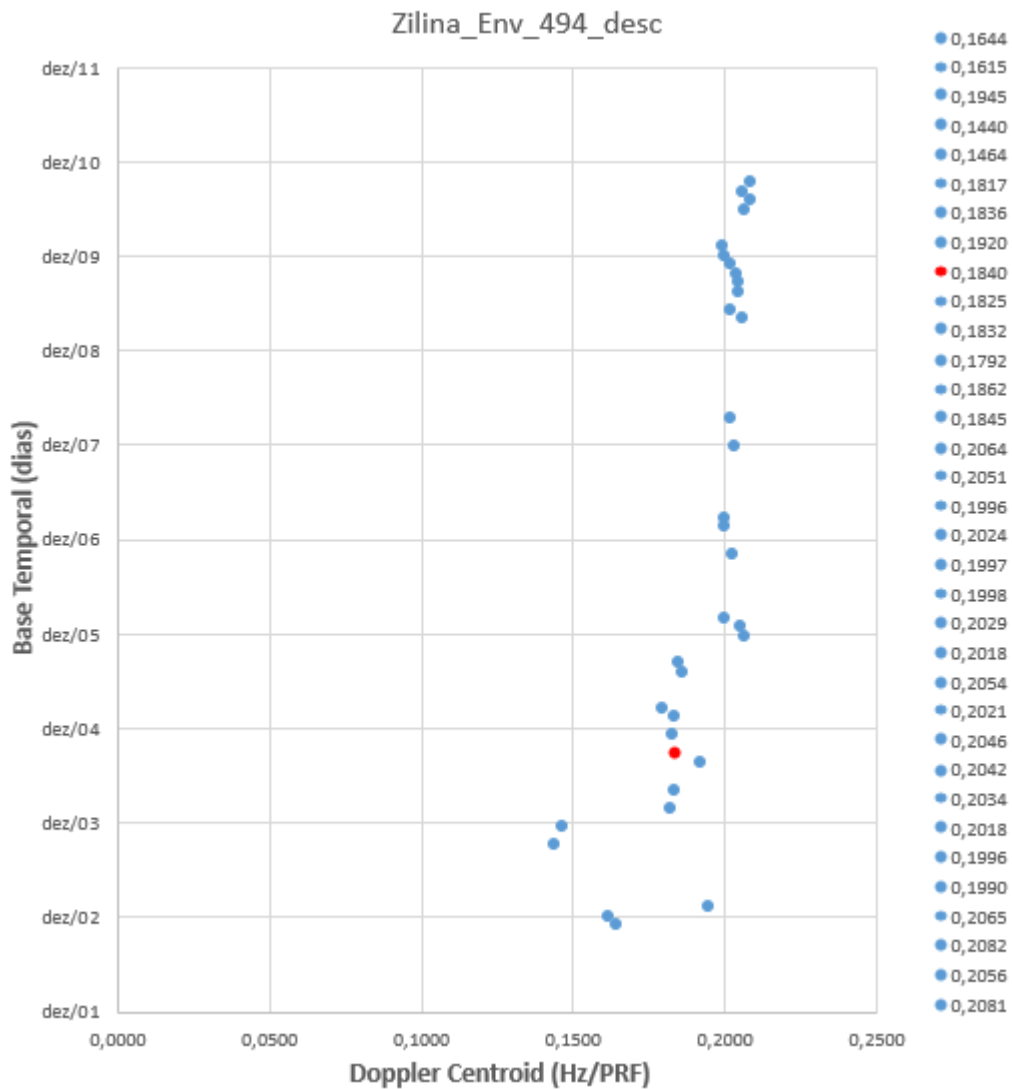


Gráfico 2 - Distribuição das diferenças do Centroide de Doppler, no conjunto de dados Envisat na trajetória 494 descendente. A marca vermelha representa a imagem master.

No caso da série temporal obtida com o satélite ERS na trajetória 222, (Gráfico 3) verifica-se que algumas imagens que formam os interferogramas têm bases perpendiculares muito grandes, o que contribui também para a baixa coerência dos pontos e para o erro na fase devido à variação do Centroide de Doppler (Gráfico 4).



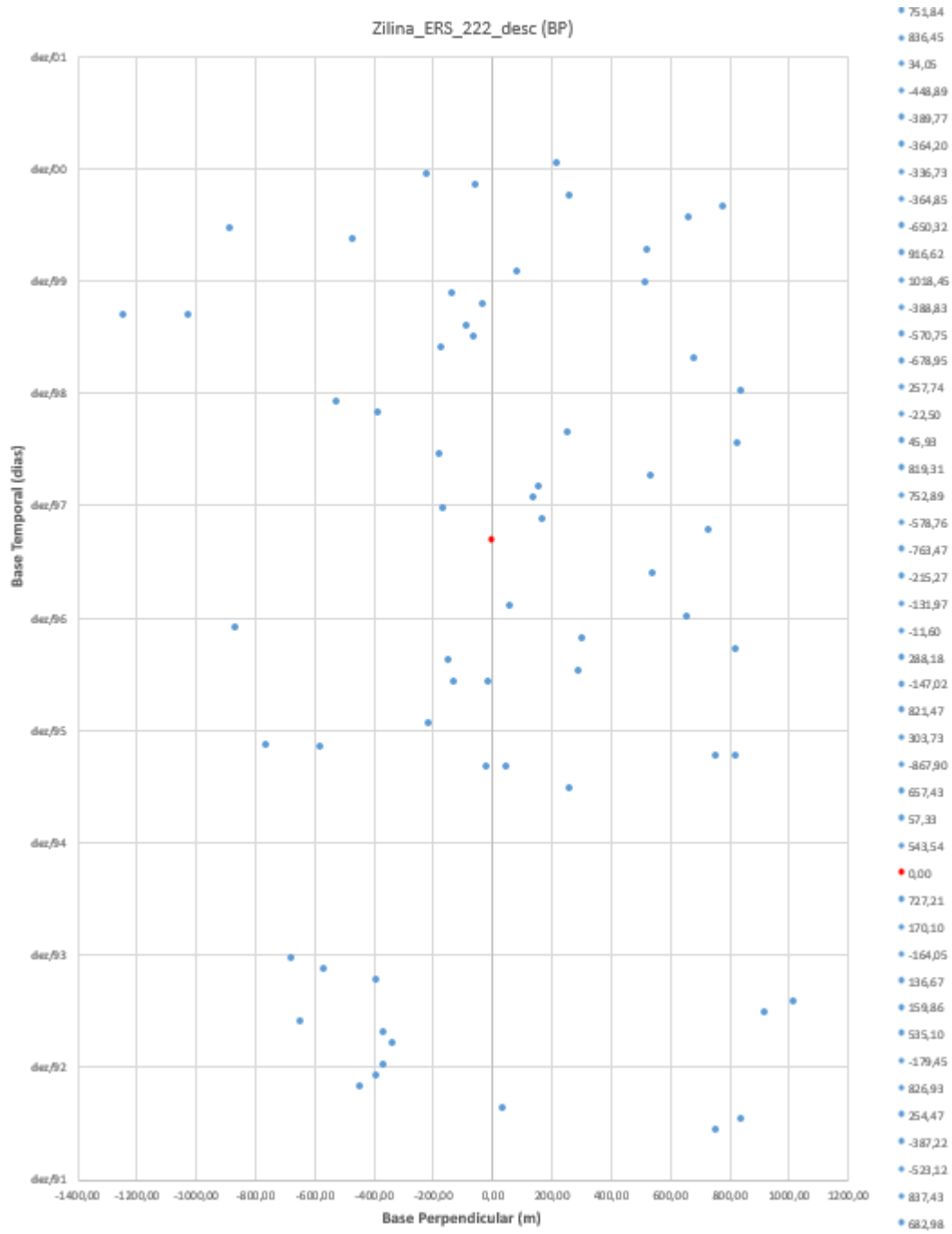


Gráfico 3 - Distribuição da linha de base perpendicular no conjunto de dados ERS na trajetória 222 descendente. A marca vermelha representa a imagem master.

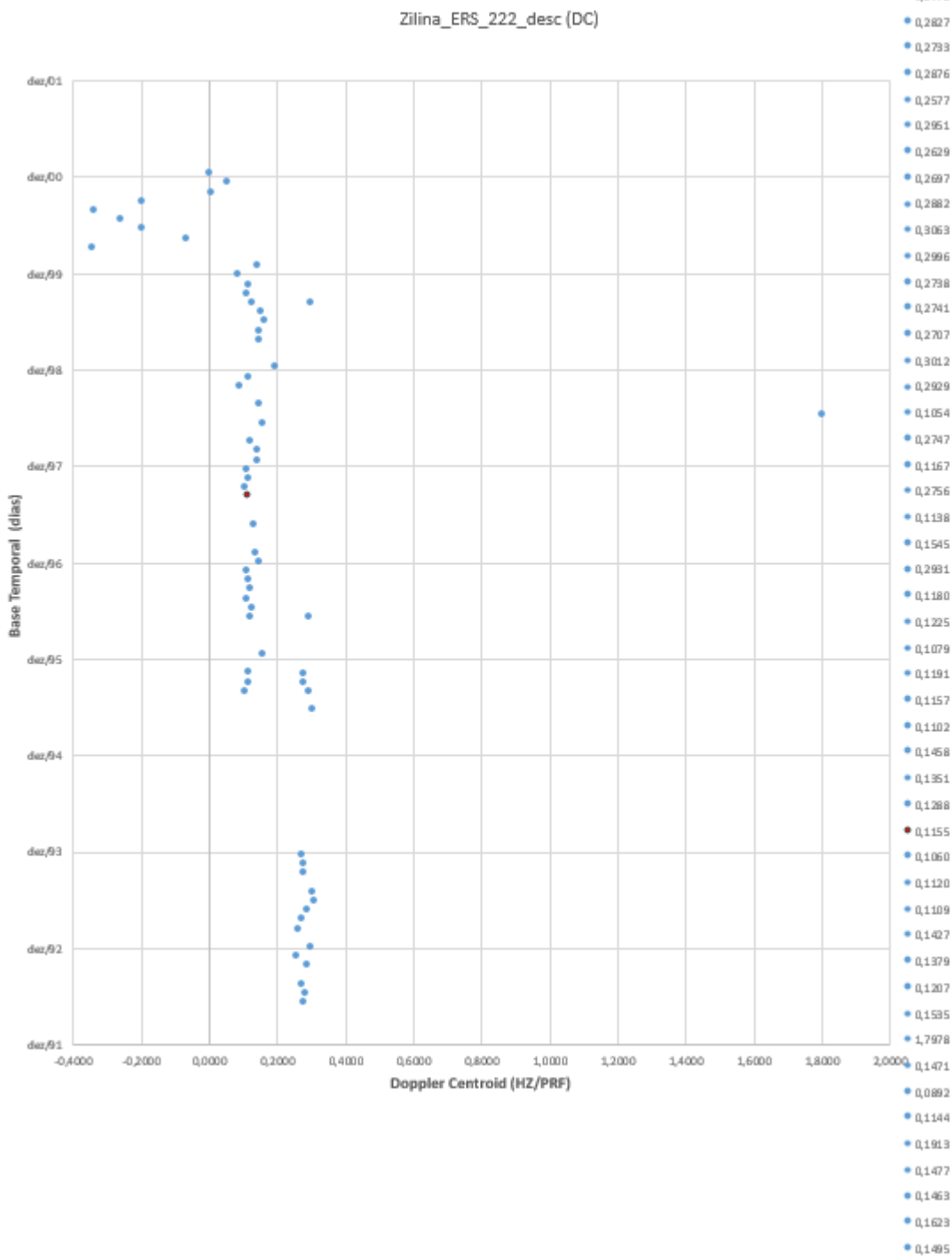


Gráfico 4 - Distribuição das diferenças do Centroide de Doppler, no conjunto de dados ERS na trajetória 222 descendente. A marca vermelha representa a imagem master.

### 6.2.2. Falha de Zafarraya-Serra Tejada Antiform, Cordilheira Bética (Espanha)

As cordilheiras Bética-Rif surgiram no Mediterrâneo ocidental, devido a deformações relacionadas com a divisão das placas tectónicas Euroasiática e Africana. A recente convergência das placas, no sentido NW-SE, originou o desenvolvimento simultâneo de grandes dobras e falhas, na parte central das zonas internas da Cordilheira Bética, continuando essa convergência ativa até ao presente. A elevação das cordilheiras está relacionada, sobretudo, com o desenvolvimento de dobras neste cenário de compressão regional. A Serra Tejada consiste num tipo de relevo relacionado com o desenvolvimento de uma forma complexa recente, localizada junto à faixa costeira. Na extremidade norte da Serra Tejada está situada a falha de Zafarraya, uma falha normal de ângulo elevado, inclinada para norte. É importante compreender a tectónica da falha de Zafarraya, uma vez que um dos mais devastadores terremotos da Península Ibérica (25 de dezembro de 1884) ocorreu ao longo desta falha (magnitude de 6,7). Tendo em conta estas características, investigou-se a aplicabilidade da InSAR, usando séries de dados dos satélites ERS-1/2 e Envisat ASAR para ajudar a restringir a ameaça geológica nesta parte da Cordilheira Bética. Foram usadas 24 imagens ERS-1/2 na trajetória 51 descendente e 27 imagens Envisat-ASAR na trajetória 459 ascendente, no período de 1992-2008. O método usado foi o StaMPS/MTI.

Através da observação detalhada do mapa de deformação ([Figura 45](#)), torna-se evidente uma forte tendência de deformação de -5 mm/ano na parte central da área estudada. Duas secções de subsidência nas estradas, que são observadas na região sudoeste, exigiriam uma análise mais aprofundada, avaliando-as como sendo áreas pequenas (desprezando perturbações atmosféricas, escolhendo diferentes pontos de referência, etc.) e comparando as velocidades estimadas com outros dados confiáveis da área, ou efetuando uma inspeção no terreno. A deteção de movimento da ordem de  $\pm 5$  mm/ano, usando a técnica InSAR impõe a exploração do seu potencial extremo, à medida que as velocidades de deformação atingem o nível de ruído.

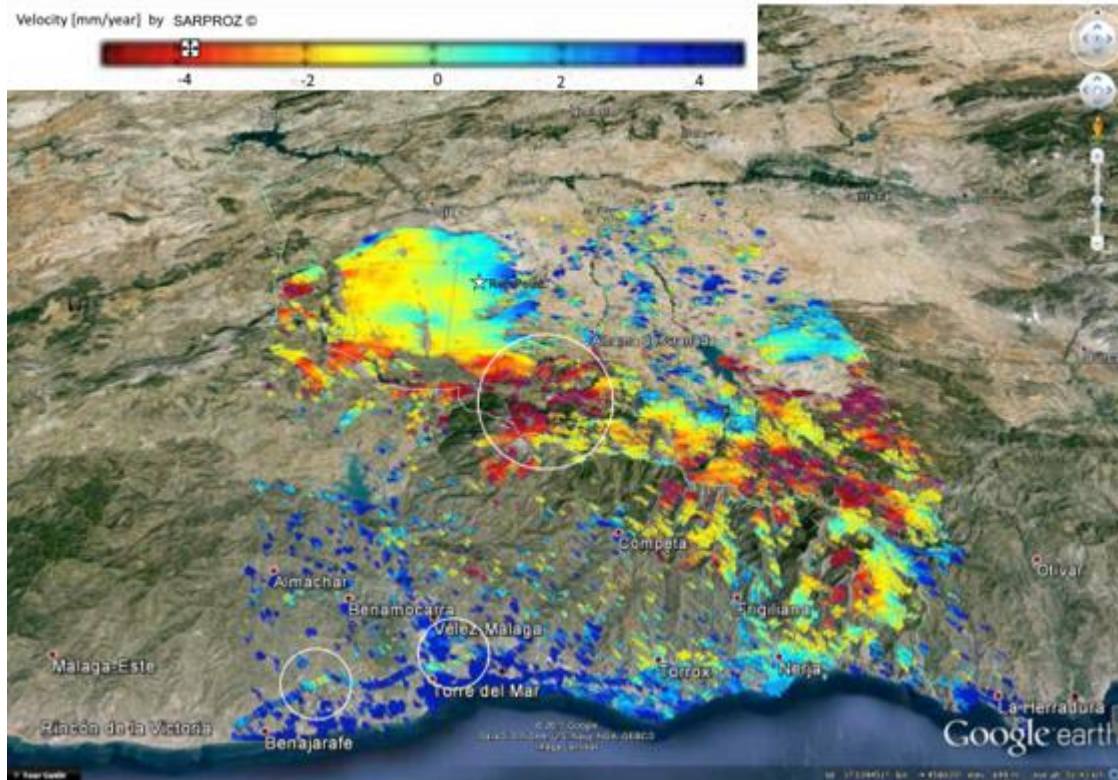


Figura 45 - Mapa de deformação da Sierra Tejeda antiforma, com indicação das zonas que sofrem maiores deformações (círculos brancos na imagem) em relação à área envolvente.

Assim, em algumas partes do mapa de deformação, e especialmente nas zonas cobertas por vegetação, os desvios podem corresponder à descorrelação temporal, à descorrelação geométrica e à ocorrência de erros residuais de processamento, tais como, erros orbitais não compensados ou efeitos atmosféricos de baixa frequência. Mesmo sendo uma área com uma topografia acentuada foi possível obter bastantes PS. Foi escolhida a zona de Serra Gorda para localização do ponto de referência (marca com estrela branca na imagem), visto ser uma área estável.

O processo de melhoria dos resultados implica a eliminação de imagens de radar que estejam muito afetadas pelo ruído atmosférico sendo, no entanto, oportuno, obter confirmação por parte de especialistas em geologia.

Para testar a aplicabilidade das técnicas InSAR em casos menos favoráveis, quer pela envolvente quer pela qualidade do *dataset* disponível, foram realizados testes em encostas e escombrelas que se apresentam a seguir. Juntamente com os resultados apresentados, propõe-se uma explicação possível para o facto de a técnica não ter resultado nesses casos ou para as deformações encontradas.

### 6.2.3. Escombreyras de Salamonde, Portugal

Para monitorização das Escombreyras de Salamonde, estavam disponíveis para processamento imagens dos satélites ASAR, ERS e ALOS, embora algumas não fossem adequadas para processamento MT-InSAR, devido a não ser possível formar interferogramas por causa do número reduzido de imagens, ou porque a AOI ficava na fronteira das imagens.

Foram usadas 20 imagens ASAR na trajetória 44 ascendente, no período de 2003 a 2007, e 21 imagens na trajetória 273 ascendente, no período de 2002 a 2007. O intervalo de tempo das imagens, nas duas trajetórias, sobrepõe-se e os métodos de processamento usados foram o método SBAS e a junção dos métodos PSI e SBAS, no StaMPS.

Na [Figura 46](#) são apresentados os mapas de velocidade de deformação nas duas trajetórias e para os dois métodos de processamento.

Devido à existência de muito ruído nas áreas com vegetação, foi efetuada bastante filtragem espaciotemporal, para alcançar o resultado apresentado. Ambas as trajetórias deveriam dar resultados semelhantes, mas verifica-se que a mesma área tem velocidades de deformação diferentes, consoante a trajetória, o que não era espectável. Deste modo, conclui-se que os resultados não podem ser considerados de confiança.

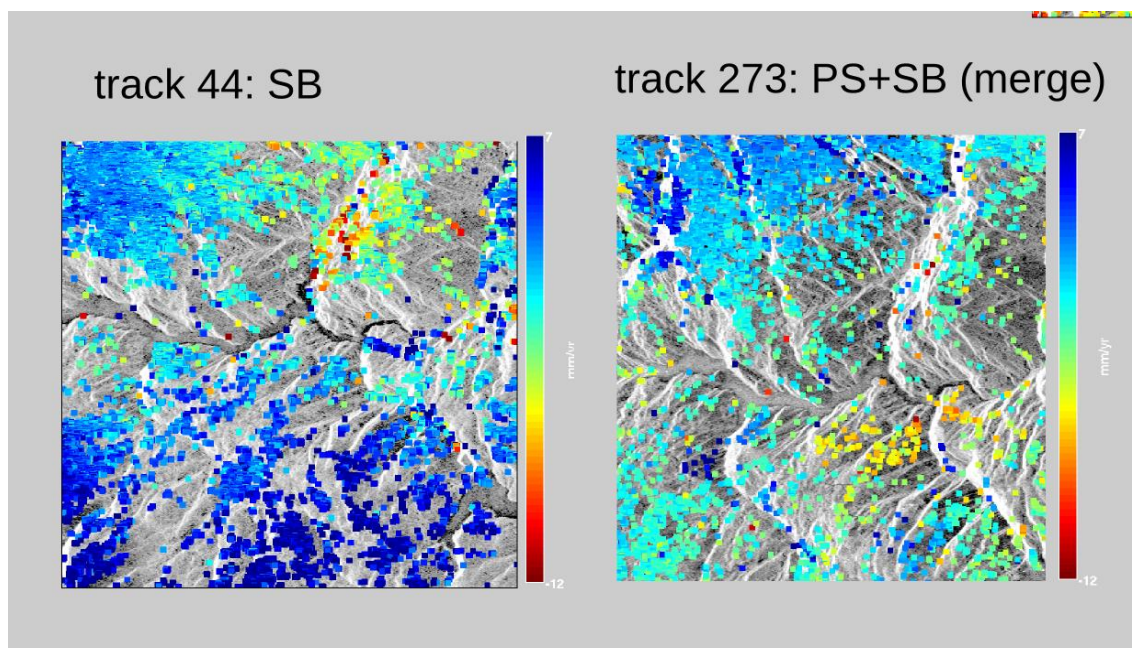


Figura 46 - Resultados do teste com o método SBAS em áreas descorrelacionadas, na envolvente da Escombreyra de Salamonde que mostram áreas com deformação suspeitas.



Na [Figura 47c e d](#), apresentam-se dois interferogramas obtidos na envolvente das escobreiras e da barragem de Salamonde (Água de Pala) com o ALOS PALSAR. Um interferograma com 46 dias de base temporal e o outro com 368 dias. Não se conseguiu efetuar a interpretação dos interferogramas, que se apresentam pouco claros do ponto de vista da deformação.

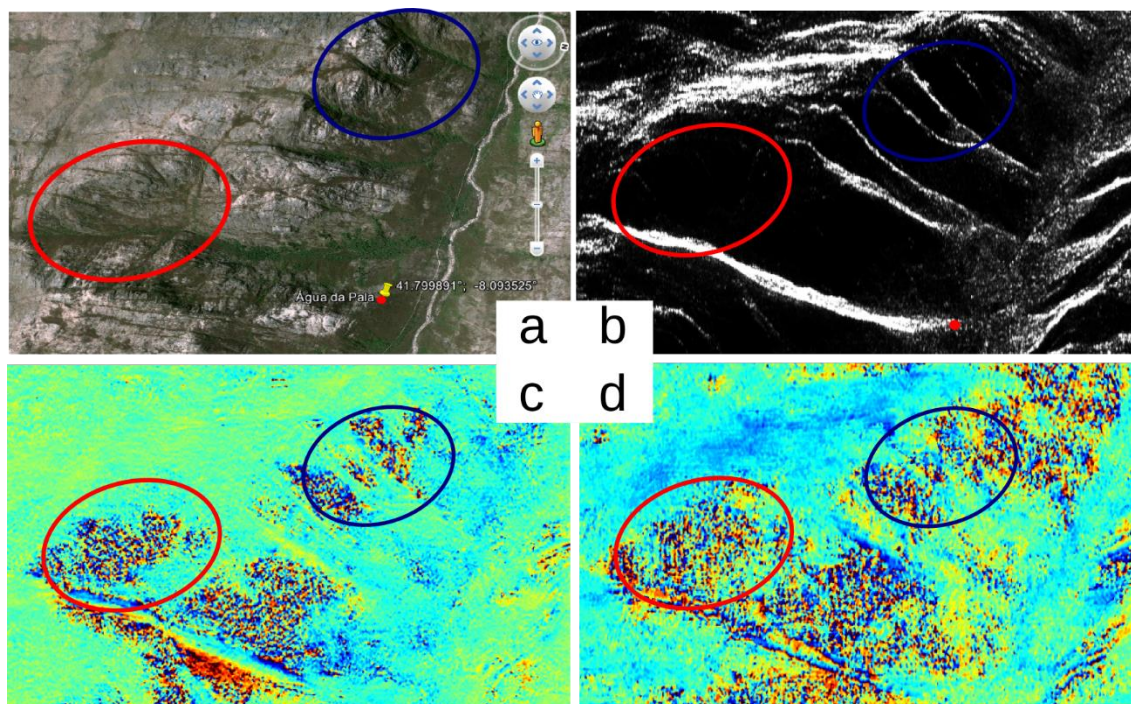


Figura 47 - Interpretação pouco clara de interferogramas: a) Mapa da situação na envolvente de, Agua da Pala (Google Earth), b) Imagem de intensidade media do conjunto de dados Alos Palsar na envolvente de Agua da Pala, c) Interferograma Alos Palsar de 2008-04-09 a 2008-05-25 (46 dias), d) Interferograma Alos Palsar de 2008-07-10 a 2009-07-13 (368 dias).

#### 6.2.4. Análise de Deformações no Município de Alfandega da Fé e área envolvente, Portugal

Na região de Alfandega da Fé, foi processada a área Municipal e a envolvente, onde se encontra localizada a encosta referida na secção seguinte. Na realização deste teste de processamento, foram usadas 47 imagens obtidas pelo satélite ERS entre 1995 e 2001, na trajetória 409 descendente do satélite.

O processamento foi efetuado usando a técnica Quasi-PSInSAR e foram obtidos alvos difusores persistentes e alvos parcialmente coerentes. A [Figura 48](#) mostra o mapa de velocidades de deformação da região, em mm/ano.

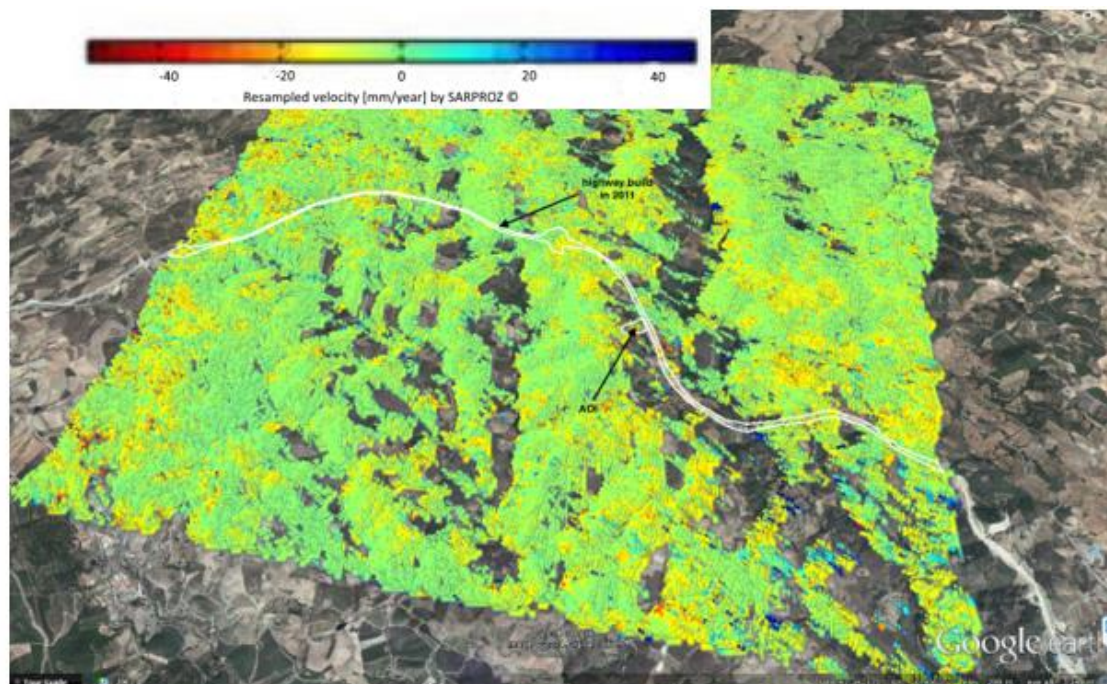


Figura 48 - Mapa de deformações sobre Alfândega da Fé e área envolvente, contendo as velocidades de deformação (mm/ano) na linha de visada do sensor.

Verifica-se que toda a extensão envolvente é bastante homogênea em questões de estabilidade do terreno, com velocidade anual aproximada de 1 cm. Verificam-se também pequenas áreas com velocidade de deformação que poderá atingir -4 cm de movimento descendente e ascendente.

### 6.2.5. Encosta de Alfandega da Fé no IC5, Portugal

Na altura da aquisição de imagens radar esta encosta da região de Alfandega da Fé estava coberta com alguma vegetação rasteiro, o que dificultou a monitorização baseada no processamento de imagens obtidas em comprimentos de onda pequenos, como por exemplo as imagens obtidas por sensores que usam a banda-C ( $\lambda = 5,6 \text{ cm}$ ). Sabendo que, quanto maior o comprimento de onda usado pelo sensor, maior será a penetração na matéria, então grandes comprimentos de onda penetram mais fundo no solo a monitorizar, facilitando a extração da informação no caso de estudo de deformações em zonas com vegetação. O comprimento de onda da banda-L, com aproximadamente 23 cm, tem essa característica de melhor captar a informação do solo com cobertura vegetal. Foi esse o principal motivo que levou a selecionar imagens do sensor PALSAR para este trabalho, que apresenta, ainda, a vantagem de ter resolução

espacial de cerca de 10 m, melhor que os 25 m da banda-C. Em suma este sensor é considerado como o mais adequado para análise de áreas com vegetação (sobretudo rasteiro) onde possam ocorrer deslizamentos de terras, etc.

No processamento da encosta, foram utilizadas 15 imagens (todas as disponíveis), obtidas pelo sensor PALSAR, a bordo do satélite ALOS, na trajetória 6, ascendente.

As imagens foram obtidas entre dezembro de 2006 e março de 2011, sendo, assim, defasadas em tempo em relação às medições geodésicas providenciadas pela empresa Norvia, responsável por essas observações geodésicas no local. As observações geodésicas são importantes para avaliar ou validar resultados do processamento InSAR, com a condição de terem as épocas de observação o mais próximo possível. Neste caso, as observações geodésicas existentes foram efetuadas em abril de 2014 e em julho de 2014 e reportadas às observações efetuadas nas épocas de dezembro de 2011 e dezembro de 2012. Essas épocas, dezembro 2011 e 2012, foram consideradas épocas de referência na aplicação do método de comparação de coordenadas. Método usado habitualmente para avaliar resultados de deslocamentos com observações geodésicas, ([ver secção 2.2](#)).

No processamento InSAR desta área, foi selecionado para ponto de referência (PR) um ponto do topo da encosta em análise, sem informação prévia de possíveis movimentos, assumindo-se esta localização como sendo estável. Nos casos em que se verifique que há deslocamento do ponto de referência, o valor desse deslocamento tem de ser adicionado ao movimento de cada um dos pontos da obra a analisar.

As [Figuras 49, 50, 51 e 52](#) apresentam os resultados do processamento InSAR. Foi processada uma área maior do que a ilustrada na imagem, pelo que, nem todas as cores da escala de cores aparecem na imagem.

A confiança de um ponto em metodologias de processamento InSAR, é frequentemente interpretada pelo valor dado pela coerência. A coerência é um número com valor mínimo zero e valor máximo 1 (alta coerência). O que significa que, quando a coerência de um ponto é alta a descorrelação temporal é baixa. Habitualmente, apenas são apresentados os pontos, com coerência superior a 0,7. Contudo, é a coerência, mais do que a confiança, que corresponde à forma como as séries temporais da deformação do ponto se ajustam ao modelo. O modelo assume, habitualmente, uma deformação temporal linear, o que não é esperado neste caso. Assim, decidiu-se estabelecer o limite inferior da coerência igual a 0,4 e para além de se interpretarem as velocidades, interpretaram-se, também, as séries temporais.



Os valores da coerência dos pontos na área de interesse, estão indicados na [Figura 49](#), mas os pontos com coerência inferior a 0,4 não aparecem na [Figura 49](#), nem nas [Figuras 50 e 51](#).

É possível que haja erros de georreferenciação, devido à inexistência nesta área de pontos para orientação ou de Pontos de Controlo no terreno (GCP- Ground Control Points) que sejam visíveis na imagem radar.

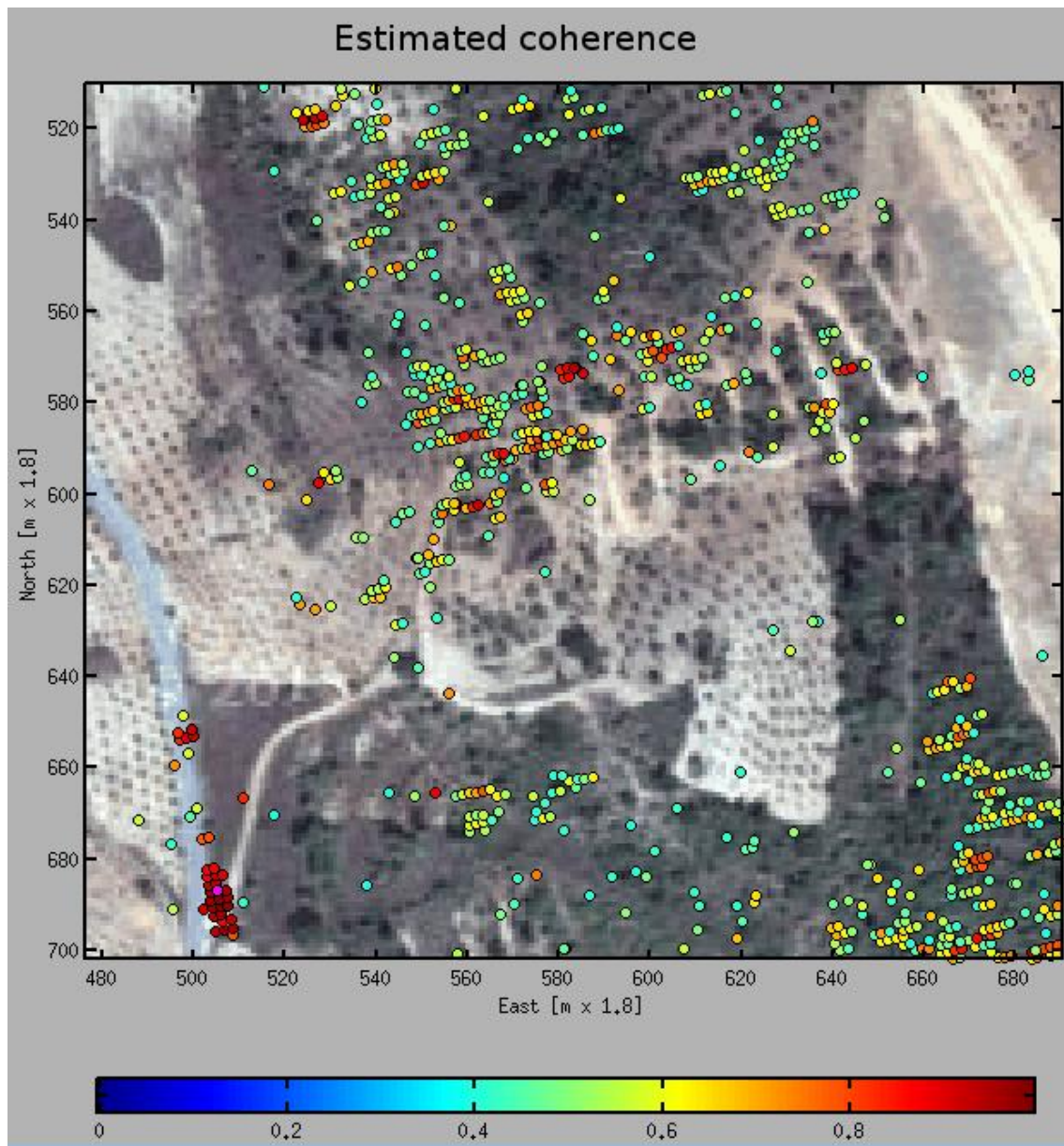


Figura 49 - Coerência estimada na área de interesse. Foi definido o limite inferior de 0,4 para a coerência pelo que os pontos com coerência inferior a 0,4 não são apresentados na imagem. O ponto de referência (PR) aparece a cor-de-rosa na imagem.

Apesar da maioria dos pontos terem sido bem estimados há pontos na figura com altitudes estimadas incorretamente e como consequência para esses pontos a velocidade do movimento, também é geralmente incorreta. A estimativa do valor da altitude do alvo influencia a estimativa do deslocamento.

A técnica PS apresenta uma precisão alcançável de cerca de 1 m na estimativa de altura de um alvo (Perissin, 2008) e 1 mm na estimativa do deslocamento do alvo (Ferretti, et al., 2007).

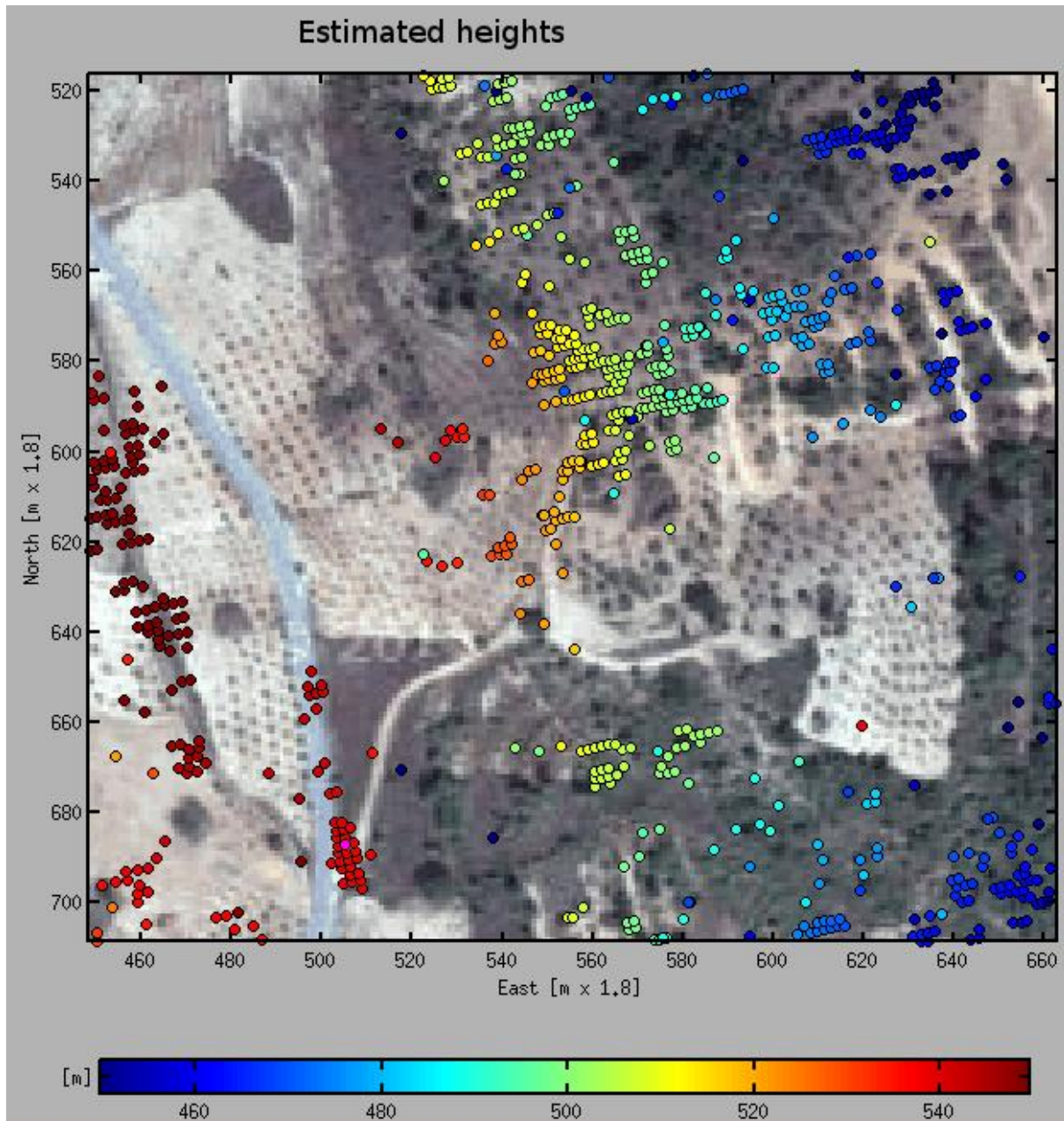


Figura 50 - Altitudes estimadas para a área de interesse. As altitudes foram estimadas usando o MDT obtido a partir do SRTM na banda-X, com resolução de 1 segundo de arco e, aparentemente, a maioria dos pontos foram bem estimados.



A velocidade da deformação estimada, e os pontos para os quais foram calculadas as séries temporais, são apresentados na [Figura 51](#).

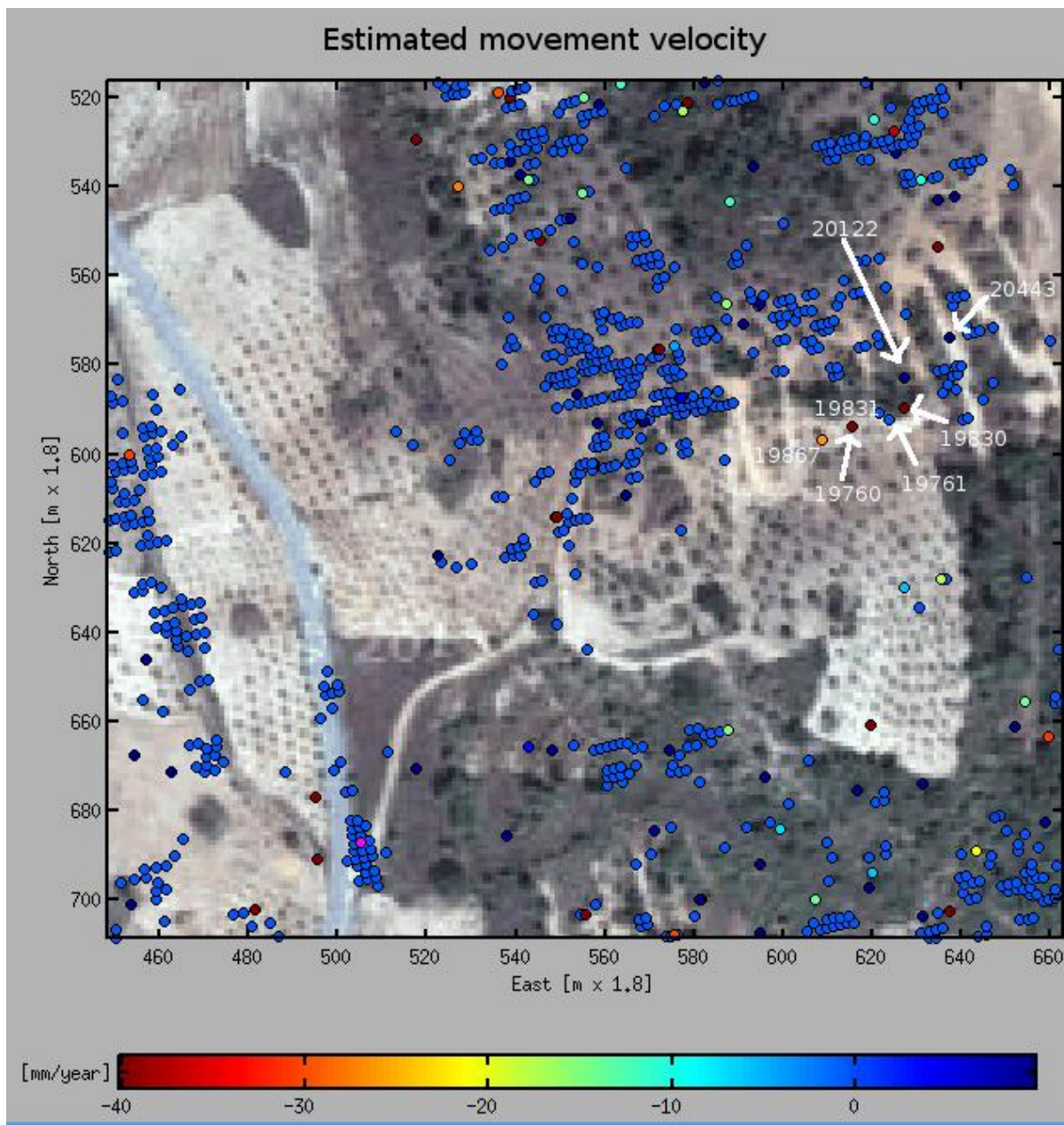


Figura 51 - Velocidade da deformação na linha de vista do sensor (LOS). O ponto de referência está assinalado a cor-de-rosa.

Da análise da [Figura 51](#), verifica-se que a maior parte da área é estável. O número reduzido de pontos que indicam movimento, corresponde a pontos cuja altitude foi incorretamente estimada, porque entre pontos vizinhos existem grandes diferenças de altitude, pelo que a estimativa do seu movimento não é fiável (ver [Figura 50](#))

Existem alguns pontos coloridos na [Figura 51](#), cuja altitude aparenta ter sido estimada de modo correto. Esses pontos estão assinalados com cor branca e têm a numeração

de 19760, 19761, 19830, 19831, 19867, 20122 e 20443. As séries temporais desses pontos são apresentadas na [Figura 52](#).

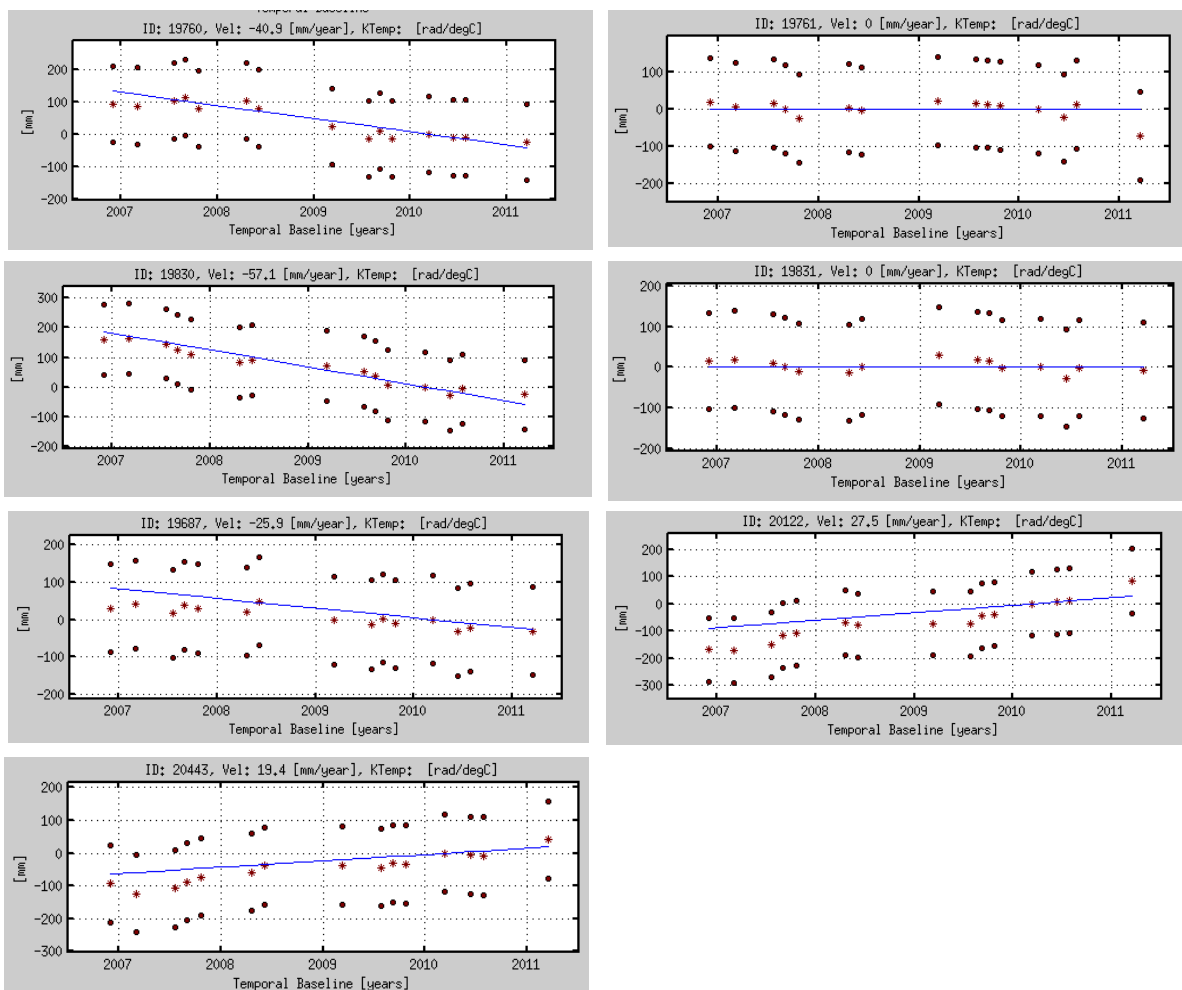


Figura 52 - Séries temporais da deformação estimada, na linha de vista do sensor.

Em cada uma das séries temporais apresentadas na [Figura 52](#), os asteriscos vermelhos indicam a deformação estimada ao longo do tempo, a linha azul representa a velocidade correspondente aos pontos assinalados com asterisco vermelho e os pontos pretos indicam a ambiguidade da fase (possivelmente substituída pela informação representada nos asteriscos vermelhos). Deve, no entanto, sublinhar-se que a ambiguidade da fase é metade do comprimento de onda do radar, (aproximadamente 12cm para o sensor ALOS) e uma variação dessa ordem de grandeza não se verifica em nenhum local dentro desta área.

Os pontos 19831 e 19761 aparentam ser estáveis, os pontos 20122 e 20443 apresentam um movimento ascendente de 2-3 cm/ano e os restantes três pontos apresentam um movimento descendente na ordem de 2-6 cm/ano. De notar que, a altitude estimada do ponto 19830 foi mal calculada, tal como se conclui pela comparação com os pontos próximos, pois comparativamente com esses pontos adjacentes, tem maior altitude e conseqüentemente maior variação anual, de 5,71 cm/ano. Considera-se este valor bastante elevado tendo em conta que a coerência do ponto é relativamente boa, acima de 0,6.

É muito provável que, durante o período de monitorização (dezembro de 2006 a março de 2011), a área se encontrasse estável, uma vez que os pontos, para os quais foi estimado o movimento, estão dispersos. Contudo, é igualmente possível que a faixa a sul da área de interesse esteja a deslizar, mas a sensibilidade do SAR na direção Norte Sul é baixa.

O ruído, à semelhança do que aconteceu com a estimativa incorreta da altitude, pode ter sido originado por haver um número reduzido de imagens, o que não permite obter informação redundante suficiente na aplicação das técnicas de ajustamento. No [anexo 5](#), apresenta-se informação sobre a distribuição das linhas de base perpendicular, temporal e a diferença do Centroide de Doppler.

A técnica InSAR é, por princípio, adequada para medir deslocamentos, apenas na linha de vista do sensor radar (LOS). Caso a direção do deslocamento seja conhecida, o movimento obtido na direção LOS pode ser convertido para essa direção (de qualquer forma, a deformação LOS medida para qualquer outra direção, é menor). O índice entre a deformação LOS e o movimento “real” (conhecendo a direção do movimento) é designado de sensibilidade.

Na maioria dos satélites SAR, a sensibilidade é maior na direção vertical, sendo que, na direção horizontal, é relativamente elevada na direção este-oeste. Neste caso, o ângulo de incidência é relativamente elevado (38 graus) e, como tal, a sensibilidade é elevada, assumindo que as deformações acontecem na direção descendente da encosta, na maior parte da área de estudo, entre 70% e 85% da área. De forma a calcular as altitudes, para posteriormente obter o deslocamento na direção descendente da encosta, foi usado, como MDT, o SRTM da Banda X, com resolução de 1 segundo de arco (~30 m).



### 6.2.5.1. Comparação com Observações Geodésicas

A comparação dos resultados InSAR com os resultados geodésicos neste caso não pode ser feita diretamente, sobretudo devido ao facto de se reportarem a diferentes períodos de tempo. Por outro lado, um deslizamento de terras deste tipo não poderá ser assumido como linear no tempo. As marcas geodésicas estão identificadas usando a terminologia (M-x) e (y-A) em que “x” varia de 1 a 15, para as marcas observadas na época de referência de dezembro de 2011 e “y” varia de 16 a 27, para as marcas observadas na época de referência de dezembro de 2012 (Figura 53 e Tabela 3).

O referencial de coordenadas retangulares estabelecido, indica que a direção do eixo dos MM (XX) é paralela à direção descendente da encosta e a direção do eixo dos PP (YY) é perpendicular.

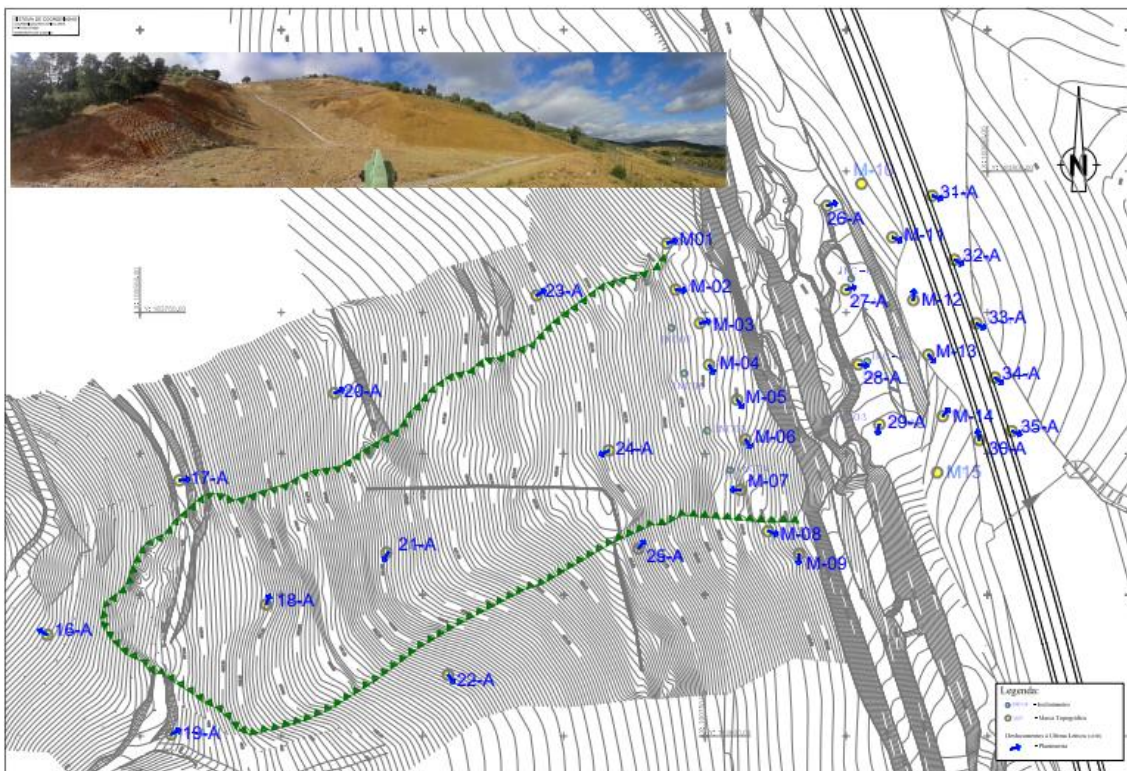


Figura 53 - Localização das marcas geodésicas na encosta a estudar. Fonte: Norvia

Como se deprende dos dados geodésicos (Tabela 3), usando a deformação total calculada entre a época de referência (dezembro de 2011 e dezembro de 2012) e a última época de observação, julho de 2014 (um ano e meio e dois anos e meio de intervalo de tempo, respetivamente), as deformações são maiores na parte superior e na parte central da área e acontecem, maioritariamente, na direção descendente da

encosta, eixo dos XX. O movimento na direção do eixo dos XX é maior para a maioria dos pontos. A marca que indica o ponto 21-A foi a única que se moveu significativamente para norte (0,231 m) e o seu movimento na direção descendente da encosta (0,752m) e vertical (-0,395m) é superior ao de todos os outros pontos. A sensibilidade InSAR na direção norte-sul (eixo dos YY) é baixa, não possibilitando a melhor análise comparativa para este ponto.

Tabela 3 - Observações Geodésicas da encosta no IC5.

Fonte: Norvia

ESTAÇÕES DE APOIO		NV-01	IC5-306		NCV3-10		Data julho 14						
M(m)		100743.336		184005.770		389.967	Hora 10h						
P(m)		100839.871		183971.110		383.310	Temp. 15°C						
Cota(m)		100742.866		184001.278		388.869							
OBSERVAÇÕES													
Nome	Observações-Época de Referência			Data	Observação Atual (julho 2014)			Deslocamento à Referência			Desloc. à última observ.		
	M(m)	P(m)	Cota(m)		M(m)	P(m)	Cota(m)	ΔM(m)	ΔP(m)	ΔCota(m)	ΔM(m)	ΔP(m)	ΔCota(m)
M01	100736,669	183774,491	398,090	dez/11	100736,682	183774,528	398,087	0,013	0,037	-0,003	0,066	0,019	0,017
M02	100739,640	183758,106	398,400	dez/11	100739,630	183758,084	398,367	-0,010	-0,022	-0,033	0,036	-0,004	0,019
M03	100748,247	183746,170	396,940	dez/11	100748,289	183746,165	396,839	0,042	-0,005	-0,101	0,080	0,019	0,015
M04	100751,492	183731,463	396,870	dez/11	100751,464	183731,455	396,806	-0,028	-0,008	-0,064	0,008	-0,016	0,004
M05	100761,428	183719,096	394,490	dez/11	100761,394	183719,104	394,459	-0,034	0,008	-0,031	0,002	-0,003	0,004
M06	100764,372	183705,034	394,510	dez/11	100764,365	183705,007	394,449	-0,007	-0,027	-0,061	0,004	-0,006	0,002
M07	100762,571	183687,214	394,060	dez/11	100762,622	183687,204	393,985	0,051	-0,010	-0,075	-0,034	0,000	-0,002
M08	100772,421	183672,516	392,070	dez/11	100772,386	183672,534	392,064	-0,035	0,018	-0,006	0,011	-0,004	0,002
M09	100783,460	183664,437	389,410	dez/11	100783,403	183664,455	389,399	-0,057	0,018	-0,011	-0,003	-0,026	-0,001
M10	Marco destruído												
M11	100816,409	183776,618	378,03	dez/11	100816,378	183776,646	378,038	-0,031	0,028	0,008	0,002	-0,001	0,009
M12	100823,806	183754,358	377,7	dez/11	100823,774	183754,388	377,706	-0,032	0,030	0,006	0,001	0,015	0,010
M13	100829,084	183735,014	377,07	dez/11	100829,048	183735,045	377,079	-0,036	0,031	0,009	0,006	-0,007	0,021
M14	100834,167	183713,258	374,89	dez/11	100834,159	183713,308	374,881	-0,008	0,050	-0,009	0,027	0,031	0,008
M15	Marco destruído												
16-A	100517,153	183635,865	485,123	dez/12	100517,163	183635,879	485,136	0,010	0,014	0,013	-0,007	0,004	0,034
17-A	100563,897	183690,544	467,264	dez/12	100563,916	183690,55	467,240	0,019	0,006	-0,024	0,018	0,002	0,006
18-A	100594,689	183646,587	448,295	dez/12	100594,698	183646,607	448,271	0,009	0,020	-0,024	0,008	0,023	0,009
19-A	100560,983	183600,593	469,370	dez/12	100560,995	183600,605	469,357	0,012	0,012	-0,013	0,004	0,002	0,016
20-A	100618,838	183721,41	442,265	dez/12	100618,862	183721,386	442,144	0,024	-0,024	-0,121	0,017	0,008	-0,004
21-A	100637,213	183664,948	429,229	dez/12	100637,965	183665,179	428,834	0,752	0,231	-0,395	-0,012	-0,020	0,034
22-A	100659,013	183621,693	442,866	dez/12	100659,064	183621,692	442,745	0,051	-0,001	-0,121	0,009	-0,012	0,004
23-A	100690,413	183756,033	414,513	dez/12	100690,420	183756,023	414,381	0,007	-0,010	-0,132	0,005	0,003	-0,013
24-A	100715,998	183701,147	402,515	dez/12	100716,010	183701,137	402,390	0,012	-0,010	-0,125	-0,004	-0,002	-0,004
25-A	100726,452	183666,354	410,720	dez/12	100726,494	183666,365	410,587	0,042	0,011	-0,133	0,010	0,013	-0,001
26-A	100793,187	183787,769	384,243	dez/12	100793,265	183787,805	384,133	0,078	0,036	-0,110	0,036	0,011	0,002
27-A	100799,952	183758,058	385,370	dez/12	100799,951	183758,054	385,323	-0,001	-0,004	-0,047	0,015	-0,011	0,022
28-A	100804,256	183731,587	385,844	dez/12	100804,263	183731,57	385,842	0,007	-0,017	-0,002	0,034	-0,005	0,009
29-A	100811,767	183710,383	383,905	dez/12	100811,735	183710,367	383,904	-0,032	-0,016	-0,001	-0,003	-0,015	-0,006
30-A	100847,181	183704,819	370,993	dez/12	100847,157	183704,819	370,995	-0,024	0,000	0,002	-0,001	0,005	0,01
31-A	100830,473	183791,321	376,750	dez/12	100830,464	183791,323	376,734	-0,009	0,002	-0,016	0,008	-0,003	0,009
32-A	100838,331	183768,687	375,316	dez/12	100838,320	183768,689	375,307	-0,011	0,002	-0,009	0,007	-0,004	0,009
33-A	100846,056	183746,169	373,899	dez/12	100846,044	183746,17	373,894	-0,012	0,001	-0,005	0,008	-0,005	0,01
34-A	100852,636	183726,960	372,558	dez/12	100852,622	183726,962	372,561	-0,014	0,002	0,003	0,004	-0,003	0,017
35-A	100858,620	183707,974	371,180	dez/12	100858,609	183707,976	371,174	-0,011	0,002	-0,006	0,008	-0,003	0,009

A [Figura 54](#) mostra a deformação estimada pela técnica InSAR, na direção descendente da encosta, juntamente com a estimativa da deformação geodésica. De referir que estão envolvidos dois sistemas de referência, potencialmente, diferentes: o Sistema de Referência Terrestre Europeu ETRS89; e o Sistema Geodésico Global WGS84 (ETRS89 em relação ao WGS84). Contudo, o ETRS89 pode ser considerado o WGS84 em Portugal, o que significa que as diferenças entre os dois sistemas podem ser desprezadas.

Os resultados InSAR mostram que a maior parte da área de interesse se encontrava estável durante o período de dezembro de 2006 a março de 2011. Os movimentos descendentes são possíveis, ainda que improváveis na parte sul da área de interesse (entre os pontos 21-A, 24-A e 25-A), sendo na ordem dos 2-6 cm/ano. Os movimentos são, igualmente, possíveis nas áreas onde não aparecem pontos, pois podem não estar correlacionados, devido ao movimento não-linear, ou porque a estrutura visível à superfície mudou significativamente.

A deformação total estimada pelos métodos geodésicos, em mm, nos períodos temporais de dezembro de 2011 e 2012 a julho de 2014 nos pontos (M-x) e (y-A) respetivamente, é comparável com a velocidade de deformação estimada por InSAR (mm/ano), na direção descendente da encosta embora ambos os conjuntos de medidas fossem realizados em diferentes períodos temporais (não sobrepostos). Na [Figura 54](#), os pontos estimados por métodos geodésicos estão marcados com círculos grandes, brancos e azuis e os pontos InSAR estão marcados com círculos pequenos, em que o tamanho do círculo representa a coerência dos pontos (quanto maior o círculo, mais confiável é o ponto). No caso InSAR a cor do ponto corresponde à velocidade de movimento estimada (a velocidade negativa corresponde ao movimento da encosta no sentido descendente, a velocidade positiva corresponde ao movimento da encosta no sentido ascendente). O ponto de referência InSAR está marcado com um pentágono verde e é assumido como estável. De realçar, que os pontos que foram estimados com altitude incorreta foram excluídos, manualmente, desta imagem, mas apenas para a área de interesse.



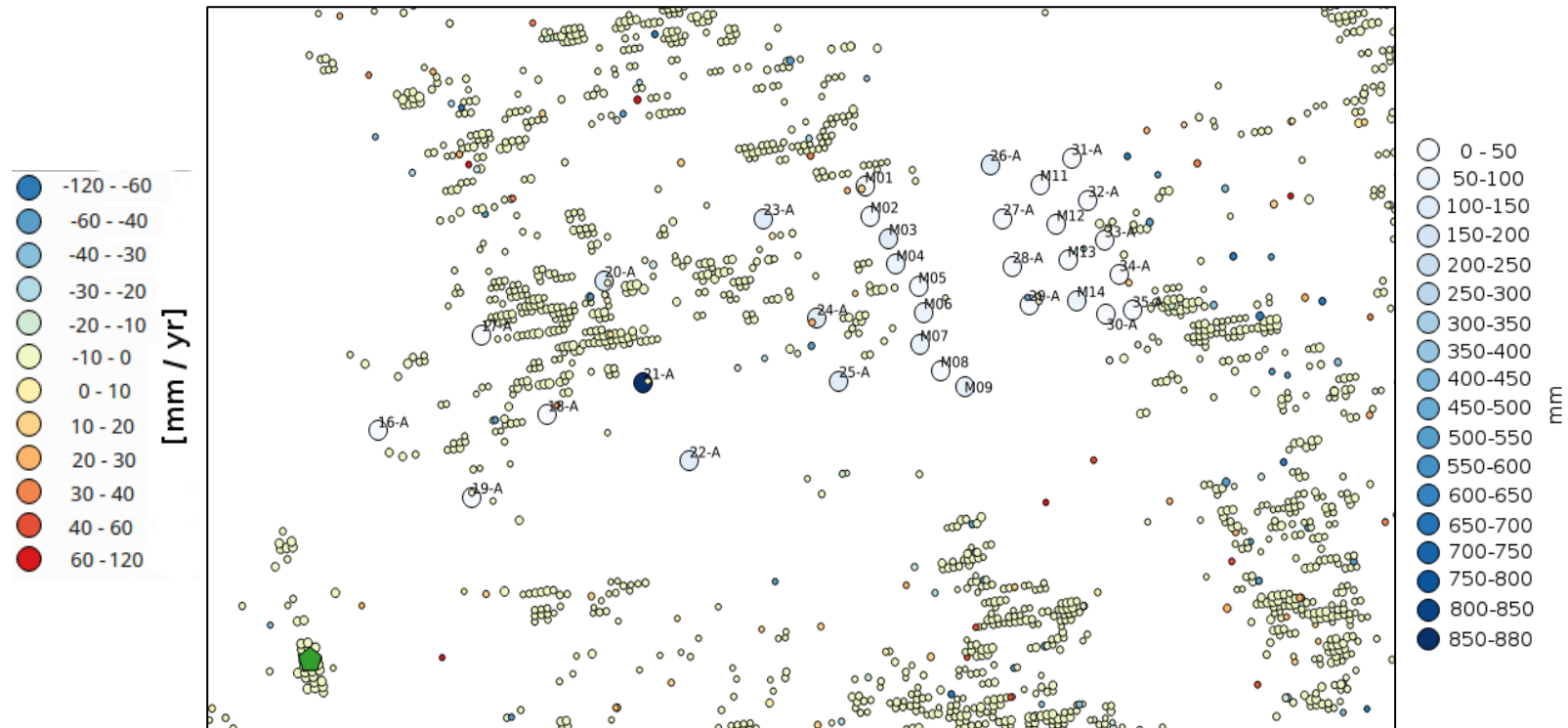


Figura 54 - Deformação estimada por InSAR, juntamente com a deformação obtida com os dados geodésicos. A escala de cores do lado esquerdo é para os resultados InSAR e do lado direito para os resultados geodésicos.

Em suma o objetivo desta análise é compreender se a área está a deslizar, devido à construção de uma estrada (iniciada em 2010), ou se já era instável anteriormente. As medições geodésicas demonstram existir instabilidade no terreno que atinge, dezenas de centímetros, contudo esta instabilidade não é linear no tempo, sendo, também, variável no espaço.

Como já referido, o conjunto de dados contém 15 imagens, obtidas pelo satélite ALOS PALSAR (banda-L), entre dezembro de 2006 e março de 2011. Maioritariamente, existem linhas de base temporais e perpendiculares longas no conjunto de dados, mas podem ser encontrados alguns pares/subconjuntos de linhas de base curtas. O processamento PSInSAR falhou, mesmo com a seleção de um diagrama formado por linhas de base mais curtas entre as imagens, devido à não-linearidade dos movimentos. Os resultados indicam que, aparentemente, a área se encontra estável e os pontos da área, identificados como instáveis (Figura 55), foram excluídos, devido à baixa coerência.

A configuração das linhas de base, temporal e espacial, relativas aos interferogramas criados pelo conjunto de imagens usado é apresentada na Figura 55.

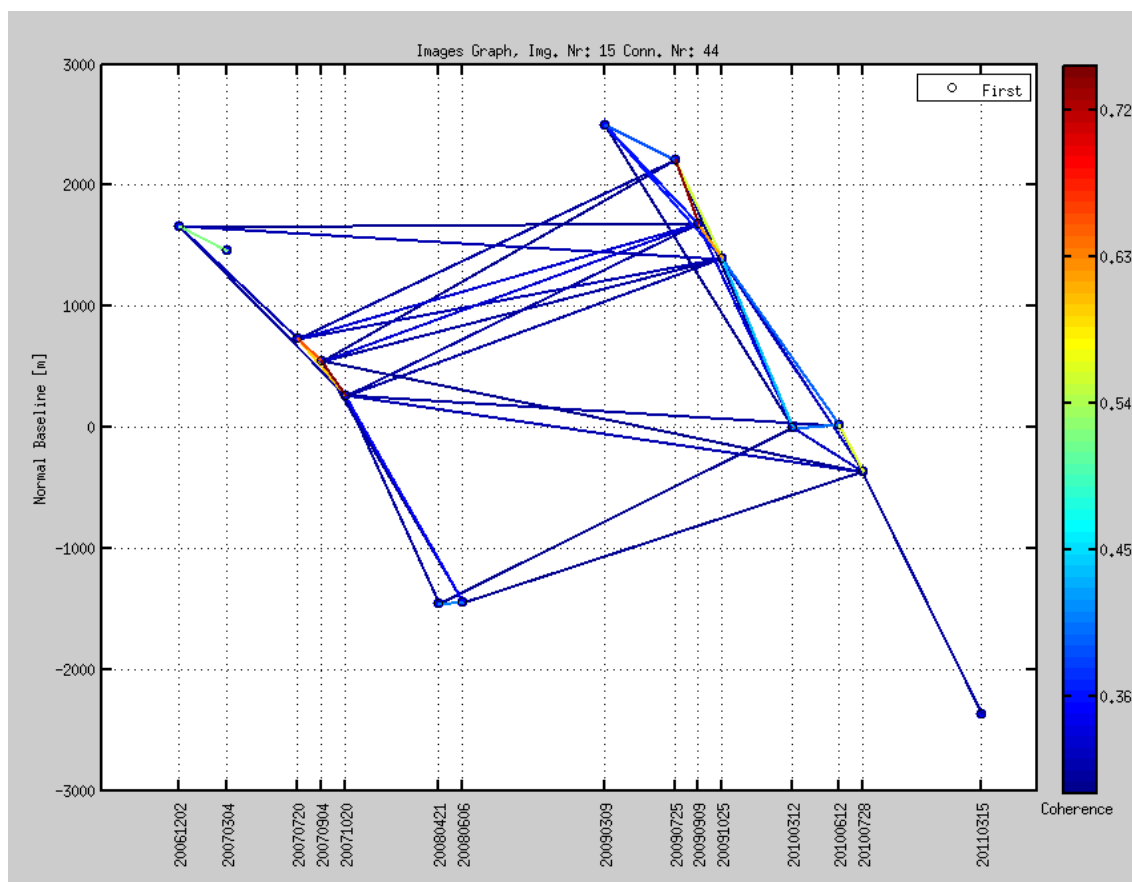


Figura 55 - Configuração do conjunto de dados. Os pontos representam as imagens disponíveis, as linhas representam os interferogramas.

Analisando a [Figura 55](#), é possível concluir que as linhas de base perpendiculares, entre a imagem de março 2011 e as anteriores de 2010, são bastante longas. Isso é suficiente para serem influenciadas pelo erro do MDT pelo que, não faz sentido formar interferogramas considerando essa imagem. Assim, foram analisados interferogramas coerentes (particularmente os que tinham a linha de base perpendicular pequena), de modo a perceber se seria possível detetar algum movimento, sobretudo durante o período, imediatamente, anterior à construção da estrada. A juntar a um movimento real, causado por um deslizamento de terras ou por atividade humana, uma diferença de fase pode, igualmente, ser causada, por alterações significativas da vegetação (diferente na primavera e outono) ou por diferenças de humidade. Este último fator não é, contudo, considerado relevante nesta área. Para linhas de base perpendiculares mais longas, a diferença de fase pode, também, ser causada por imprecisão resultante do MDT.

Em três dos 12 interferogramas analisados, foi encontrado um setor instável, na área de interesse. Foram encontrados mais setores com mudanças de fase, mas a possibilidade de existirem movimentos reais deverá ser esclarecida por um geólogo. Na área considerada instável, é detetado um movimento na ordem dos 13 cm, na direção LOS, no verão de 2007, sendo detetado outro movimento na ordem dos 14 cm, também na direção LOS, na primavera de 2009. Contudo, verificam-se períodos em que esta área não indica quaisquer mudanças de fase e outros períodos que não podem ser monitorizados com este conjunto de dados.

Os pontos coloridos que aparecem nos interferogramas das [Figuras 56, 57 e 58](#) podem ter várias causas: (1) movimentos devido a deslizamento de terras ou subsidência; (2) falta de precisão no MDT utilizado (em interferogramas com base perpendicular de comprimento médio, a longo, acima de 1000m); (3) crescimento da vegetação; (4) alterações devido à humidade ou também por ruído, especialmente no caso de pixéis isolados. Nos interferogramas de 2010-2011 ([Figura 58](#)), a mudança na superfície é bem visível, particularmente, no local onde a estrada estava a ser construída, atribuindo-se as mudanças de fase, precisamente, à construção da estrada.

Os interferogramas foram avaliados para todos os pixéis (mesmo os não-fiáveis em relação ao PSInSAR), mas a correção do MDT não foi aqui aplicada (avaliada apenas para pontos fiáveis). De referir que as “manchas coloridas” das imagens não significam, necessariamente, que a área se está a deslocar, sendo necessário interpretar os interferogramas no seu todo.

Para o satélite ALOS, um erro relativo no MDT de 10 m, pode ser confundido com um movimento de 3,5 mm, considerando-se uma linha de base perpendicular de 200 m. Para uma linha de base perpendicular de 1000 m, um erro de 10 m no MDT corresponde a um movimento de 18 mm.

O primeiro conjunto de interferogramas é apresentado na [Figura 56](#) e refere o período de 2006 a 2008.

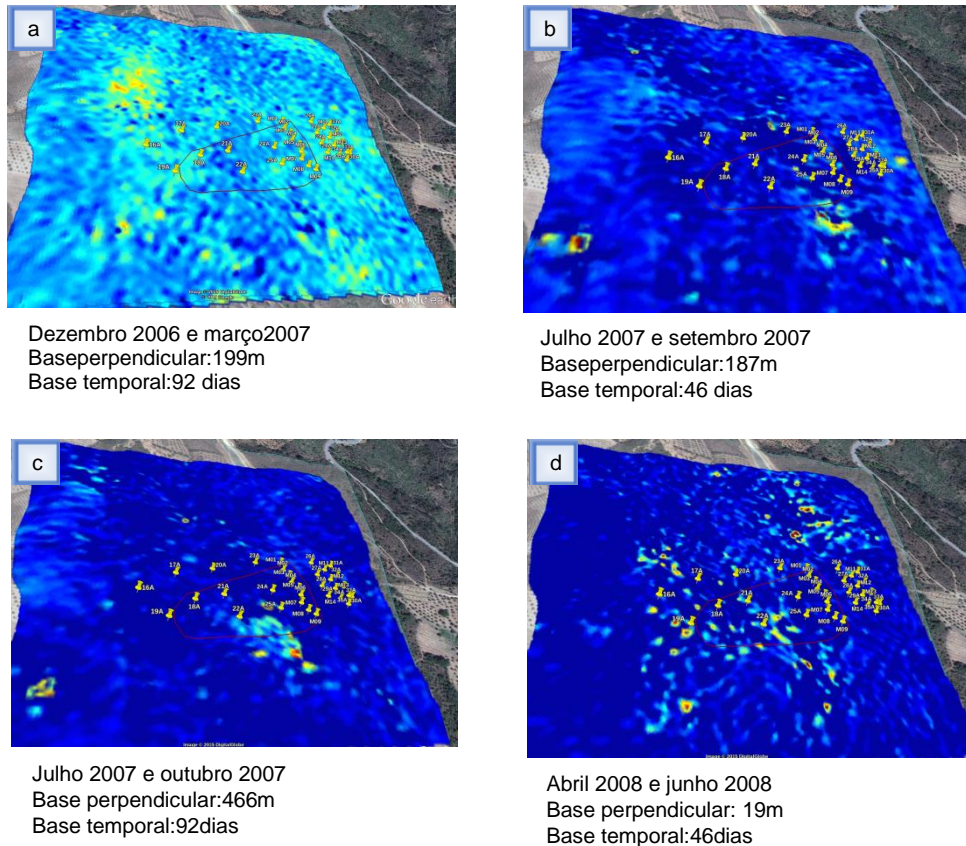


Figura 56 - Alguns interferogramas no período de 2006 a 2008. Fonte: Google Earth

A escala de cores (do azul ao vermelho) é de 8 cm para todas as imagens, isto é, metade da escala de cores para as [Figuras 57 e 58](#).

Na [Figura 56](#), atribuiu-se ao local, representado por uma mancha colorida visível na [imagem 56b](#) e na [imagem 56c](#) um movimento do terreno, (ex: um deslizamento de terras) que teria ocorrido no verão/outono de 2007 e com maior incidência na parte sul da imagem. Note-se que os períodos de tempo destes interferogramas se sobrepõem, tendo o interferograma representado na [imagem 56b](#) menor intervalo de tempo entre as duas aquisições. Por outro lado, a área apresenta estabilidade, pelo menos no período do inverno de 2006-2007 ([imagem 56a](#)), pois detetam-se menos mudanças de cor, podendo ser, inclusivamente, atribuídas ao ruído. A [imagem 56d](#) contém muitos pontos

coloridos, distribuídos pela área, atribuídos ao ruído ou ao crescimento de vegetação, ou a outras mudanças, pois não são expectáveis tantos deslizamentos pequenos, além da alteração habitual e significativa da vegetação na primavera.

A grandeza do movimento, no período entre 20 de julho de 2007 e 9 de setembro de 2007 (*imagem 56b*), é aproximadamente 9 cm. No período entre 20 de julho de 2007 e 20 de outubro de 2007 (*imagem56c*), a deformação é de, aproximadamente, 13 cm. Os valores aplicam-se ao movimento na direção da linha de vista (LOS) do radar, considerando que o movimento da encosta é no sentido descendente, com a sua grandeza estimada em 12 a 17 cm.

Na *Figura 57*, é apresentado o segundo conjunto de interferogramas, correspondentes ao período entre 2009 e 2010.

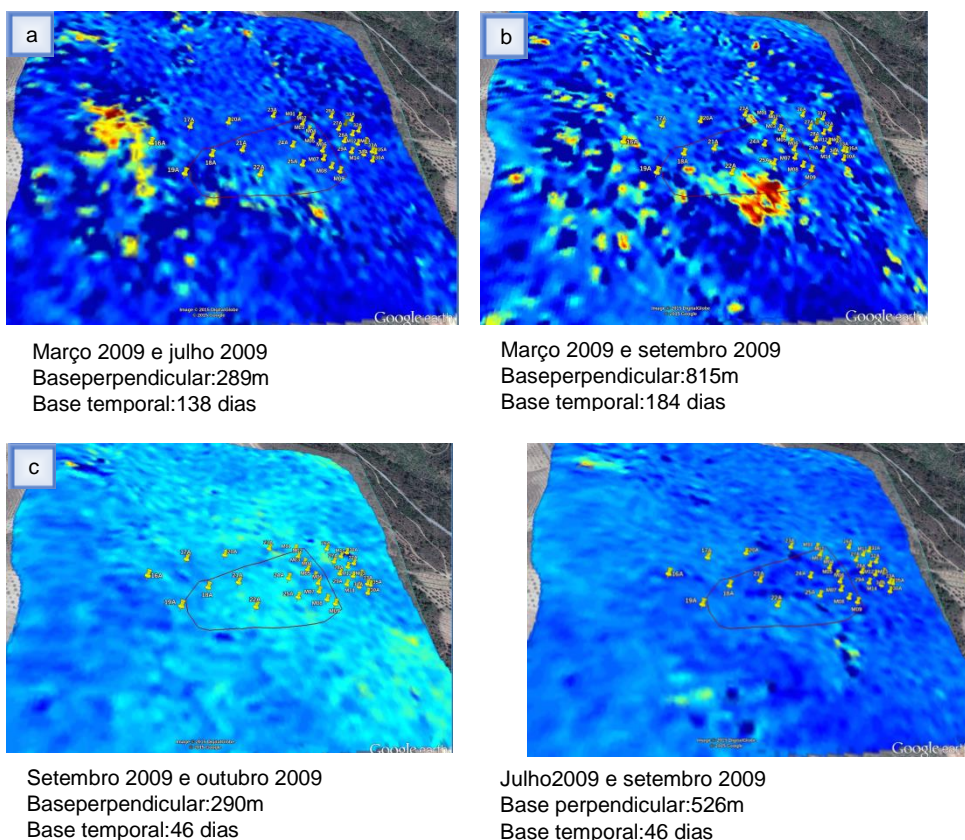


Figura 57 - Interferogramas no período de 2009 a 2010. Fonte: Google Earth

A escala de cores (do azul ao vermelho) é de 16 cm para todas as imagens.

Nas imagens *57a e 57b*, são visíveis duas áreas nas quais se considera a existência de movimento; contudo, uma vez que os períodos temporais destes interferogramas se sobrepõem e são visíveis pontos coloridos num dos interferograma que não aparecem



no outro (na imagem 57b a zona colorida fica próxima à área de movimento de 2007, (Figura 56), não sendo, contudo, a mesma), é altamente improvável que tenham sido causados por movimento. Na imagem 57b, essa área foi, provavelmente, causada pela imprecisão do MDT (a linha de base perpendicular é aqui, significativamente, superior, em comparação com as outras imagens).

Na imagem 57a, a zona colorida deverá ser atribuída a um outro efeito. Algumas mudanças de cor são, igualmente, visíveis na imagem 57b, embora não de forma tão significativa, pelo que estas mudanças deverão corresponder ao período de março a julho de 2009 (não será posterior, pois não são visíveis na imagem 57d). No entanto, a sua aparência é bastante diferente, o que, provavelmente, é causado por um erro no desenrolamento da fase e, uma vez que se trata do cume da colina, considera-se muito improvável um deslizamento neste local.

Na Figura 58, é apresentado o terceiro conjunto de interferogramas, correspondentes ao período entre 2010 a 2011.

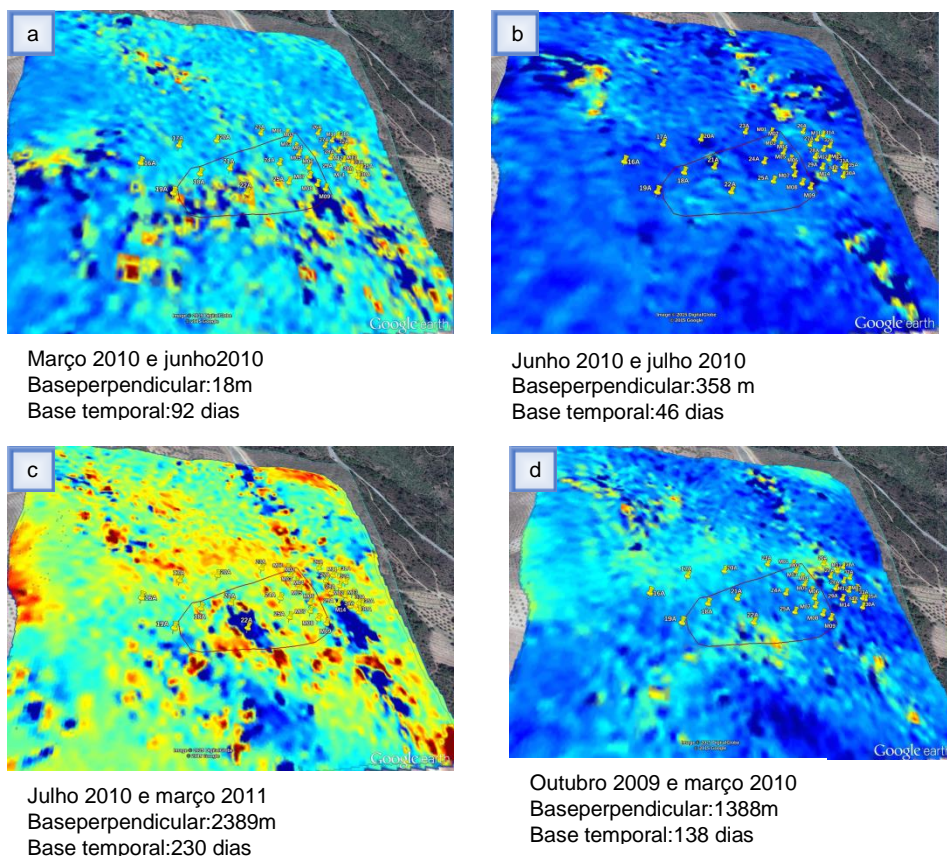


Figura 58 - Interferogramas no período de 2010 a 2011. Fonte: © Google Earth

A escala de cores (do azul ao vermelho) é de 16 cm para todas as imagens.

Contudo, na [Figura 58](#) (por comparação com as [Figuras 56 e 57](#)), são visíveis pontos coloridos, na localização da nova estrada. Os pontos coloridos, na [imagem 58c](#), não são possíveis de interpretar, visto que a linha de base perpendicular é demasiado longa e aqueles pontos poderão corresponder a uma imprecisão do MDT. Os pontos coloridos, na [imagem 58a](#), poderão corresponder ao crescimento da vegetação ou à construção da estrada, uma vez que não são esperados tantos deslizamentos isolados e pequenos, sobretudo quando a área quase não apresenta movimento nos períodos seguintes ([imagem 58b](#)).

Pode concluir-se que o número de imagens disponíveis para este trabalho é relativamente baixo e a sua configuração (linhas de base temporais e perpendiculares) não é a mais conveniente (ver [Figura 55](#)). Alguns interferogramas são interpretáveis (pequenas linhas de base temporal e perpendicular), contudo, apenas é possível monitorizar movimentos em períodos de tempo isolados, quando a configuração da imagem é a mais conveniente (verão 2007, verão 2009, verão 2010). Os deslizamentos de terra são possíveis no verão/outono de 2007. Em 2010, são visíveis mudanças na envolvente da nova estrada.

De seguida faz-se uma análise, onde se tentam apresentar os interferogramas mais coerentes (monocolors) [Figura 59](#). Esta análise apresenta menor precisão que a conseguida com o método PSInSAR, (resultados apresentados anteriormente) mas representa toda a área, não considerando a qualidade de cada ponto, a qual pode ser negativamente influenciada pela não-linearidade das deformações.

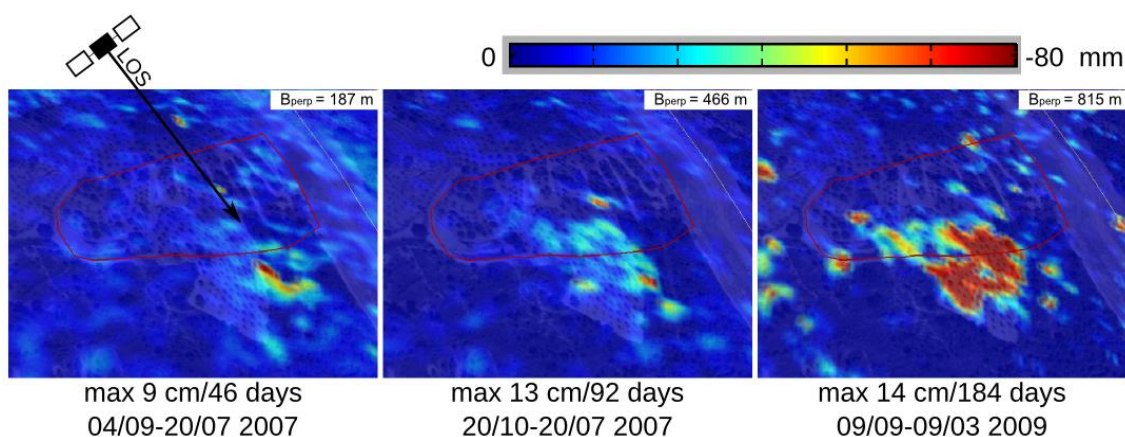


Figura 59 - Interferogramas seleccionados do ALOS PALSAR, mostrando possível deslizamento de terras na AOI Alfandega da Fé.

### 6.3. Processamento de Barragens

A monitorização de Barragens é uma tarefa árdua, mas muito importante e com vantagens significativas, pois é fundamental à prevenção de acidentes, através da deteção, com antecedência, de alterações físicas das estruturas. A monitorização convencional baseia-se na realização de campanhas de observação periódicas em cada obra construída, sendo escolhidos os métodos e os instrumentos a usar, de acordo com as características da obra.

Em Portugal, estão implementados planos geodésicos de observação para controlo de barragens. Os dados são obtidos por equipamentos óticos que, através da realização de visadas, atravessam parte da atmosfera. As visadas são realizadas a partir de pontos considerados fixos, ou de referência, onde o equipamento é estacionado, até aos pontos a observar. Por outro lado, são usados métodos que usam um conjunto de instrumentos e dispositivos para colocar ou embutir na própria estrutura, a fim de detetar movimentos relativos. A análise conjunta dos dados obtidos, a partir dos dois tipos de medição, permite obter os melhores resultados.

Na realização deste trabalho, para permitir a validação dos resultados obtidos pelo processamento interferométrico, a empresa EDP foi abordada no sentido de ceder as observações geodésicas que, periodicamente, realiza nas estruturas de que é responsável. Assim, foram selecionadas quatro barragens, por razões diferentes, nomeadamente em função da sua dimensão, material com que é construída, orientação e envolvente. As conclusões são apresentadas nas secções seguintes.

#### 6.3.1. Barragem da Paradela

A barragem da Paradela foi monitorizada com a técnica MT-InSAR, sem qualquer referência conhecida da sua possível deformação. Foi utilizado o *software* SARPROZ, para processar imagens do satélite *Envisat* de duas trajetórias ascendentes temporalmente sobrepostas, a trajetória 273, com 14 imagens no período de outubro de 2002 a maio de 2007 e a trajetória 44, com 16 imagens do período maio de 2003 a dezembro de 2007.

No processamento das duas séries de imagens foi usado um mesmo ponto de referência, próximo da barragem, em relação ao qual são estimados os possíveis movimentos da barragem.



Nas técnicas MT-InSAR, um ponto de referência é selecionado por meio de procedimentos de otimização que indiquem que esse ponto tem elevada coerência, baixo desvio padrão e grande estabilidade ao longo do tempo.

Em relação ao mesmo ponto de referência, no processamento de cada uma das séries, os resultados mostram comportamentos muito semelhantes no controlo das deformações, contudo em pontos PS diferentes.

Nas duas séries de dados a barragem é definida por uma grande quantidade de pontos estáveis. Esses pontos mostram tendências de deformação muito pequenas, com uma taxa não superior a 2mm/ano na parte inferior da barragem e até 5mm/ano na parte superior da barragem, considerando a direção da linha de vista do satélite. Na [Figura 60](#), são apresentados os gráficos das estimativas das deformações lineares para dois pontos selecionados, que se encontram próximos em ambas as séries de dados.

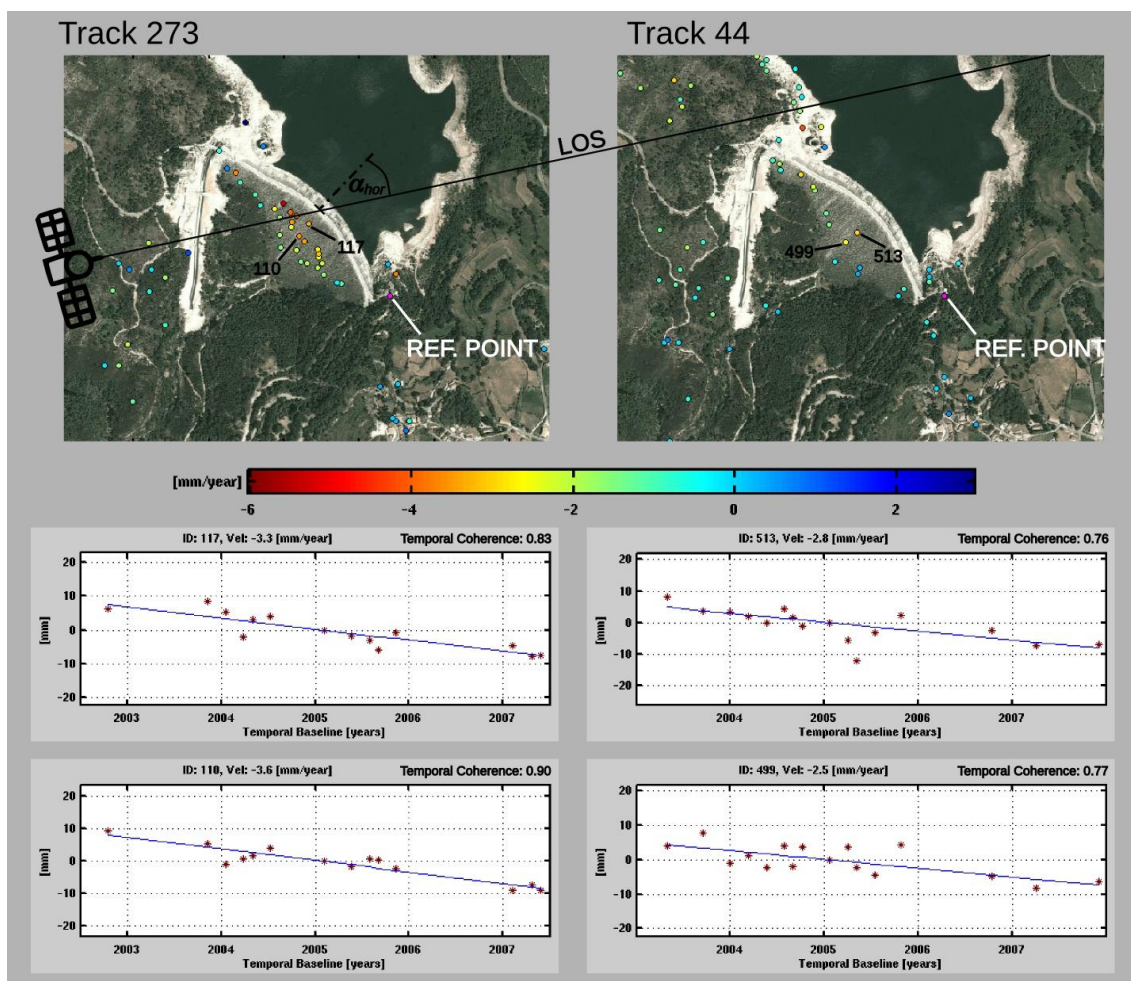


Figura 60 - Tendência da deformação linear na LOS na barragem da Paradela, avaliada com o software SARPROZ PS-InSAR no processamento de dados Envisat ASAR na trajetória 273 (esquerda) e trajetória 44 (direita).

O sinal do radar é, habitualmente, afetado por fontes de erros mínimos. No entanto, se esses erros não forem contabilizados nos modelos de estimação, levam ao aparecimento de ruído na fase, afetando a precisão da estimativa da deformação.

O parâmetro da coerência  $\xi_p$ , descreve a qualidade do ajustamento entre o modelo de deformação linear e as medidas da fase. A partir do valor da coerência, o desvio padrão  $\delta_{\Delta v}$  da tendência de deformação linear  $v$ (mm/ano), pode ser calculado pela [Equação 6.1](#).

$$\delta_{\Delta v} = \sqrt{\left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{-\log(\xi_p)}}{M \delta_{\Delta t}^2}} \quad (6.1)$$

Os outros parâmetros da [Equação 6.1](#) são, o comprimento de onda do radar  $\lambda$  (mm), o número de interferogramas  $M$  e a variação das diferenças temporais  $\delta_{\Delta t}$  das imagens SAR, em relação à imagem de referência (*master*).

Para a trajetória 273,  $M=13$ ,  $\delta_{\Delta t}=1772$  dias, enquanto que para a trajetória 44,  $M=15$  e  $\delta_{\Delta t}=1525$  dias.

Se o movimento esperado da barragem for horizontal, na direção perpendicular ao corpo da barragem, isto é, com um ângulo  $\alpha_{hor}$  para a direção da linha de vista do sensor, e se a deformação vertical não for assumida, isto é, se for desprezável por razões de simplificação, a taxa de deformação horizontal  $D_{hor}$ , pode ser derivada do valor da direção LOS usando a [Equação 6.2](#)

$$D_{hor} = \frac{D_{LOS}}{\sin\theta_{inc} \cdot \cos\alpha_{hor}} \quad (6.2)$$

Onde  $\theta_{inc}$ , é o ângulo de incidência da LOS, para a direção vertical (no caso do Envisat ASAR  $\theta_{inc} \simeq 21^\circ$ )

Portanto, supondo a deformação estritamente horizontal, em pontos selecionados, na direção perpendicular à orientação da barragem, a informação sobre a sua tendência de deformação linear  $D_{hor}$ , pode ser obtida a partir das taxas de deformação  $D_{LOS}$ , da

direção LOS, considerando o parâmetro  $\alpha_{hor} \simeq 34^\circ$  para obter os valores  $D_{hor}$ , (Tabela 4), onde o sinal negativo significa inclinação para o reservatório.

Tabela 4 - Estimativa da tendência de deformação horizontal para pontos selecionados

ID	Trajectoria	$\xi_p$	$D_{LOS}$ [mm/y]	$D_{hor}$ [mm/y]
110	273	0.83	$-3.6 \pm 0.7$	$-12.1 \pm 2.5$
117	273	0.90	$-3.3 \pm 0.6$	$-11.1 \pm 2.1$
499	44	0.77	$-2.5 \pm 0.8$	$-8.4 \pm 2.6$
513	44	0.76	$-2.8 \pm 0.8$	$-9.4 \pm 2.7$

Generalizando a informação fornecida, as estimativas de PS-InSAR mostram que a parte central superior da barragem de Paradela está ligeiramente a inclinar para o reservatório, com um movimento que é linear no tempo. Esta conclusão deve, no entanto, ser analisada comparando com resultados obtidos por outras técnicas. Os resíduos da fase, Figura 60, indicam uma distorção bastante pequena. Foi realizado o processamento para correlacionar estes resíduos com o nível da água da albufeira e com os valores de temperatura. A taxa de correlação foi muito pequena, tendo-se obtido desvios comparáveis com o sinal do ruído, logo desprezáveis.

### 6.3.2. Barragem da Raiva

A barragem da Raiva é uma barragem de betão do tipo gravidade, cujas fundações são de xisto e grauvaques. Situada na zona centro de Portugal, perto da localidade de Coiço, no rio Mondego. Para a monitorização por MT-InSAR foram usadas imagens SAR, obtidas em duas trajetórias ascendentes do satélite Envisat, sendo a orientação da barragem quase ideal, por ser paralela à direção da linha de voo. A resolução do radar é aproximadamente 4 m, na direção de voo (azimute), quase paralela à estrutura da barragem, enquanto na direção perpendicular (alcance) é de 20-30 m (diferente para cada trajetória).

Foram processadas 20 imagens, obtidas entre 2003 e 2007, na trajetória 44, e 16 imagens, obtidas entre 2003 e 2005, na trajetória 316. Na análise efetuada previamente, considerou-se o número de imagens reduzido, devido ao facto de as bases perpendicular e temporal serem muito grandes. A trajetória 316 é menos apropriada para a monitorização, no entanto, apresenta melhor resolução na direção perpendicular à construção da barragem. Em ambas as trajetórias do satélite, a barragem está sujeita

a grandes efeitos de *layover*, porque os pontos PS, na parte superior da barragem, são registados primeiro do que os pontos na parte inferior da barragem, o que faz com que os pontos mais altos no terreno (estrutura) fiquem mais baixos quando são registados na imagem obtida pelo satélite (Figura 61). De referir, também, que a zona norte da barragem não é visível pelo radar, ou os pontos radar foram excluídos do processamento devido à baixa qualidade no que respeita à coerência.

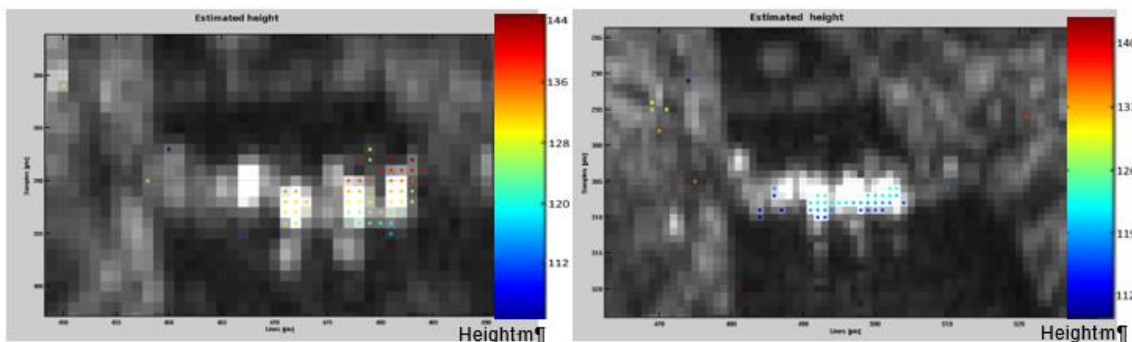


Figura 61 - Imagem da barragem da Raiva vista do radar nas trajetórias 44 (esquerda) e 316 (direita). As cores representam a altitude estimada. A parte jusante fica para o topo e o norte fica à direita. A barragem é monitorizada a partir do topo, ou seja, é visível que os pontos PS, na parte inferior da imagem, correspondem à parte inferior da barragem. Pontos com elevada intensidade, geralmente, são considerados de qualidade.

A orientação da barragem, em relação à trajetória do satélite, é quase ideal. A barragem é monitorizada de jusante, com o raio de incidência do radar quase perpendicular à construção. A orientação da encosta, do lado esquerdo e que se considera instável, não é ideal, principalmente na direção paralela à trajetória do satélite, uma vez que as deformações são esperadas na direção descendente da encosta.

Na realização do processamento, o ponto que serviu de referência, para quantificar as deformações, foi selecionado na própria estrutura da barragem, embora seja recomendado escolher este ponto fora da área de influência da estrutura, mas a maioria dos pontos na sua envolvente apresentava baixa coerência e, por isso, fraca qualidade. Desta forma, a maioria dos pontos sobre a estrutura da barragem são bastante coerentes e as possíveis deformações, ou a influência do nível da água da albufeira, devem ser referenciados a um ponto fora da própria construção. Nas ortofotos da estrutura, apenas são mostrados os pontos com coerência superior a 0,7. O ponto de referência no coroamento está destacado a cor-de-rosa.

No processamento, tentou-se estimar os efeitos da temperatura (dilatação) e os efeitos do nível de enchimento (possível flexão devido à alteração do nível da água), mas não foram obtidos resultados consistentes. Atribuímos esta independência de parâmetros à

localização da barragem (vale em montanha), ao seu comprimento (apenas 200 m) e ao material de construção (betão). Além disso, a sensibilidade do processamento InSAR, em relação aos movimentos horizontais esperados tanto por efeitos de dilatação, devido à temperatura, como do nível de água, é apenas cerca de 25% (dado pelo ângulo entre o raio de incidência do radar e a direção dos movimentos). Mesmo neste caso, em que a orientação da barragem é quase ideal, o movimento horizontal mínimo visível, devido a estes efeitos, seria de cerca de 8 mm/°C, no caso da temperatura, e 8 mm/m, no caso de alteração do nível da água.

A encosta a sul (esquerda), que fica localizada acima da barragem, é conhecida como instável. As [Figuras 62 a 65](#) apresentam a velocidade de deformação linear, estimada tanto no corpo da barragem como na encosta instável. Infelizmente, devido à baixa qualidade dos pontos PS, a maioria dos pontos, na parte norte da barragem, e a maioria dos pontos, na encosta, foram excluídos durante o processamento. Aparentemente, a barragem não tem deformações absolutas, os valores de deformação estimados estão nos limites do método e, na encosta, a densidade de pontos é baixa. É de referir que todos os valores de deformação linear apresentados estão na LOS do radar, porque a direção da deformação é desconhecida.

Nas [Figuras 62 e 63](#) (trajetória 44), não é visível nenhum movimento significativo, no entanto, nas [Figuras 64 e 65](#) (trajetória 316), é detetado movimento da encosta. Note-se que os pontos PS identificados com boa qualidade são diferentes. De acordo com a precisão do método, isto é, no intervalo de poucos mm, não se detetam deformações na barragem. Nas encostas, os movimentos são possíveis, porém a densidade dos pontos (ou coerência) é baixa. Os resultados obtidos para as duas trajetórias não coincidem, no entanto, ambos apresentam um comportamento estável da barragem.



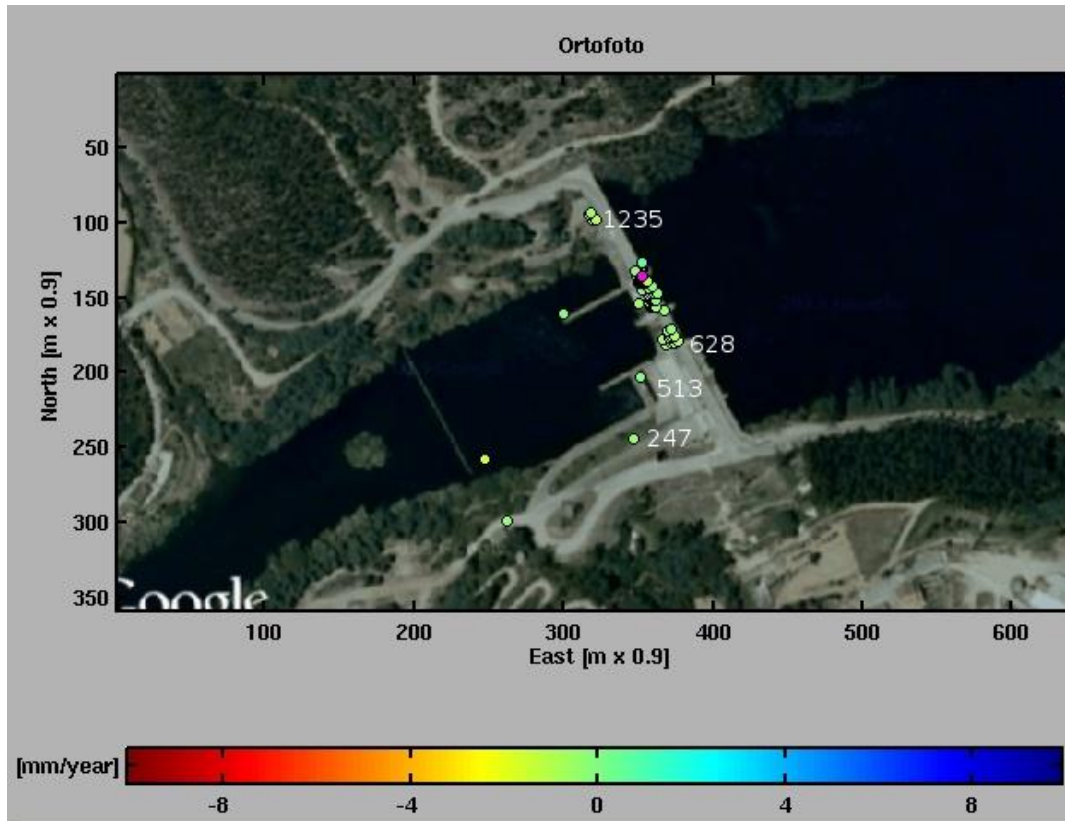


Figura 62 - Deformação linear estimada para a trajetória 44 (sem incluir no modelo a influência do nível da água), com marcas distintas dos pontos PS.

As séries temporais dos pontos PS, assinalados a branco na Figura 62, são apresentadas graficamente na Figura 63.

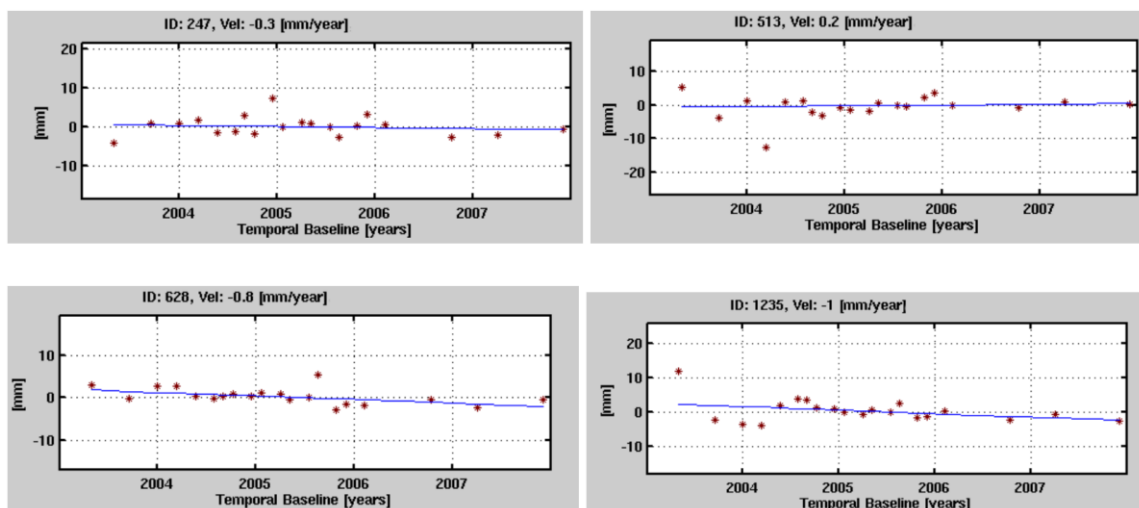


Figura 63 - Séries temporais da deformação estimada para os diferentes pontos PS (trajetória 44).

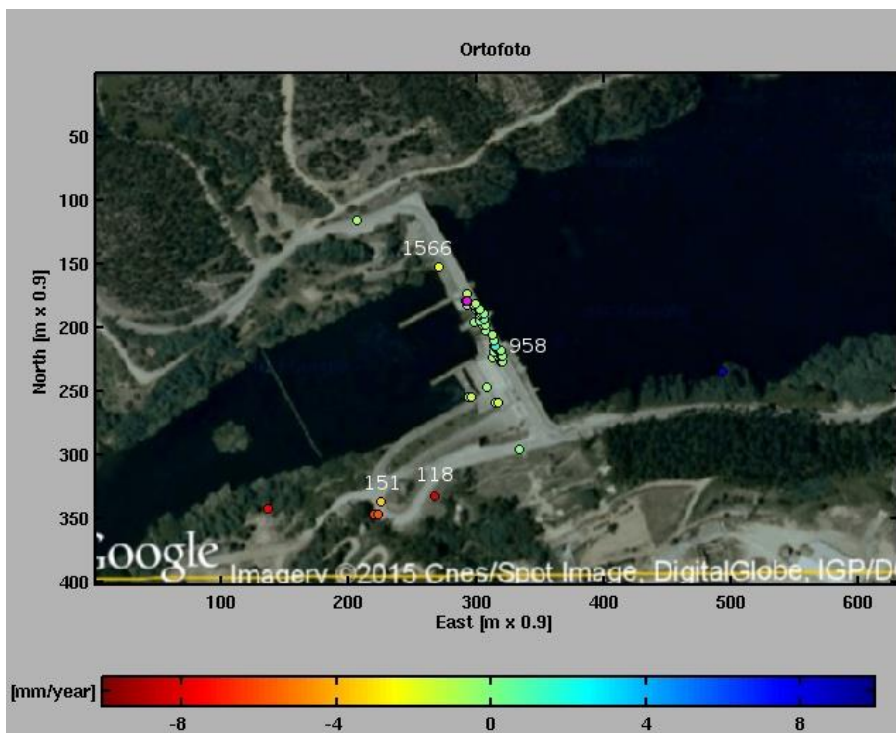


Figura 64 - Deformação linear estimada para a trajetória 316 (sem incluir no modelo a influência do nível da água), com marcas distintas para os pontos PS.

As séries temporais dos pontos PS, assinalados a branco, são apresentadas na [Figura 65](#).

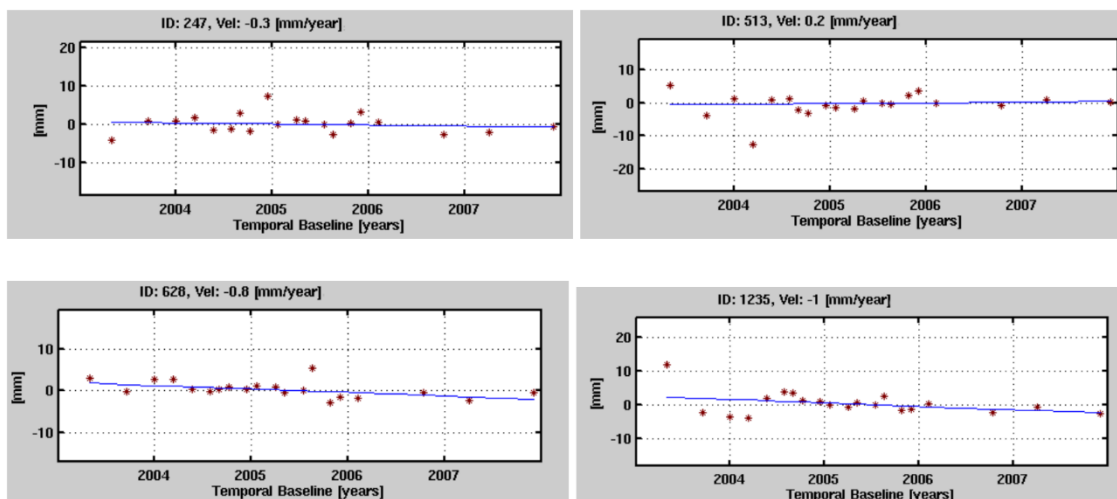


Figura 65 - Séries temporais da deformação estimada para os pontos PS, assinalados a branco (trajetória 316).



Nas Figuras 62 a 67, é visível que, devido à orientação ideal em relação à passagem do radar, a barragem está sujeita ao efeito de *layover* (artefato de radar que faz com que os pontos mais próximos do radar fiquem mais afastados na imagem, devido à variação de altitude). Portanto, observando a partir de jusante, a primeira linha de pontos refere-se ao topo da barragem, e as outras linhas correspondem à parte do meio e do fundo da barragem, respetivamente (na trajetória 44, há apenas duas linhas, causadas por baixa resolução). Na interpretação dos resultados, este facto deve ser tido em conta.

De realçar que para georreferenciar a imagem também há uma precisão limitada (resolução de 4x25m), sendo, o ajuste da imagem da barragem, efetuado manualmente.

A influência do nível de enchimento parece ser insignificante em relação à precisão do método. Além disso, os níveis de água são significativamente mais elevados no período que corresponde à parte final da monitorização, quando há grandes lacunas de dados e, portanto, os valores são praticamente lineares no tempo. Depois de se tentar estimar a influência do nível da água, estimou-se, também, a deformação sem este parâmetro, isto é, foram estimadas, apenas, a velocidade de deformação e as altitudes.

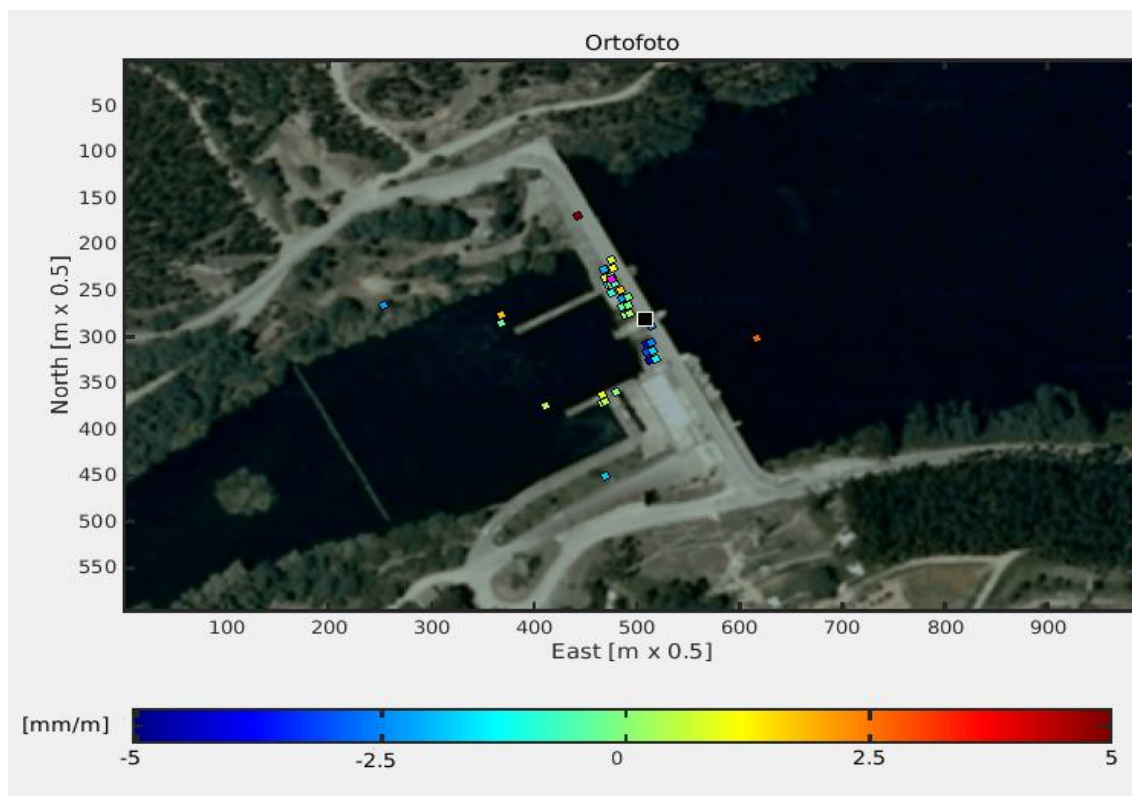


Figura 66 - Estimativa da influência do nível da água, na direção horizontal (trajetória 44).

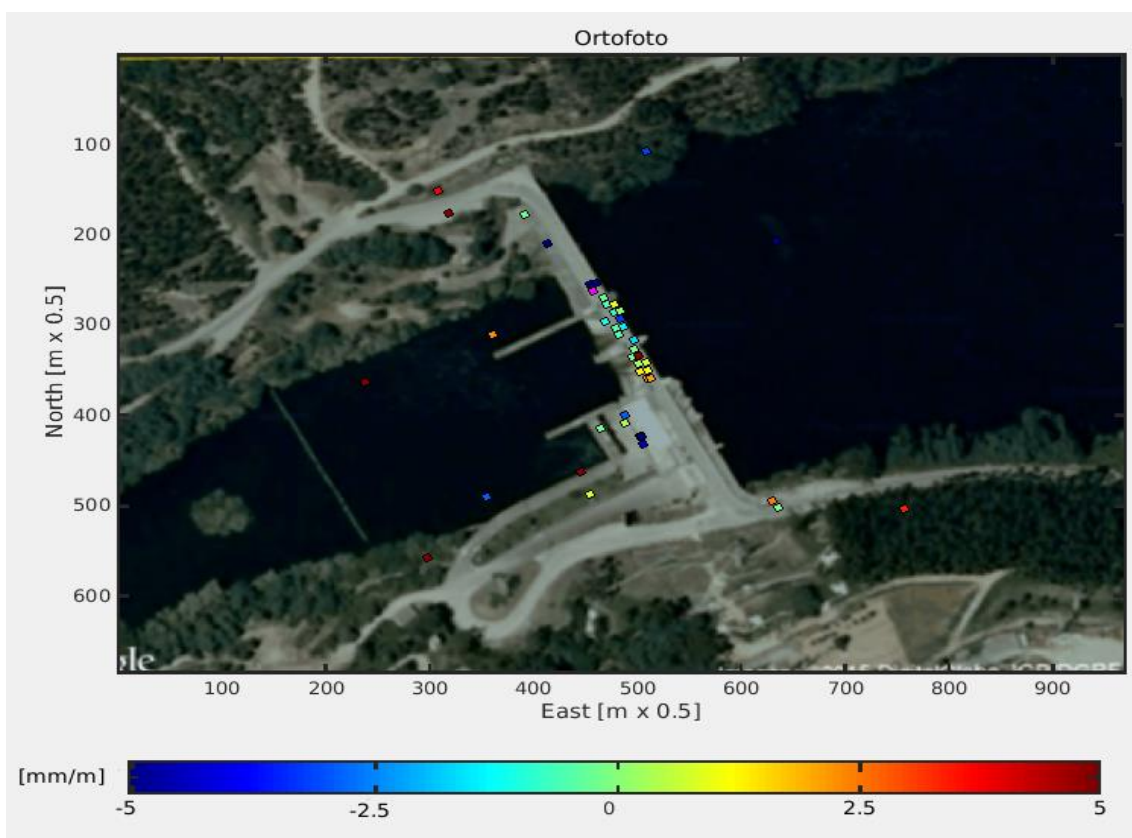


Figura 67 - Influência do nível da água estimada (na direção horizontal) para a trajetória 316.

Na análise do processamento com a influência do nível da água, pode observar-se uma diferença significativa entre os resultados obtidos nas duas trajetórias para o lado sul, a meio da barragem. Verifica-se que há uma correlação consistente da deformação com os valores do nível da água na trajetória 44. No entanto, nos resultados obtidos, através da trajetória 316, não é observado movimento significativo.

De notar que os valores estão em mm/m dos níveis da água. No cálculo destas estimativas, a precisão obtida é, no mínimo, metade da considerada devido à limitação da sensibilidade do InSAR para a deteção de movimentos horizontais, ou seja, a influência do nível da água estimada está no limite da precisão da técnica. Além disso, tal como referido anteriormente, os valores do nível da água são, também, dependentes da época (especialmente para a trajetória 44, ver [Figura 66](#)), isto é, a influência dos níveis da água estimados está correlacionada com a deformação linear.

Por esta razão decidiu-se criar o modelo, excluindo a influência do nível da água.

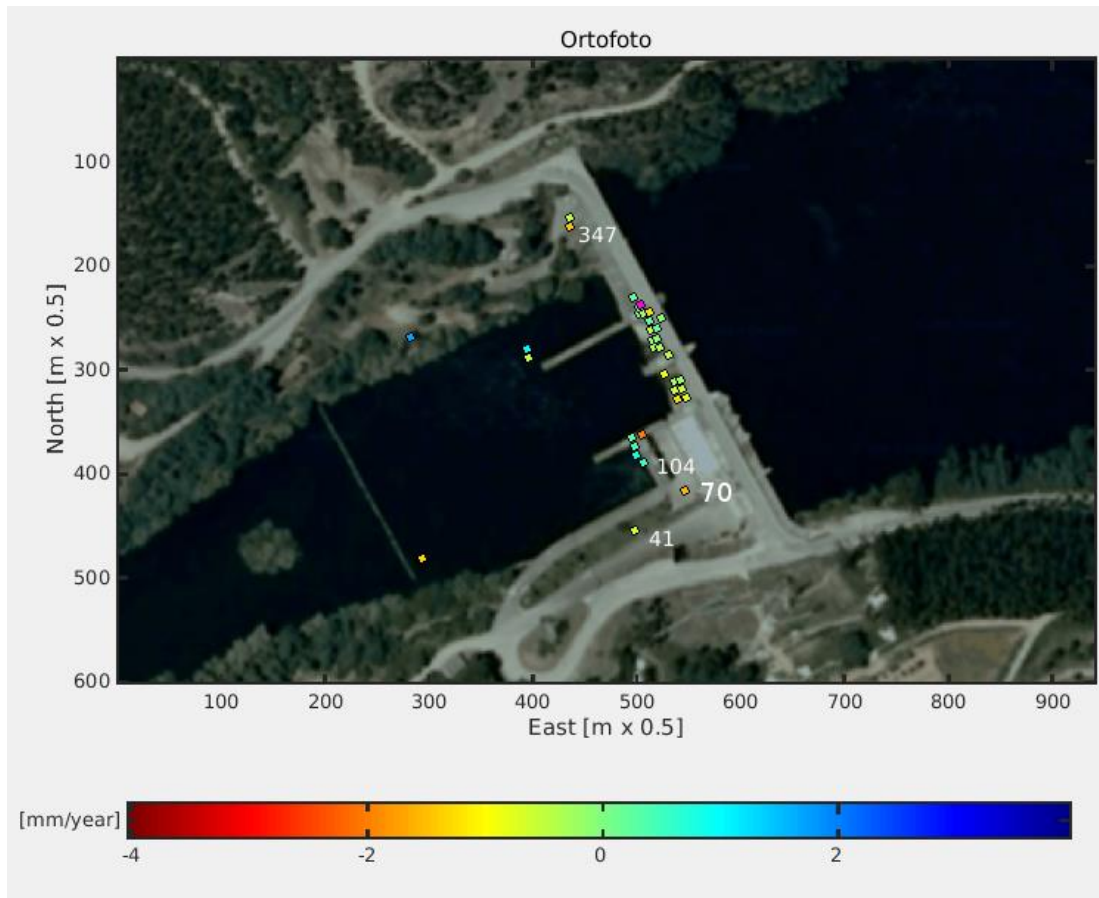


Figura 68 - Deformação linear estimada para a trajetória 44 (sem incluir a influência do nível da água no modelo), com marcas distintas dos pontos.

As séries temporais dos pontos assinalados, a branco, são apresentadas na [Figura 69](#).

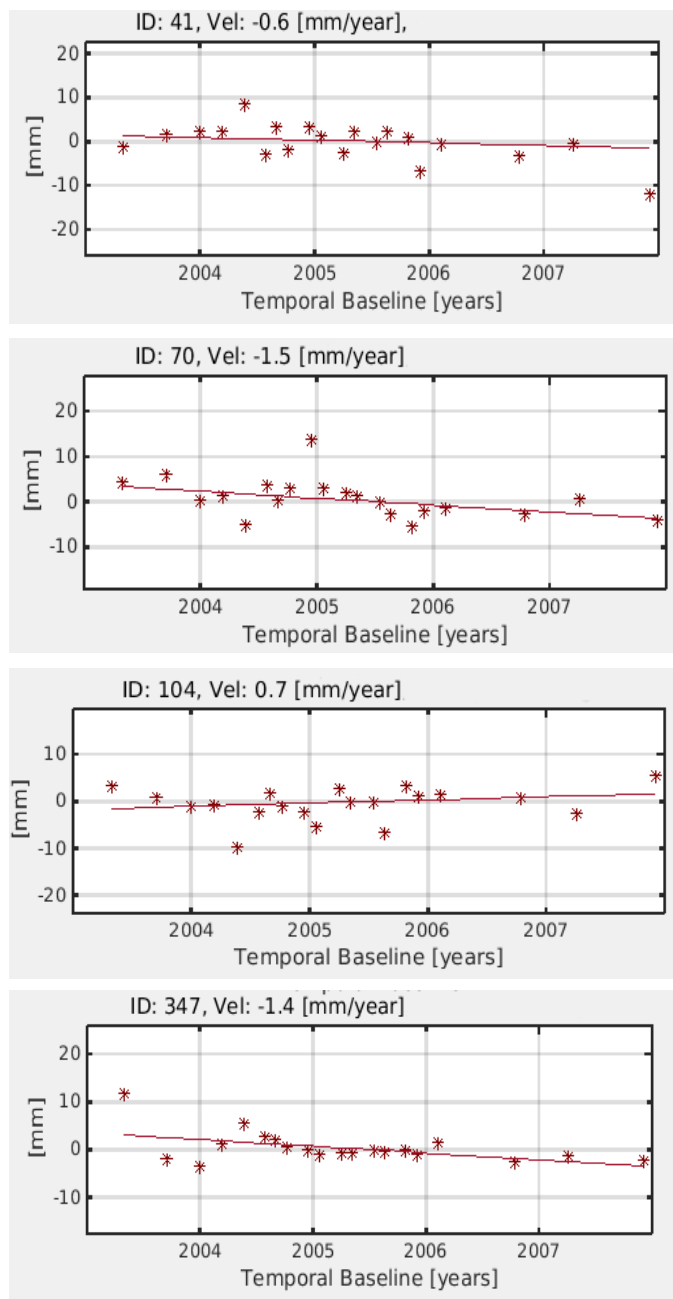


Figura 69 - Séries temporais da deformação estimada para os diferentes pontos da trajetória 44.

A [Figura 70](#) representa a estimativa da deformação linear para a Trajetória 316. Os pontos assinalados a branco não foram processados com a influência no nível da água.

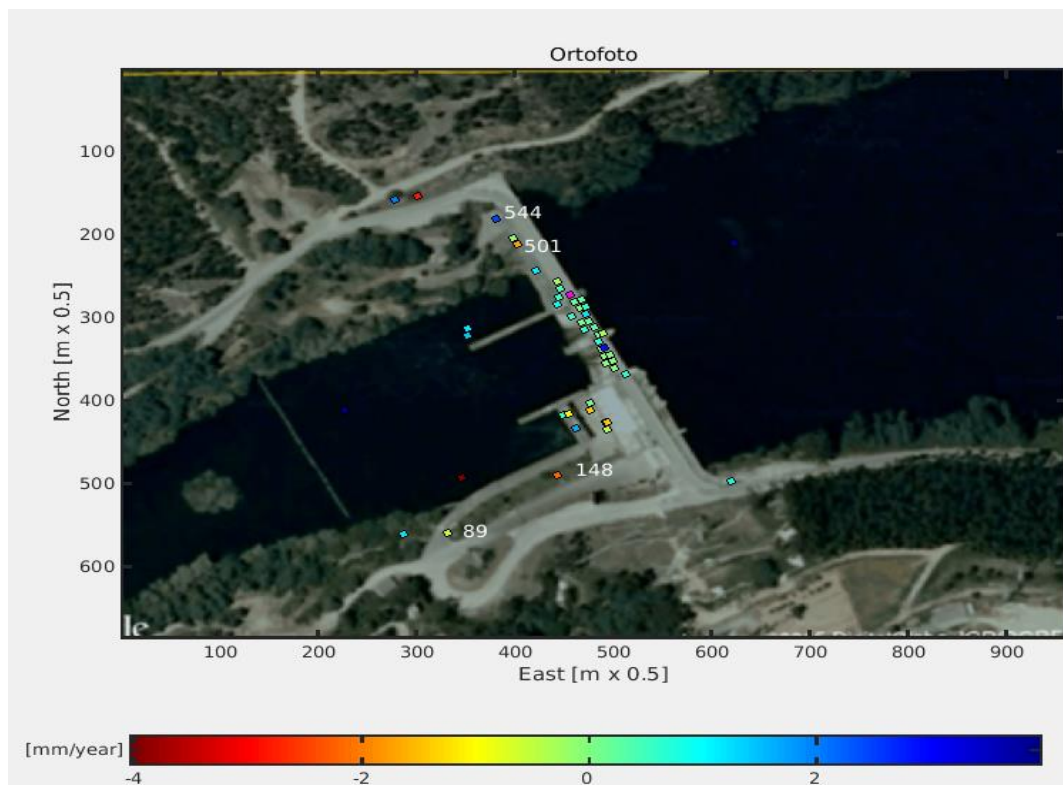


Figura 70 - Estimativa da deformação linear para a Trajetória 316 (influência do nível da água não incluído no modelo), com diferentes pontos assinalados.

As séries temporais dos pontos assinalados a branco na [Figura 70](#), podem ser vistas na [Figura 71](#).

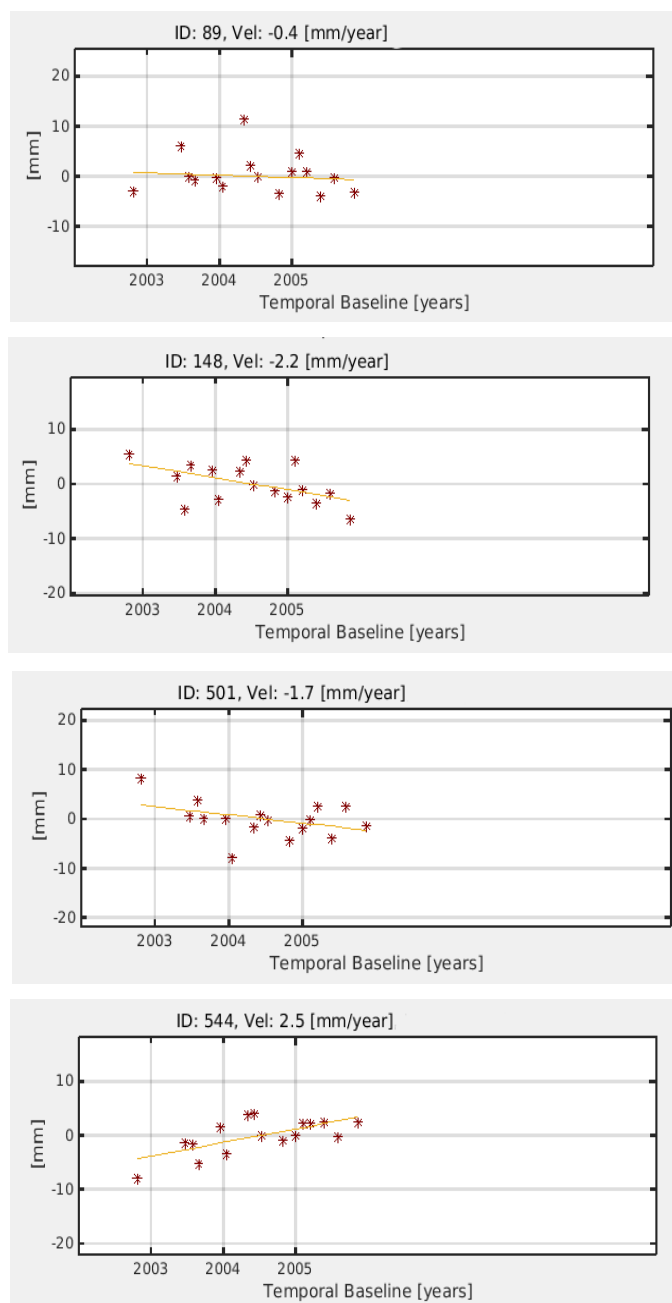


Figura 71 - Séries temporais da deformação estimada para os diferentes pontos da trajetória 316.

Todos os valores da deformação linear apresentados são resultantes da observação na direção da linha de vista do radar, pois a direção da deformação é desconhecida.

De acordo com a precisão dada pelo método, na ordem dos mm, pode concluir-se que, não há movimentos a registar na barragem. Relativamente às encostas, é possível que haja movimentos, no entanto, a coerência dos pontos é muito baixa relativamente ao resultado obtido em cada uma das duas trajetórias, não se validando mutuamente.

No caso de ser necessário efetuar nova monitorização, é recomendável a instalação de difusores de canto (se possível pelo menos dois difusores, colocados numa zona estável para servirem de pontos de referência).

Com um volume de dados de alta resolução adequado, os resultados da monitorização da barragem poderão ser significativamente melhorados.

### 6.3.3. Barragem de Cunovo (Eslováquia)

A barragem de *Cunovo*, pertence ao primeiro escalão do sistema hidráulico de Gabčíkovo-Nagymaros, produzindo 24MW de eletricidade. Em 1996, foi construído o maior curso artificial de água da Europa, com colocação de obstáculos para competições de remo. Surgiu, assim, o Centro de Desportos Aquáticos de *Cunovo*, numa ilha do rio Danúbio, a cerca de 20km do centro de Bratislava.

Para a análise de deformações pelo método MT-InSAR, foram processadas 52 imagens, obtidas pelo satélite TerraSAR-X entre 2011 e 2013. Da análise dos resultados, podem ser observados efeitos de subsidência em algumas partes da barragem ([Figura 72](#)).

Para a maior parte das componentes da barragem de *Cunovo*, as velocidades de deformação estimadas estão dentro do intervalo de  $\pm 5$  mm/ano. Na ilha da margem oeste do rio Danúbio, onde está localizado o Museu de Arte Danubiana, Meulensteen, verificam-se deformações significativas de -10 mm/ano. As autoridades locais e as instituições responsáveis pela manutenção da estrutura, foram contactadas a fim de complementarem os resultados obtidos pelo InSAR, fazendo inspeções no terreno, recorrendo a outras geotécnicas como GNSS e Nivelamento. Os dados serão, posteriormente, facultados para comparação. Como a barragem tem, na sua envolvente, aldeias, foi solicitado que a área de observação fosse alargada, para avaliar os deslocamentos.



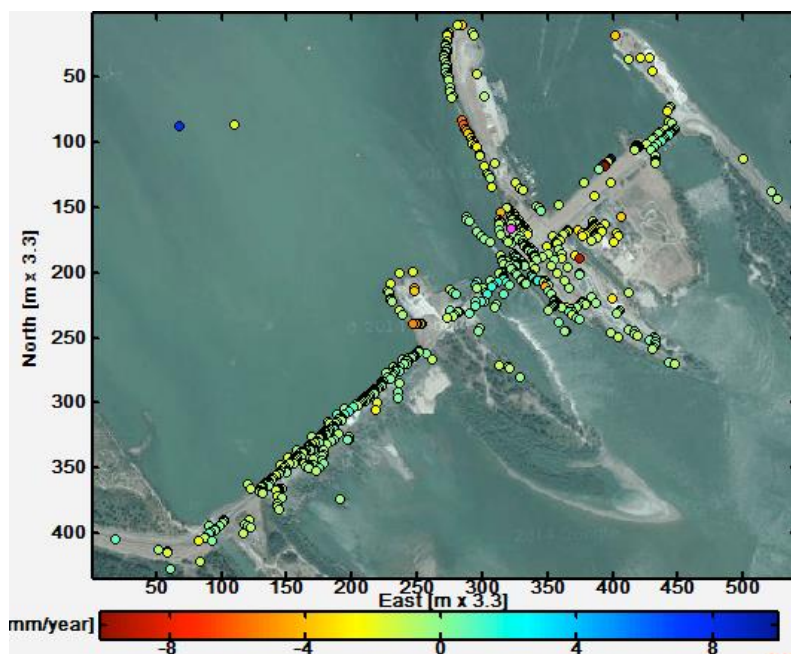


Figura 72 - Velocidades médias da deformação na linha de vista do sensor, sobre a barragem de *Cunovo*.

Os resultados dos PS sobre a barragem de Gabčíkovo (Figura 73) apresentam um movimento de subsidência lento. Foram analisados os pontos PS 51, na trajetória descendente, e o ponto PS 172, na trajetória ascendente.

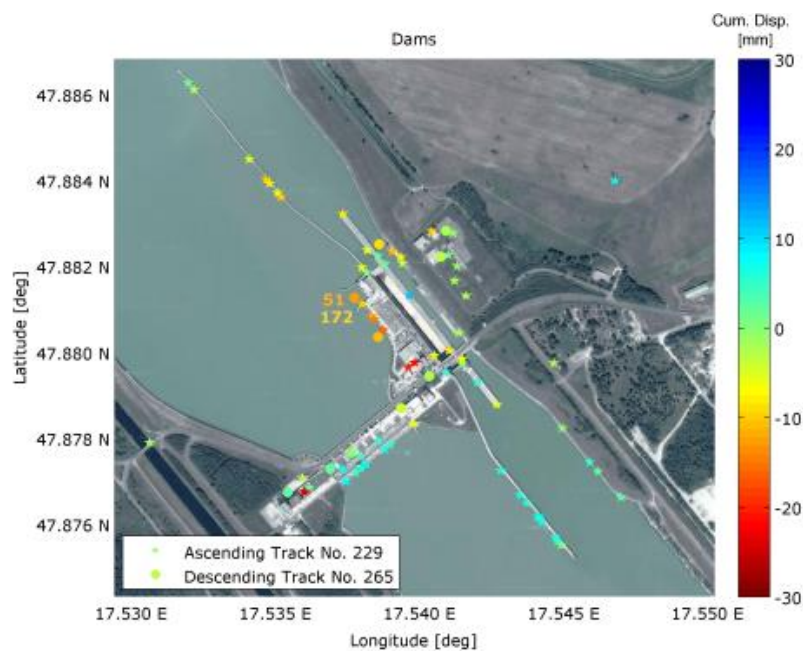


Figura 73 - Barragem de Gabčíkovo observada com PSInSAR assumindo um deslocamento não linear.

Na [Figura 74](#) apresentam-se as séries temporais dos dois pontos próximos, detetados nas diferentes trajetórias.

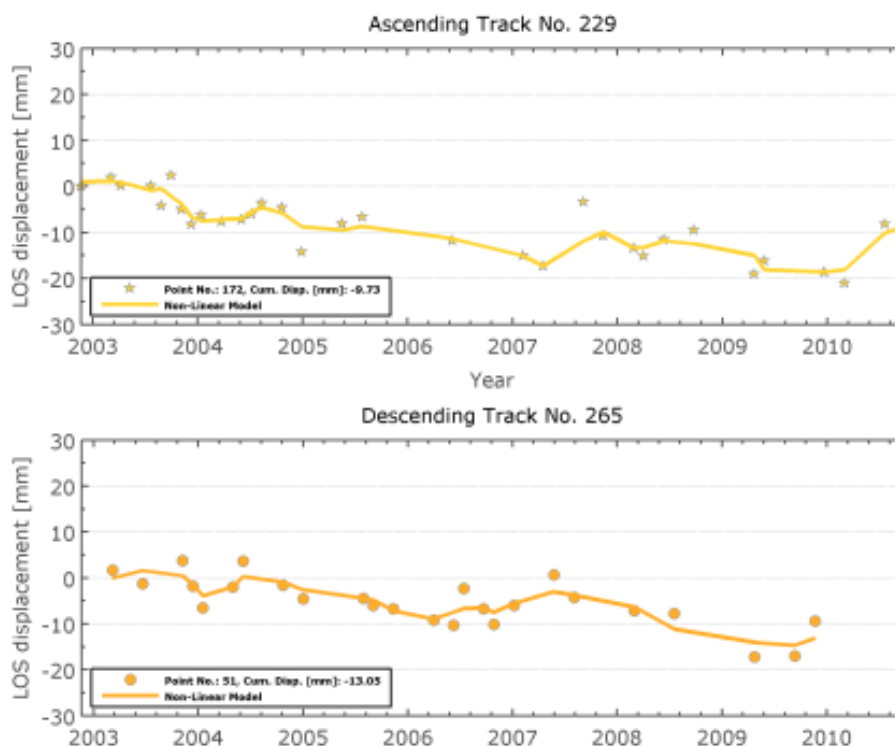


Figura 74 - Séries temporais dos dois pontos PS, PS51 e PS172.

A hipótese de deformação não linear da barragem foi incluída no processamento e efetuaram-se estimativas de deformação não linear, mas estas indicam um comportamento semelhante nos dois pontos analisados, mesmo com geometrias de aquisição distintas.

### 6.3.4. Barragem do Alto Ceira

Nesta barragem, à semelhança de outras construções similares, que naquela época (1939) recorreram à mesma tecnologia de construção, a estrutura foi revelando algumas anomalias, logo após o seu enchimento inicial, nomeadamente várias fissuras, deslocamentos horizontais para montante, e verticais ascendentes, assim como expansão do próprio betão.

Tendo em conta os elevados custos de recuperação da estrutura, e considerando a importância desta barragem no contexto do aproveitamento hidroelétrico de Santa Luzia, a EDP-Eletricidade de Portugal, decidiu construir uma nova barragem, cerca de 200 m a jusante desta. Esta nova estrutura tem exatamente as mesmas funções que a sua antecessora, ou seja, a sua albufeira servirá apenas como reservatório e a água aí acumulada será enviada através do túnel, cujo funcionamento se manterá até à localidade de Malhada do Rei, já na albufeira de Santa Luzia, a cerca de 7 km de distância.

A estrutura projetada foi construída em betão e é uma abóbada de dupla curvatura, com a altura máxima acima das fundações de 41 metros e com comprimento no coroamento de cerca de 100 metros.

A título de exemplo, e para se perceber o processo que suporta a metodologia de observação de barragens recorrendo aos métodos tradicionais, fica, aqui, um tratamento minucioso das observações fornecidas pela EDP.

#### 6.3.4.1. Descrição dos Métodos de Observação Geodésica da Barragem do Alto Ceira (Antiga)

O Sistema de Observação Geodésico (SOG), implementado para a determinação dos deslocamentos da barragem do Alto Ceira, consiste numa rede de Triangulação, uma linha poligonal e uma linha de nivelamento geométrico no coroamento. As duas primeiras permitem efetuar o controlo dos movimentos horizontais da barragem, enquanto a última, possibilita controlar os movimentos verticais.

A rede de Triangulação é composta pelos seguintes elementos:

- Estações, materializadas por pilares, em boa fundação e centragem forçada do tipo “*Wild*”, sendo 4 situadas a jusante da barragem e uma a montante da barragem (PD1, PE1, PFE1, PFD1 e PD2, respetivamente) [Figura 75](#);
- 9 pontos objeto, ou de controlo, materializados por alvos de pontaria ótica, embutidos no paramento de jusante da barragem (FG 663, EF 663, DE 663, CD 663, BC 663, EF 663, DE 663, CD 663, DE 663) [Figura 75](#).

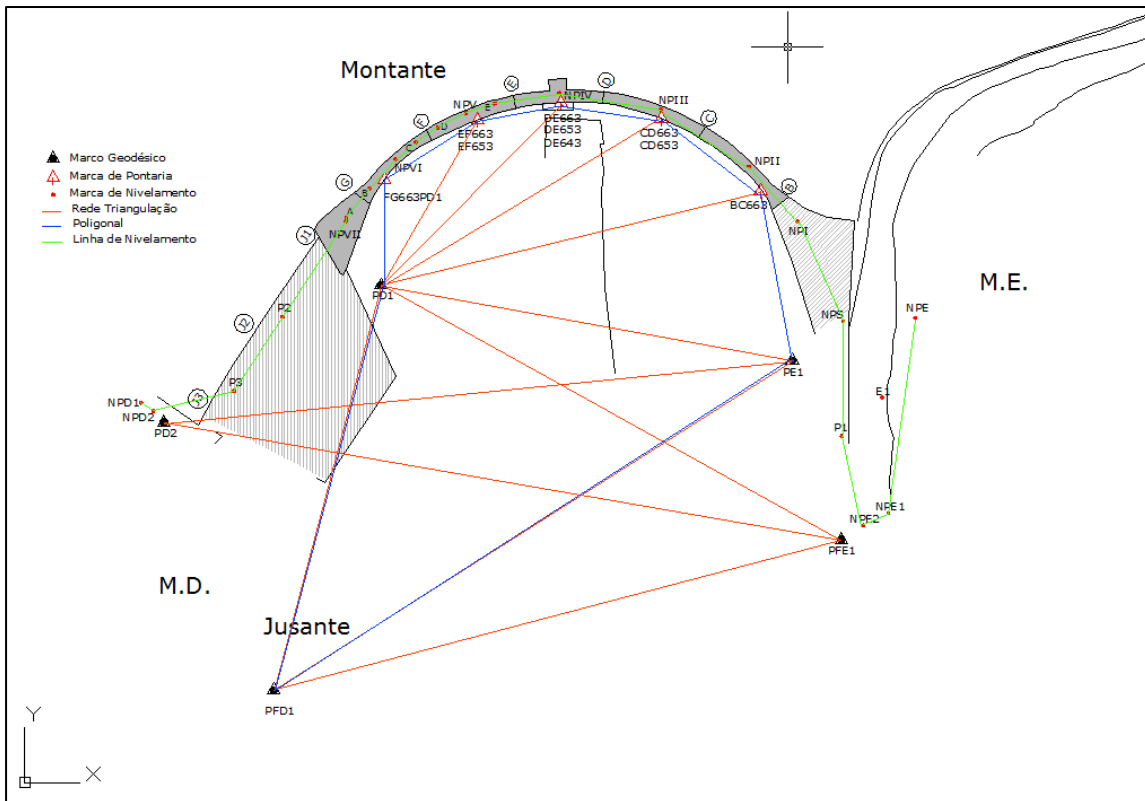


Figura 75 - Representação esquemática da barragem do Alto Ceira com as respetivas redes do SGO.

A linha Poligonal é constituída por 5 pontos de apoio com centragem forçada (BC, CD, DE, EF e FG), solidários com o corpo da barragem (materializados à cota 659,6 m), sendo a sua origem no pilar da margem esquerda, PE1, e o fecho no pilar da margem direita, PFD1 [Figura 75](#).

A linha de Nivelamento Geométrico do coroamento é constituída por:

- 7 pontos de referência (NPE, NPE1, NPE2, NPD2, NPD1, NPD3 e, F);
- 13 pontos objeto (NPS, NPI, NPII, NPIII, NPV, D, C, NPVI, B, A e NPVII);
- Pontos de passagem materializados por aço inox (P1, P2, P3 e P4).

Os dados foram recolhidos em várias épocas de observação, tendo sempre em conta uma época de referência, relativamente à qual se faz a comparação.

Nos dados analisados, referentes à barragem do Alto Ceira e cedidos pela EDP, a época de referência, para a Triangulação, data de 17 de maio de 1984, com a cota de

enchimento da albufeira de 658,2 m. A época de referência, para a linha Poligonal, foi considerada 28 de abril de 1998, com a cota de enchimento a 658,9 m, e a época de referência da linha de nivelamento geométrico foi considerada 20 de setembro de 1989, com a cota de enchimento a 661,3 m.

Muitas vezes é necessário mudar a campanha de referência, por qualquer motivo que se justifique. Este procedimento é possível porque se estão a quantificar deslocamentos relativos, através do Método de Variação de Coordenadas com ajustamento por Mínimos Quadrados.

Tendo sido a barragem finalizada em 1949, quando se analisam os dados geodésicos, parece haver uma falha de observação em algumas épocas, desde a sua construção até 1984. A justificação (segundo a EDP) parece ser o facto de as observações iniciais da barragem serem da responsabilidade do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), pelo que, recuperando algum histórico sobre as observações da Barragem, foi possível perceber que as observações começaram por ser realizadas em março de 1950, com a cota de enchimento da albufeira a 659,1 m e, só mais tarde, passaram a ser da responsabilidade da EDP.

De notar também que esta barragem passou por algumas intervenções ao longo da sua vida útil e, como tal, as campanhas de referência foram sendo reajustadas.

De salientar que a última campanha de observação foi efetuada a 12 de junho de 2012, com a cota de enchimento a 661,5 m, para os três métodos de recolha de dados.

Relativamente à comparação de dados na componente horizontal, o sistema de coordenadas estabelecido é local, sendo o eixo dos XX positivo no sentido da margem direita (M.D.) para a margem esquerda (M.E.) e o eixo dos YY positivo de jusante para montante ([Figura 76](#)).



gráficos representam as diferenças de coordenadas de 13 épocas de observação, sendo considerada, como época de referência, a campanha de 17 de maio de 1984.

Da análise do [Gráfico 5](#) verifica-se que os valores das campanhas de 24 de setembro de 2003 e 4 de maio de 2004, são os que apresentam maiores diferenças, relativamente à época de referência. Nestas campanhas, a cota de enchimento foi de 660,9 m, em 2003, e 659,5 m, em 2004. Na época de referência, a cota de enchimento foi de 658,9 m. O ponto objeto CD663 atinge o valor de 40,4 mm, em 2004. Esta diferença de coordenadas, por ser positiva, indica que o movimento do ponto CD663 é no sentido da margem direita para a margem esquerda.

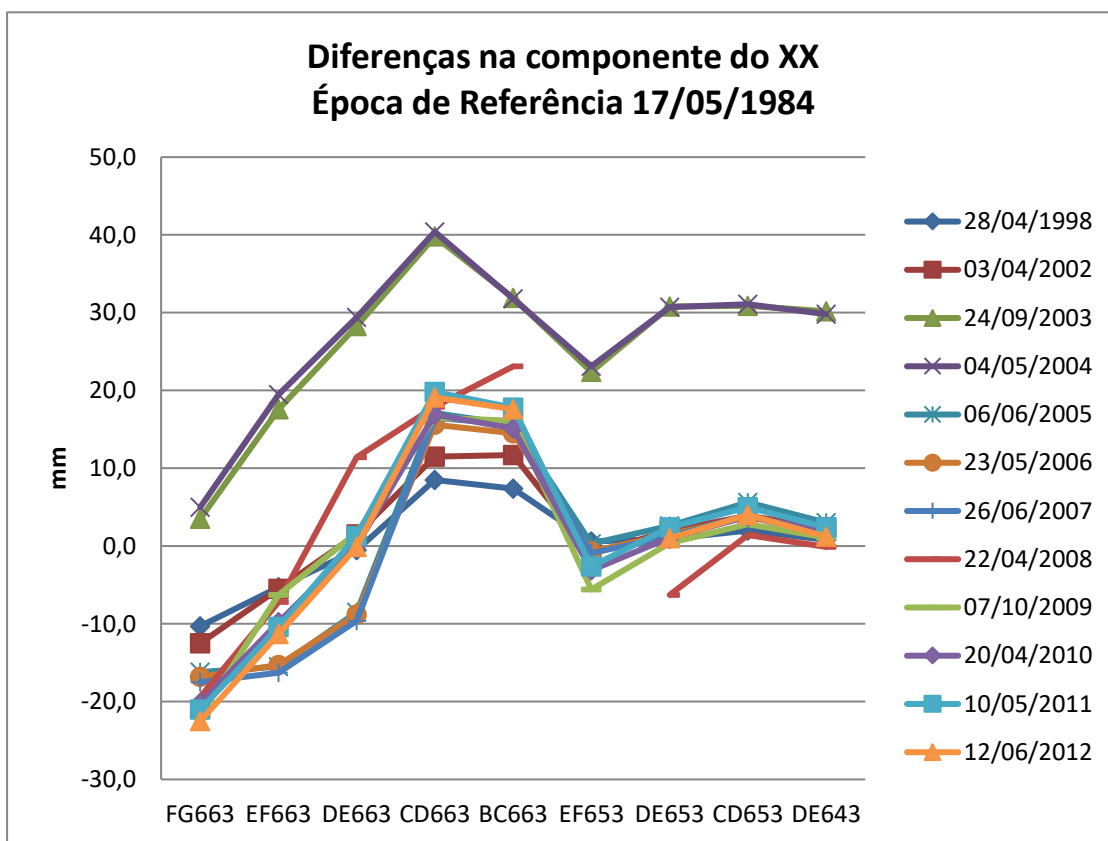


Gráfico 5 - Diferenças na coordenada XX-Triangulação.

Da análise do [Gráfico 6](#) verifica-se que o ponto objeto que apresenta maior valor de deformação é EF663, com 60,2 mm, no sentido de jusante para montante, na campanha de 2009 com a cota de enchimento de 660,5 m.



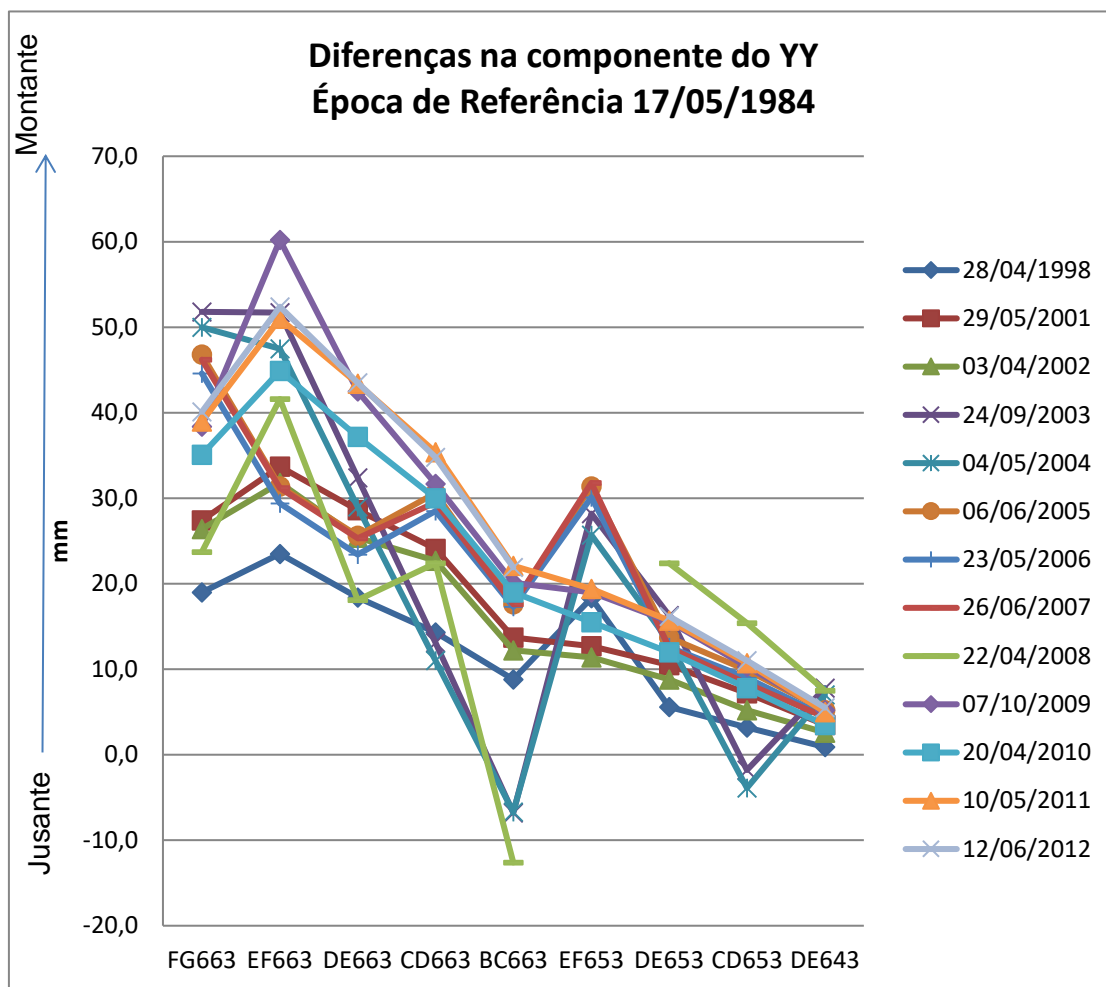


Gráfico 6 - Diferenças na coordenada YY- Triangulação.

Para a Poligonal, a análise dos dados obtidos permite verificar, tal como na Triangulação, movimentos horizontais. Os pontos objeto medidos são os mesmos usados na Triangulação, materializados sobre o coroamento da barragem. Novamente, utilizou-se, como época de referência, a primeira campanha de observação, neste caso, a realizada a 28 de abril de 1998.

Da análise do Gráfico 7, pode concluir-se que as campanhas de 2007 (cota de enchimento de 663,8 m, máximo atingido) e 2012 (cota de enchimento de 661,5 m) são as que apresentam maior variação na diferença de coordenadas em XX. Relativamente aos pontos do coroamento, o deslocamento máximo foi obtido no ponto CD, com 7,6 mm, em 2012, seguido de FG, com 5 mm, em 2007. Esse deslocamento, resultante da diferença de coordenadas de cada época com a primeira, apresenta direção de deslocamento da margem direita para a margem esquerda.

No entanto, o ponto EF, adjacente a FG, próximo da margem direita da barragem, apresenta, em algumas campanhas (2003, 2008, 2009, 2010 e 2011), uma tendência de movimento da margem esquerda para a direita e, na última campanha em 2012, novamente da direita para a esquerda.

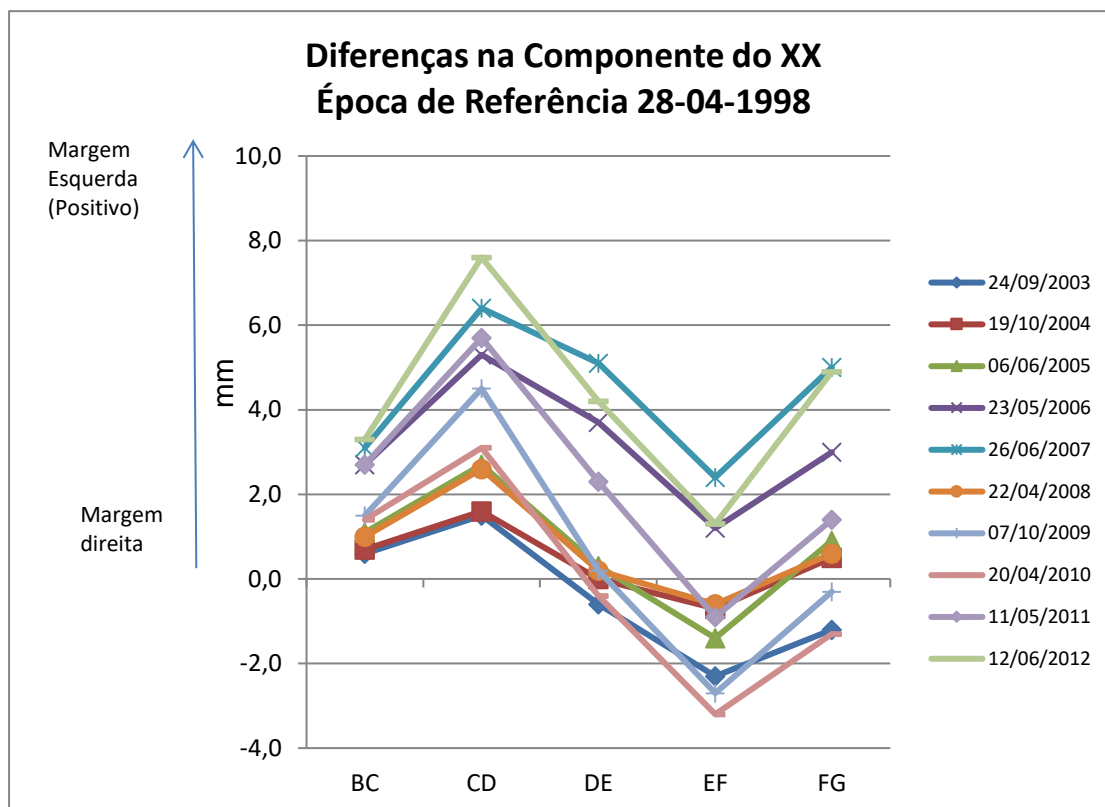


Gráfico 7 - Diferenças na coordenada XX, Poligonal.

O Gráfico 8, apresenta o deslocamento na componente YY e mostra uma tendência de movimento de jusante para montante em todas as campanhas. A última campanha de 2012 é a que apresenta maior desvio, em pontos situados na parte central do coroamento CD, DE e EF, com 10,6 mm, 9,8 mm e 12,1 mm, respetivamente.

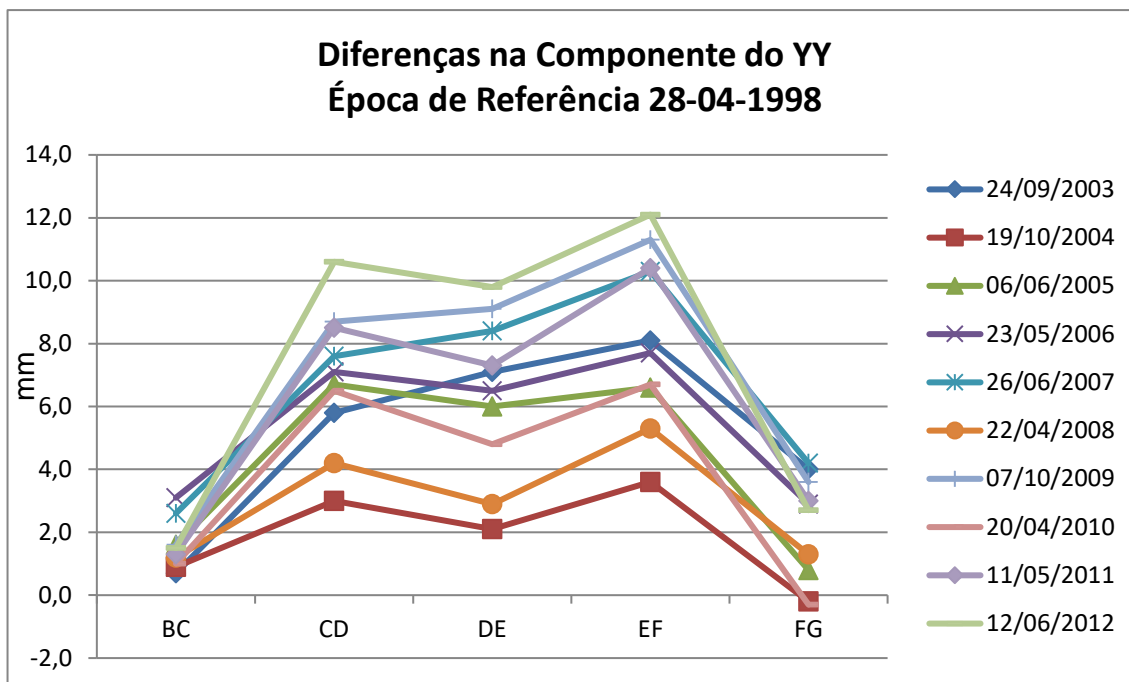


Gráfico 8 - Diferença na coordenada YY, Poligonal.

Para análise dos movimentos verticais foram usados os dados relativos à linha de Nivelamento Geométrico existente.

O Gráfico 9, representa a comparação de diferenças de nível entre cada dois pontos objeto, com a diferença de nível entre os mesmos dois pontos objeto da época de referência. Foram analisadas 20 épocas de observação e verifica-se que a diferença de nível entre os pontos NPVI-B, do lado direito do gráfico e que correspondem à margem direita da barragem, apresentam um valor máximo de diferença na última época de observação que corresponde a -18,09 mm. O sinal (-) é devido ao facto do ponto NPVI ter maior altitude que o ponto B, no coroamento. Esta diferença teve um aumento gradual, desde a primeira época de observação, apresentando sempre a mesma tendência de deslocamento, no sentido ascendente.

O mesmo aconteceu com a diferença de nível entre os pontos B-A, embora com um valor de movimento ascendente menor.

No caso das diferenças de nível entre os pontos objeto, situados na parte central do coroamento da barragem (NPIV-E, E-NPV, NPV-D, D-C, C-NPVI), estes apresentam valores positivos, mas sempre com a mesma tendência de deslocamento, no sentido do

assentamento atingindo o valor máximo de 7,3 mm, na diferença de nível entre os pontos D-C, na última época de observação.

A diferença de nível correspondente a NPIII-NPIV (margem esquerda da barragem), apresenta novamente o sinal negativo, visto que o ponto NPIII está mais alto que NPIV. O deslocamento apresenta o valor de -7,11 mm e de acordo com a análise dos valores individuais das cotas de cada um dos pontos parece ser no sentido ascendente.

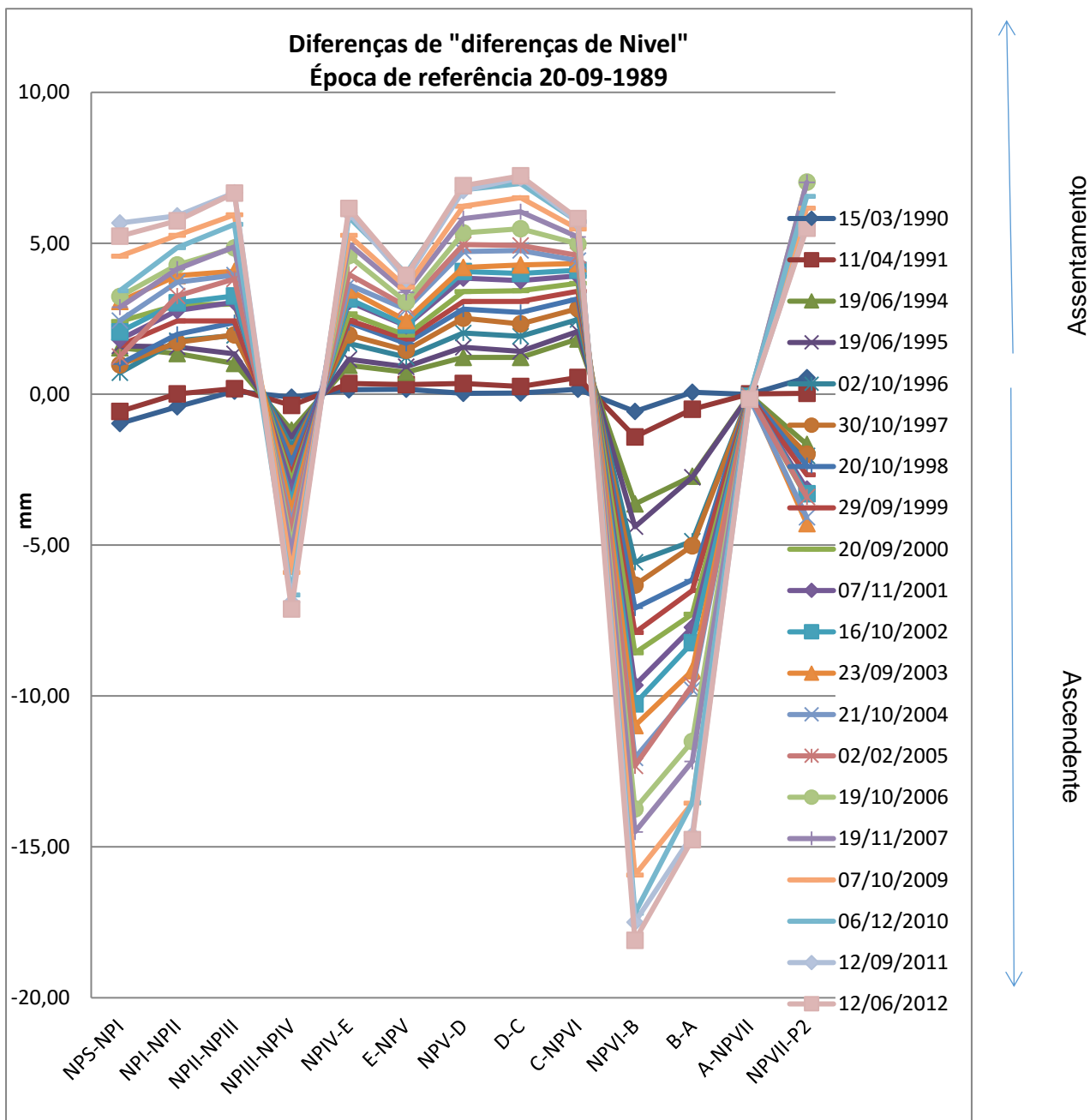


Gráfico 9 - Diferença de diferenças de nível.

No **Gráfico 10**, apresenta-se, a análise das altitudes de cada um dos pontos objeto, ao longo das várias épocas de observação. Verifica-se que o ponto objeto NPVI é o que apresenta maior diferença de altitude, atingindo 39,7 mm, na última época de observação em relação à época de referência.

O ponto C, adjacente ao NPVI, apresenta um valor de diferença na altitude, igualmente, elevado, com o valor de 33,9 mm.

De referir que a cota de enchimento da albufeira na última campanha foi de 661,5m, na penúltima de 661,8m e na campanha de referência foi de 661,3m. Não se consideram diferenças significativas na cota do enchimento que possam influenciar as diferenças de coordenadas verificadas.

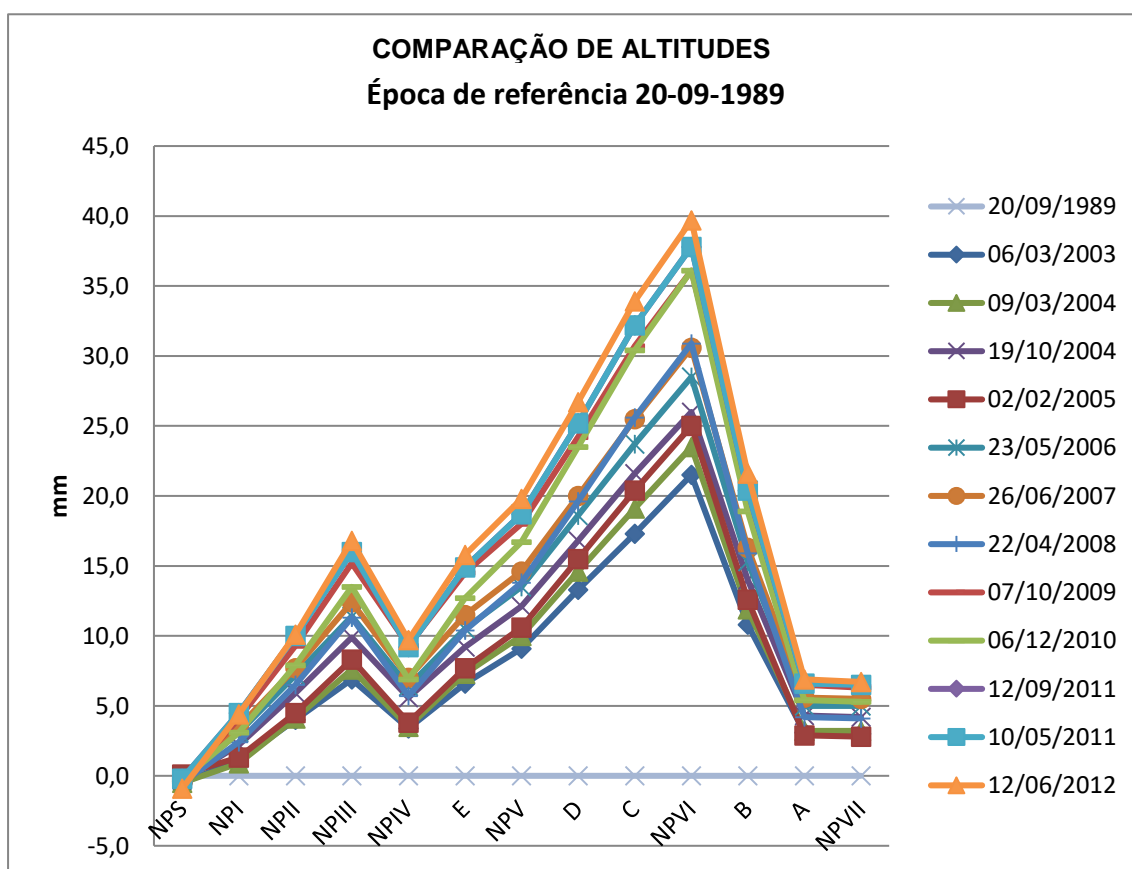


Gráfico 10 - Comparação de altitudes dos pontos objeto.

Em suma, os dois métodos de cálculo de coordenadas horizontais, Triangulação e Poligonal, são consistentes no que respeita ao sentido do movimento dos pontos objeto no coroamento da barragem, tanto na componente do XX como do YY, no entanto, os valores numéricos obtidos para a diferença de coordenadas, em cada um dos pontos na Triangulação, apresentam valores mais elevados do que na Poligonal.

Relativamente aos movimentos verticais, verifica-se que a estrutura da barragem apresenta movimentos contraditórios quando se compara as diferenças de nível dos pontos ao longo do coroamento. Em pontos do coroamento junto da margem direita, verificam-se movimentos ascendentes até um valor máximo de -18,09 mm, na última época de observações. Na parte central verificam-se movimentos descendentes e, no coroamento, mais próximo da margem esquerda, o movimento, também é no sentido ascendente, apresentando 6,6mm de diferença máxima, entre NP11-NP13, na última campanha.

Parece que a deformação da barragem não está diretamente relacionada com a pressão que eventualmente a albufeira faz na estrutura. Haverá eventualmente uma variação a nível dos materiais, como por exemplo a expansão do betão.

#### 6.3.4.3. Processamento Interferométrico da Barragem do Alto Ceira e comparação com as observações Geodésicas

A aplicação da técnica MT-InSAR em estruturas antigas, como é o caso da barragem do Alto Ceira, teve como objetivo avaliar o desempenho desta técnica em condições envolventes desfavoráveis à sua aplicação (encostas em ambiente de montanha). Para tal, recorreu-se ao arquivo da ESA para estimar o historial de deslocamento da barragem, através da análise de imagens SAR obtidas com os satélites ERS e Envisat, com baixa coerência e baixa resolução espacial e temporal (Figura 77). Foram usadas 42 imagens SAR, obtidas com o satélite ERS, e 21 imagens SAR, obtidas com o satélite Envisat, adquiridas nas trajetórias 180, entre 1992 e 1998 e entre 2003 e 2009, respetivamente. Na análise detalhada dos mapas de refletividade (Figura 78), foram visíveis duas reflexões pequenas, provenientes do coroamento da barragem.

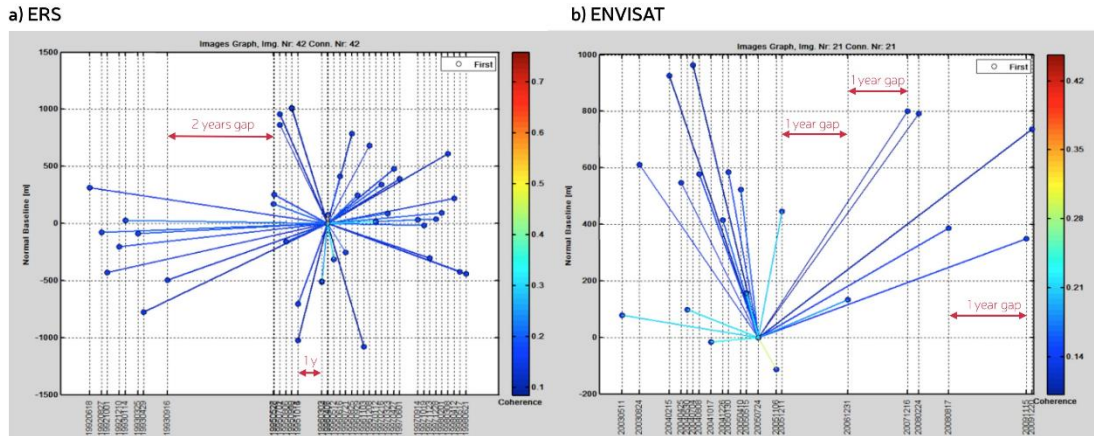


Figura 77 - Gráfico da distribuição dos conjuntos de dados utilizados no processamento interferométrico: a) ERS e b) Envisat.

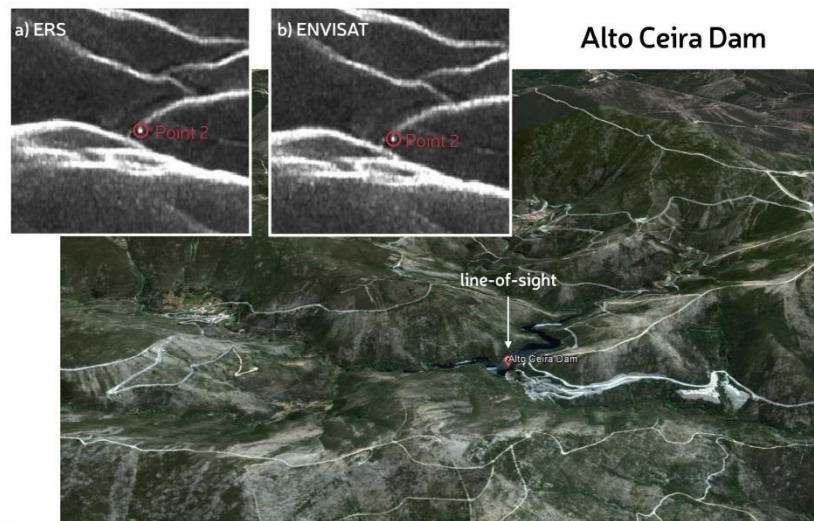


Figura 78 - Mapas de Refletividade obtidos a partir do conjunto de imagens SAR adquiridas pelos satélites a) ERS e b) Envisat. O ponto com marca a vermelho (PS 2) apresenta maior intensidade e foi selecionado para extrair o sinal de deformação, através da abordagem PS-InSAR.

A avaliação do potencial InSAR para detetar deformações na estrutura da barragem, em condições desfavoráveis (ambiente, combinação do conjunto de dados), foi efetuada comparando o sinal refletido no ponto PS 2, na série temporal InSAR, com o ponto NPIII, obtido a partir dos dados do nivelamento. Os dados do nivelamento foram obtidos do (SOG), implementado na estrutura da barragem do Alto Ceira, como referido na secção 6.3.4.2. A análise das observações geodésicas, para os movimentos horizontais, revela que, em 2009, os pontos do coroamento, perto da margem direita da barragem, apresentam um movimento maior no sentido de jusante para montante (60,2 mm) e os



pontos perto da margem esquerda apresentam um movimento maior, em 2004, no sentido da margem direita para a margem esquerda (40,4 mm). Os deslocamentos verticais, observados no coroamento da barragem na última campanha de nivelamento em 2012, mostram que os pontos observados perto da margem direita (NPVI) têm um movimento ascendente (39,7 mm) e, na margem esquerda, o ponto NPIII tem um movimento também ascendente (16,8 mm), desde a época de referência, em 1989. Na parte central do coroamento da barragem, o ponto NPIV sofre um deslocamento menor (9,7mm), também ascendente, no mesmo período. As observações com imagens SAR mostram que, recorrendo às técnicas interferométricas adequadas, conseguem-se resultados semelhantes no ponto PS 2, onde se verifica uma tendência de deslocamento também ascendente, estando correlacionado com o ponto NPIII (Figura 79), isto se não houver falhas nos dados obtidos, no caso do ERS.

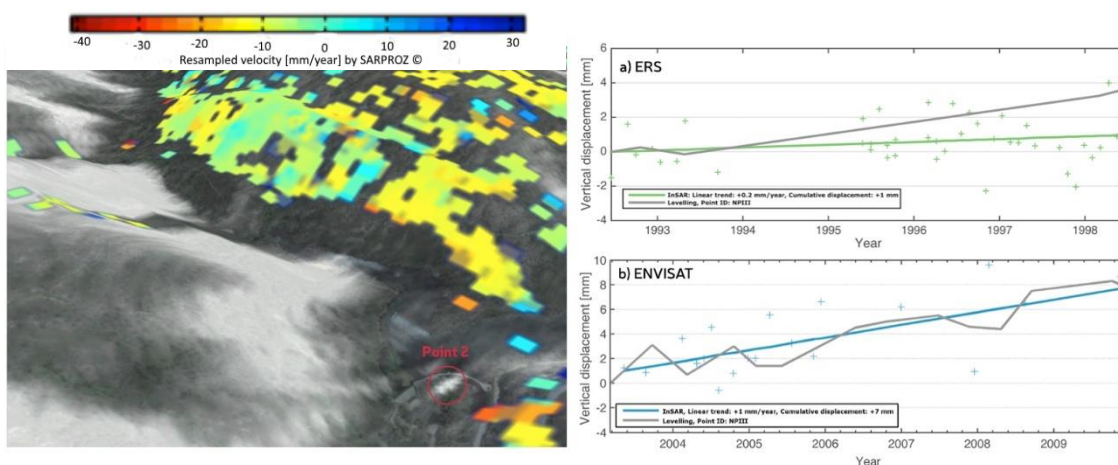


Figura 79 - Exemplo da análise da estabilidade da encosta com imagens Envisat e a técnica Quasi-PSInSAR, sobreposta ao mapa de refletividade (esquerda). Com PS-InSAR, (direita) estimaram-se séries temporais de deformação linear no Ponto 2, com imagens a) ERS e b) Envisat e comparou-se com os dados geodésicos do nivelamento no ponto NPIII.

No processamento InSAR fez-se a interpolação dos níveis de enchimento da albufeira com o processamento dos dados Envisat, obtidos na linha de vista do sensor (Gráfico 11), a tendência da deformação linear apresenta o valor de 0,5mm/ano, sendo bastante coerente com a tendência da deformação, até 2007. Aparentemente o nível da água tem influência no resultado do processamento.

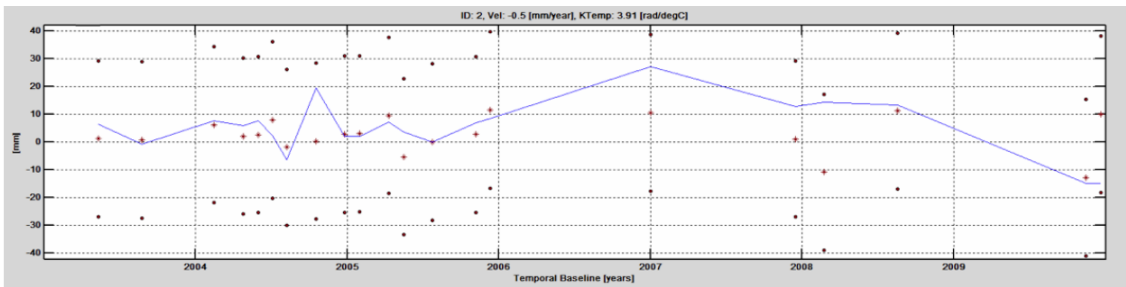


Gráfico 11 - Tendência da deformação linear, resultante da relação do nível de enchimento com o processamento InSAR

Estes resultados foram também validados com os dados do nivelamento geométrico para as mesmas épocas de observação.

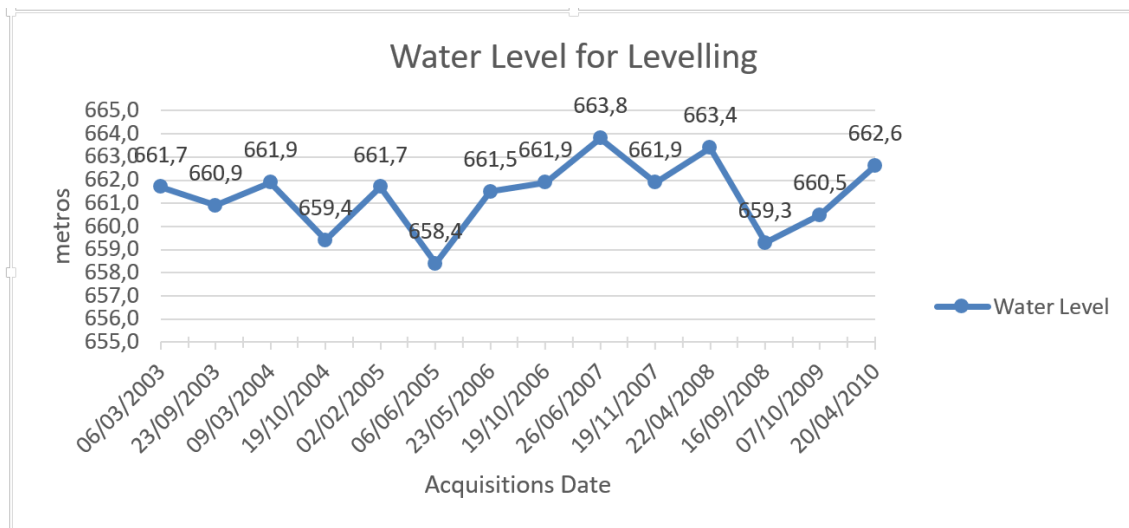


Gráfico 12 - Níveis de enchimento nas campanhas de observação do Nivelamento

O [Gráfico 12](#), apresenta a variação dos níveis de enchimento da albufeira. Verifica-se um pico máximo em 2007, que poderá ter influenciado o resultado InSAR a partir dessa época.

O [Gráfico 13](#), apresenta a forma como foram relacionados os níveis de água da albufeira com o deslocamento horizontal obtido pelo método da Triangulação, ao longo do tempo. Da sua análise verifica-se que parece haver alguma relação dos níveis de enchimento da albufeira com os movimentos horizontais jusante-montante e vice-versa. Ou seja, o

maior deslocamento para montante verifica-se na campanha de 2009 para o ponto EF663, com 60,2mm, que não corresponde ao nível máximo da albufeira. A mesma situação acontece na campanha de 2003. O menor deslocamento verifica-se no ano de 2007, que corresponde ao nível máximo de enchimento da albufeira. Poderão estes valores significar que como o movimento é de jusante para montante a albufeira cheia poderá criar alguma dificuldade ao deslocamento naquele sentido.

Seria esperado, no entanto, que o enchimento máximo da albufeira influenciasse o movimento de montante para jusante.

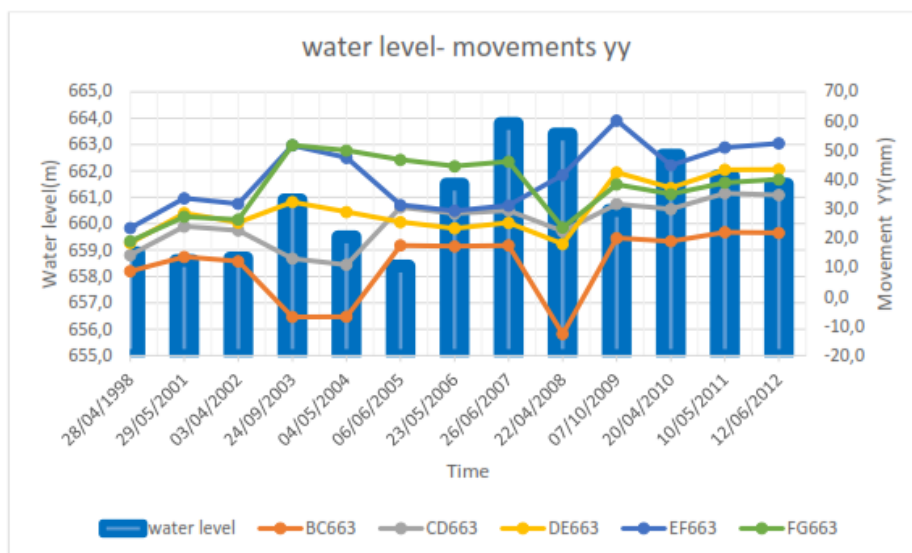


Gráfico 13 - Relação entre o movimento horizontal da Barragem do Alto Ceira e os respetivos níveis de enchimento.

Da comparação dos dados SAR com as observações geodésicas verifica-se que há alguma correlação, mas muito pequena, principalmente quando se compara a deformação ao longo da linha de vista do sensor (LOS) com o nivelamento no período de 1992 a 1998 e 2004 a 2009, (Figura 79 direita). Este deslocamento obtido a partir das imagens SAR não corresponde exatamente à zona de maior deslocamento vertical da barragem nas observações geodésicas, que se verifica ser no Ponto NPVI, com 39,7 mm de deslocamento ascendente. A possibilidade de comparação dos dados SAR, acontece para o ponto NPIII com 16,8mm de deslocamento ascendente, sendo essa a direção que coincide com a direção do deslocamento dada pela linha de vista do sensor.

# CAPÍTULO 7 – APERFEIÇOAMENTO DE TÉCNICAS INSAR

A análise efetuada sobre as abordagens para “Avaliação do Potencial dos Métodos MT-InSAR” permitiu identificar quais os requisitos necessários para se conseguir otimizar resultados quando se aplicam metodologias MT-InSAR, em estruturas artificiais.

As abordagens MT-InSAR divergem, quando se analisam deslizamentos de terras ou quando se analisam deformações em estruturas artificiais. Por exemplo, na técnica DInSAR tradicional, que consiste em combinar apenas duas imagens SAR, a área sujeita a deslizamentos deverá ser filtrada espacialmente, de forma a compensar os erros devidos à topografia e melhorar os resultados, principalmente se a área estiver coberta por vegetação. No caso de haver estruturas na área de estudo, como a retro-reflexão dos sinais é mais estável, estas são mais fáceis de analisar, desde que haja boa resolução espacial. O facto de as superfícies a analisar serem diferentes, é um fator importante na monitorização com técnicas MT-InSAR.

No âmbito deste trabalho, foram desenvolvidos módulos de software/algoritmos, com a finalidade de mitigar as limitações detetadas nas abordagens MT-InSAR padrão. Estes algoritmos foram desenvolvidos em parceria com a equipa de investigação do projeto *RemotWatch* a decorrer em simultâneo com o desenvolvimento desta tese. Assim, destacam-se dois grupos de abordagens desenvolvidos ao longo do trabalho, e que vão ao encontro dos exemplos apresentados no capítulo anterior: monitorização de encostas/taludes e monitorização de estruturas.

A melhoria dos algoritmos de processamento MT-InSAR, no caso de monitorização de deslizamentos de terras/taludes consistiu em:

1. Selecionar pares de imagens, tendo por base linhas de base pequenas ou ligações bastante coerentes;
2. Selecionar pontos, com base no índice de estabilidade da amplitude e na coerência espacial global;
3. Estimar a convergência entre a fase radar e a base perpendicular (importante na estimativa da altitude/remoção da topografia) e entre a fase radar e a base temporal (importante na tendência de deformação linear).

No caso de monitorização de estruturas (barragens, estradas em pontes, etc..), foram desenvolvidos algoritmos com vista a melhorar o desempenho em diversas áreas, salientando-se:

A seleção de pontos, com base no índice de estabilidade da amplitude e na coerência espacial global e/ou informação externa, como por exemplo, máscara binária;

1. A estimativa da convergência entre a fase radar e a base perpendicular (estimativa da altitude/remoção da topografia), e entre a fase radar e a base temporal (tendência da deformação linear);
2. As alterações estruturais (caso de barragens, pontes), devido à componente de dilatação térmica ( $k_{temp}$ ), e a movimentos horizontais resultantes de mudanças do nível das águas ( $K_{wl}$ );
3. A utilização de um modelo de dilatação térmica, para ser efetuada a primeira iteração no processo de estimativa desta componente;
4. O cálculo dos efeitos de  $k_{temp}$  ou ( $K_{wl}$ ), obtidos a partir da direção da linha de vista do satélite, para a direção em que o movimento é esperado.

Durante o desenvolvimento de técnicas avançadas de mitigação da dilatação térmica para séries temporais MT-InSAR, concluiu-se haver possibilidade de calibrar e corrigir as medições de temperatura, considerando-as como entradas (*input*) para a análise de correlação. O método pode ajudar a estimar, adequadamente, o efeito da dilatação térmica em estruturas e distingui-lo da tendência da deformação linear observada na estrutura.

Numa fase mais avançada do trabalho, decidiu-se sobre a melhor forma de integrar as vantagens das várias abordagens MT-InSAR existentes para apoiar o desenvolvimento de novos algoritmos, focados especificamente, na monitorização de estruturas. As conclusões principais resultantes do processamento das várias áreas/estruturas permitiram conhecer as limitações mais importantes, que seria necessário ultrapassar, para monitorização de estruturas. Com esse intuito, foram listados diversos módulos de *software* já existentes, e inovador no caso do algoritmo *Denoising* (para remoção de outliers) apresentados na Tabela 1.

Tabela 5 - Algoritmos existentes e algoritmo Inovador *Denoising*

<b>Categoria</b>	<b>Nome</b>	<b>Descrição</b>
CSK	get_simplifiedata.m	Conjunto de algoritmos desenvolvidos especialmente para facilitar o processamento /manipulação CSK
	is_inside.m	
	kml_parser.m	
	xml_arg.m	
hdt_regression	adjust_all_it.m	Conjunto de algoritmos desenvolvidos para corrigir os efeitos do MDT nos resultados MT-InSAR
	amb_corr_it.m	
	comp_ts.m	
	connect_points.m	
	corr_phase_dh.m	
	corr_point.m	
	corr_vec.m	
	create_ps_map.m	
	load_bperp.m	
	load_itab.m	
	make_doubles_surr.m	
	plot_all.m	
sentinel1_tests	deramp_burst.m	Conjunto inovador de algoritmos para processar dados do novo satélite Sentinel-1 da ESA
	deramp_phase.m	
	deramp_script.m	
	geotiff2bin.m	
	get_allparm.m	
	get_azfmrates.m	
	get_burstinfo.m	
	get_dr_burst.m	
	get_fdc.m	
	get_geol.m	
	get_orbits.m	
	interp_orbit.m	
	interp_poly.m	
	interp_v.m	
	load_burst.m	
	s1_parser.m	
	xml_arg.m	
	xml_arg_arg.m	
xml_arg_dir_1.m		
denoising	denoising.m	Análise multivariada de <i>outliers</i> em dados InSAR
	maska_insar.m	Scripts para criar máscaras em interferogramas para limitar a coerência
	elevation_accuracy.m	Cálculo da precisão da altitude estimada, baseado na linha de base perpendicular do conjunto de dados de entrada (com base em <i>Bamler et al, 2009</i> )

<b>Categoria</b>	<b>Nome</b>	<b>Descrição</b>
	SARPROZ_stdvel_from_coh.m	Cálculo do desvio padrão da velocidade (def.lin) baseada na coerência (com base em <a href="#">Colesanti et al.</a> )
	Pocasi	Script de Bash para obter informação das condições meteorológicas (incluindo informação quantitativa) para os tempos de aquisição SAR
	csv2shp_sarproz	Conversão do format CSV do SARPROZ para o formato Shapefile da ESRI
	egm2wgs	Conversão do MDT do modelo EGM96 (ex. SRTM) para o elipsoide WGS84 (com base em <a href="#">A. Ustun scripts</a> )
	FULL_STAMPS_C_band.sh	Cadeia de processamento completa do StaMPS para processamento de dados da Banda-C (Envisat/ERS/Radarsat) para aplicação em supercomputadores
	StamPS scripts	Vários algoritmos para melhorar ou corrigir ligeiramente o funcionamento do StaMPS
	RemotWatch Toolbox	Ferramenta baseada em Matlab que permite visualizar, manipular e interpretar os resultados InSAR
	RemotWatch Plugin	Plugin baseado na linguagem Python QGIS que permite a visualização, manipulação e interpretação de resultados InSAR em ambiente SIG

Na secção seguinte é descrita a aplicação do algoritmo inovador *Denoising* para análise de resultados com ruído, obtidos num processamento MT-InSAR, com um software InSAR já existente. O objetivo é analisar de novo esses resultados numa cadeia de processamento e remover os pontos duvidosos de forma a facilitar a análise da estruturas.

## 7.1. Algoritmo *Denoising*-Análise Multivariada de *Outliers* em Dados SAR

A presença de *outliers* nos resultados da monitorização de estruturas artificiais, foi um estímulo para se desenvolver uma abordagem semi-automática de análise, que permitisse descartar esses *outliers*. Quando se trabalha com grandes quantidades de dados, o procedimento para eliminação de *outliers* deverá manter-se fiel à análise de dados no geral, o que permite integrar a componente humana para tomada de decisões, ou integrar algoritmos de “*machine-learning*” para, posteriormente, se analisarem dados em tempo quase real. O procedimento desenvolvido permite analisar diferentes tipos de



resultados (*outputs*), provenientes do processamento MT-InSAR, a partir do *software* InSAR associado, o qual consegue receber os parâmetros de *output* em ficheiros com valores separados por vírgulas (*CSV-Comma-Separated Values*), com uma estrutura específica. O algoritmo final destina-se a apoiar a cadeia de processamento e a fornecer, aos utilizadores, resultados finais, sem *outliers*, que serão mais fáceis de entender e de reavaliar. A melhoria do algoritmo, no sentido de o tornar capaz de ter em conta a análise multivariada de *outliers*, recorrendo ao método estatístico de Análise de Componentes Principais, (*PCA-Principal Componentes Analysis*) e a outros procedimentos matemáticos, levaram a melhorar o desenvolvimento da abordagem já existente. A formulação do problema sugere que as estimativas habituais da altitude e do deslocamento dos pontos com o método MT-InSAR são, geralmente, consideradas corretas, quando a coerência dos pontos selecionados atinge o valor de 1. Uma outra abordagem bastante comum de direcionar os resultados finais InSAR, passa, por exemplo, por impor ao valor da coerência um limite inferior de 0,7. Também pode acontecer que, mesmo que a coerência de alguns pontos seja baixa, isto é, próxima de 0, esses pontos contenham informação importante. Este poderá ser o caso, por exemplo, do ponto em que a estimativa da altitude sobre um edifício está em concordância com a altitude dos pontos envolventes, mas o deslocamento está mal avaliado, porque é afetado por saltos de fase, mudanças repentinas, distorção, decorrelação acentuada, dilatação térmica, etc. fazendo baixar a coerência desse ponto. Ou então, pelo contrário, o ponto em que o deslocamento está dentro do intervalo de valores correspondes ao deslocamento dos pontos envolventes, mas com estimativa de altitude incorreta. Um outro caso poderá ocorrer quando a coerência do ponto é elevada, mas devido ao seu afastamento em relação ao conjunto principal de dados, associado por exemplo, à reflexão sobre a água ou sobre a vegetação, é considerado como sendo *outlier*. Nestes casos, é necessária experiência em técnicas de processamento InSAR para encontrar grupos de pontos difusores com comportamento semelhante. Através da avaliação de relações espaciais entre eles, e da conformidade entre os parâmetros estimados num mesmo meio envolvente, os *outliers* podem ser tratados manualmente. Assim, o objetivo passa por avaliar o grupo de pontos que se considera estarem “bem” processados, fazendo a análise completa da informação contida no conjunto de dados e, depois, realizar uma pós-análise dos *outliers* para se decidir sobre a sua remoção ou não, do conjunto de resultados final. Deve realizar-se, também, a filtragem dos *outputs* para efeitos de visualização e, basicamente, procurar características que poderão conduzir-nos a melhores resultados, evitando, ao mesmo tempo, fixar apenas o valor da coerência. Adicionalmente, o modelo precisa por vezes, de ser mais abrangente, isto é, englobar outros parâmetros que afetam o movimento

dos pontos, como por exemplo, deslocamento não-linear/cumulativo, tendência sazonal, dilatação térmica, efeito da variação do nível da água etc. Além disso, cada ponto do conjunto de dados consiste em séries temporais de deformação, igualmente importantes. O problema passa então a ser objeto de análise multidimensional e multivariada, de *data mining*, de deteção multivariada de *outliers*, de análise de séries temporais, do teste de hipóteses e de “*machine-learning*”, no caso de haver interesse em automatizar. O estado da arte desta abordagem considera o facto de que, nem todos os *outliers* devem ser considerados desajustados, porque alguns desses pontos, aparentemente desajustados poderão identificar zonas afetadas por movimentos maiores. Esta situação, poderá levar, no futuro, ao desenvolvimento de um algoritmo de previsão. Por agora, considera-se apenas o facto de, em alguns casos, ser necessária uma exploração mais aprofundada dos *outliers*, efetuando observações específicas para aferir se o ponto é suficientemente importante que se justifique mantê-lo no conjunto de dados. Mas, por outro lado, algumas vezes, para melhorar a visualização na representação dos resultados em áreas extensas, é necessário remover *outliers*.

Para análise de resultados, obtidos com técnicas MT-InSAR, com possibilidade de alguns PS serem *outliers*, foi efetuado o processamento de um conjunto de 32 imagens Envisat ASAR referentes à cidade de Bratislava (Eslováquia) no período de 2002 a 2010, (Figura 80).

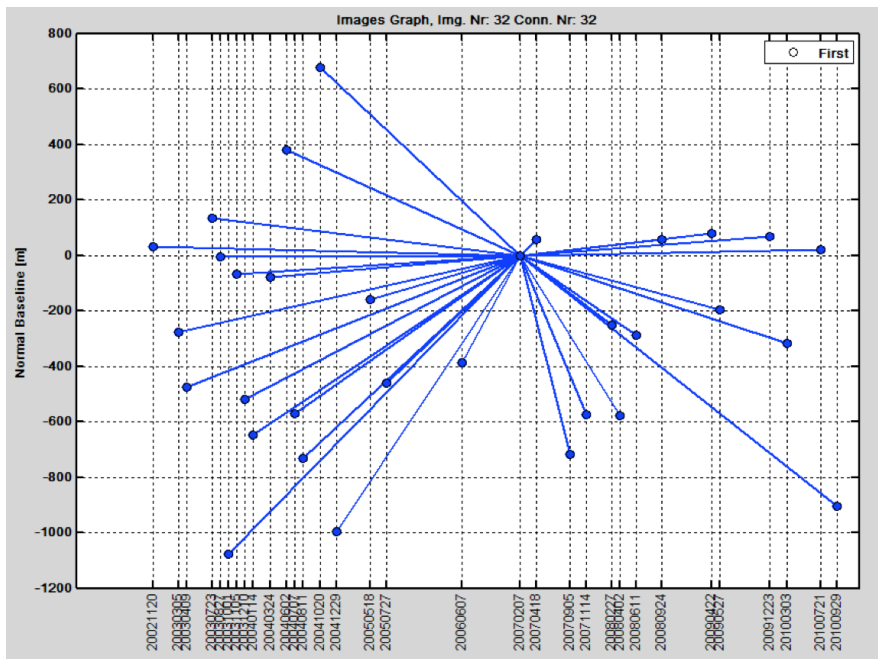


Figura 80 - Representação gráfica da distribuição das imagens SAR utilizadas.

Cada imagem adquirida está ligada a uma só imagem *master*, que é selecionada de entre o conjunto, de acordo com o critério de ter a menor base perpendicular e temporal no conjunto de dados e este conjunto de dados é processado pelo algoritmo que usa a técnica PSI padrão, estimando a altitude e a velocidade residuais dos pontos (Figuras 81 e 82, respetivamente). Sem atribuir um limite para o valor da coerência, as coordenadas da imagem (linhas, colunas), apresentam-se conforme se mostra nas figuras.

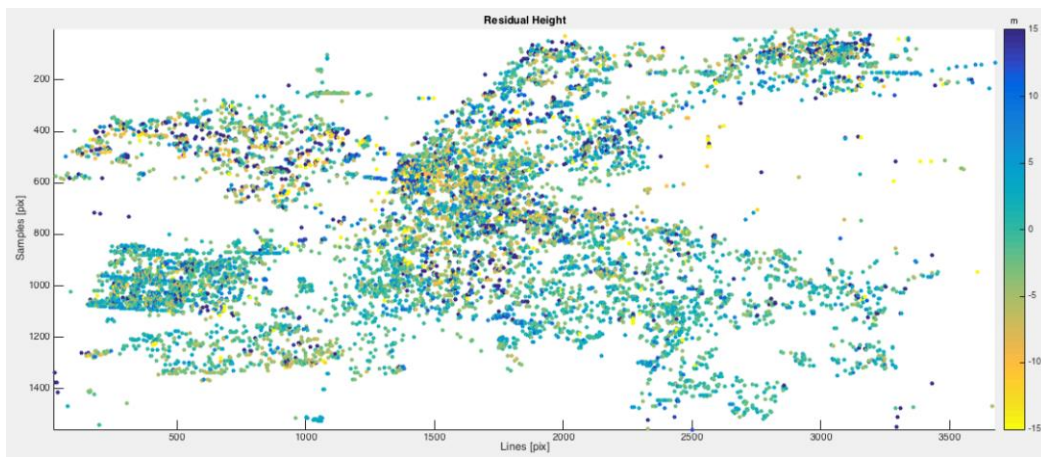


Figura 81 - Altitude residual, estimada pela análise PSInSAR padrão.

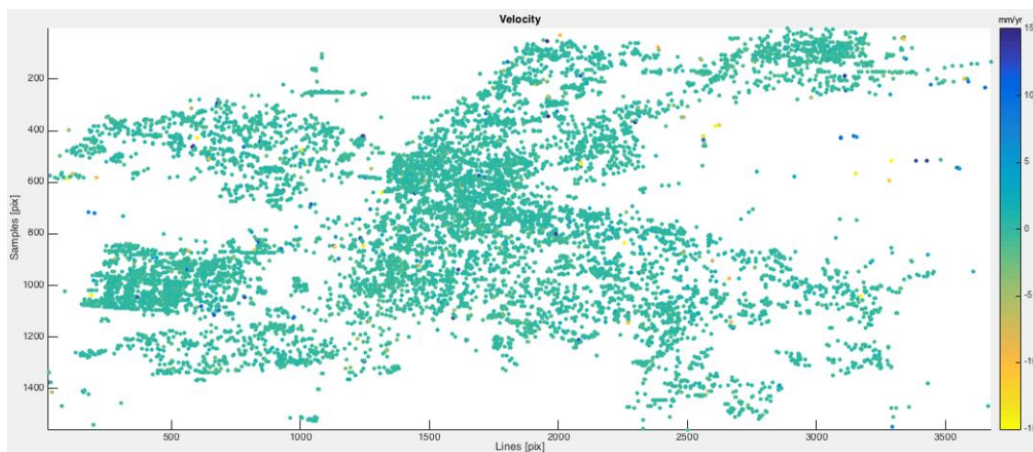


Figura 82 - Velocidade residual, estimada pela análise PSInSAR padrão.

A inovação desta implementação está no facto de identificar características que permitem aos utilizadores decidir se o ponto é ou não fiável, utilizando algoritmos baseados em densidade de padrões, para identificar *clusters* na área de análise. *Clusters* são regiões de alta densidade de determinados padrões, separadas por regiões de baixa densidade

desses mesmos padrões. Entende-se que uma região é densa, quando um dos seus pontos está rodeado por outros pontos, com uma distância específica. Essa vizinhança entre pontos com iguais características permite definir um conjunto mínimo de pontos, *minpts*, classificando-se essa região como densa.

Os passos 1, 2, e 3, a seguir apresentados, permitem avaliar a existência ou não de *outliers*, nos resultados do processamento MT-InSAR e proceder à sua eliminação.

### 1. **Clustering Espacial Baseado em Densidade de Aplicações com Ruído (DBSCAN)**

Uma vez que a estimativa dos parâmetros é efetuada dentro de redes interligadas por arcos (Figura 83), uma possível abordagem para identificar a localização de *outliers* foi baseada na aplicação (DBSCAN, Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise), [ESTER et al. 1996](#))

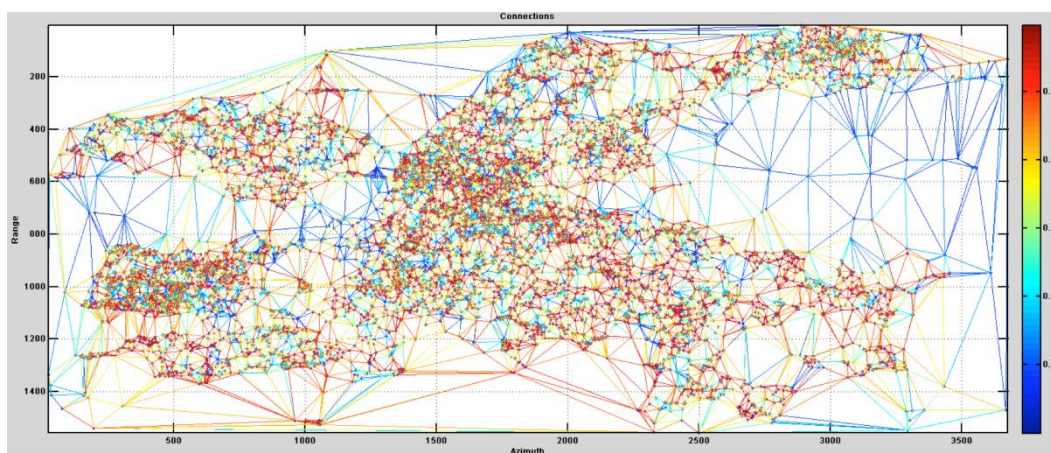


Figura 83 - Redes de pontos (PS) interligados.

A dificuldade na aplicação desta técnica poderá ocorrer durante a configuração dos parâmetros de *input* (*raio*, *minpts*). O *raio* define a distância a que podem estar os pontos para os agrupar no *cluster* principal, e *minpts* estabelece o número mínimo de pontos que deve conter cada *cluster*, considerando o valor do *raio*, definido anteriormente, na envolvente do ponto. Contudo, ainda que outros métodos semelhantes de *clustering* de pontos selecionem esses parâmetros de forma automática, ou se baseiem em pressupostos completamente diferentes (OPTICS, LOF, LOCI, ...), aqui decidiu-se manter uma abordagem simples, que não exige a definição manual dos parâmetros do *raio* e do *minpts* (o traçado das distâncias é feito por ordem ascendente/hierárquica e

definiu-se o mínimo de pontos igual a 2 para formar um *cluster*). Na aplicação DBSCAN para agrupamento, os pontos são classificados como *Group*, *Noise* e *Islands*. (Figura 84):

- *Group* - os pontos principais do conjunto de dados;
- *Noise* - os pontos a serem descartados imediatamente, mediante o critério que estabelece o valor da distância ao grupo principal de pontos;
- *Islands* - os pontos a serem avaliados nos passos seguintes.

O algoritmo seleciona arbitrariamente um ponto e identifica todos os pontos densamente conectados com esse ponto com base nos parâmetros *raio* e *minpts* definidos. Se o ponto fica no conjunto de dados principal, *Group*, então é formado o *Cluster*. Se o ponto fica na fronteira, definida pelo valor *raio*, isto é, na vizinhança do conjunto principal de dados, *Islands*, então será avaliado no passo seguinte, se fica fora do *Group* e da fronteira então é descartado.

Por fim, obtém-se o conjunto de pontos com estrutura de *cluster* e uma boa interligação com o conjunto de pontos principal.

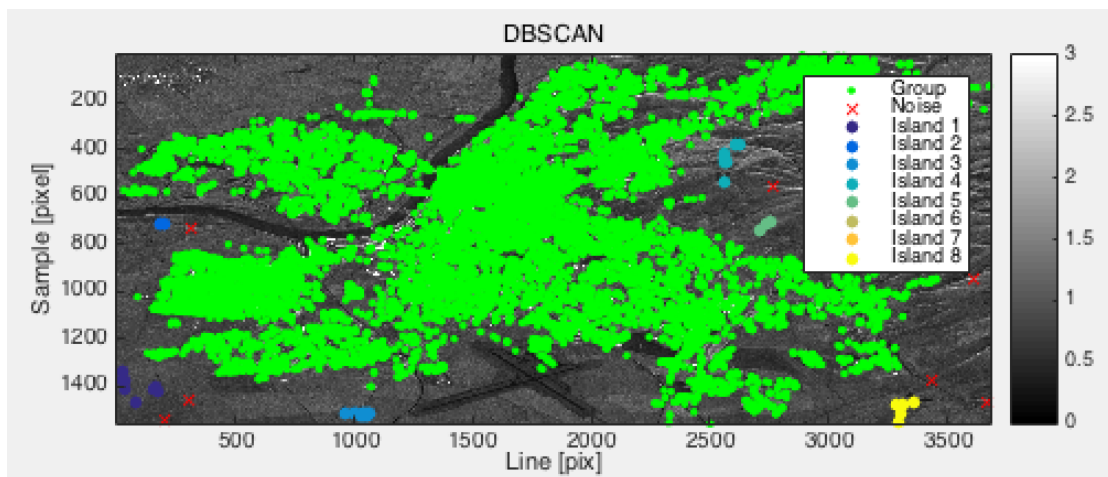


Figura 84 - Clusters de pontos obtidos por DBSCAN.



## 2. Análise de Componentes Principal

A Análise de Componentes Principal (PCA, Principal Components Analysis), é um método estatístico de múltiplas variáveis que tem como finalidade identificar a relação entre características extraídas dos dados, visando a redução desses dados, ou eliminando sobreposições e, a partir de combinações lineares de dados originais, escolher a melhor forma de os representar. A este procedimento de análise, chama-se análise multivariada.

A ideia básica deste passo do algoritmo, passa por encontrar as observações que foram descartadas e, a partir dos resíduos registados após a análise com o método PCA, voltar atrás e identificar o motivo pelo qual os pontos se tornaram *outliers*. Ou seja, serão respondidas as seguintes questões:

- Será que as observações foram descartadas porque a estimativa da altitude residual dos pontos em algumas zonas varia significativamente, comparando com os pontos principais do conjunto de dados?
- Será que as observações foram descartadas porque os valores de deslocamento desses pontos variam significativamente, comparando com os pontos principais do conjunto de dados?

A expectativa passa, possivelmente, por detetar *outliers* causados por erros sistemáticos, tais como os erros resultantes da utilização de um MDT externo (usado no processamento), ou talvez perturbações atmosféricas, entre outras. Para distinguir, entre observações regulares e os três tipos de *outliers* definidos anteriormente, para grandes quantidades de dados construiu-se um gráfico para análise de *outliers* (Figura 85). No eixo horizontal do gráfico colocou-se o resultado da distância total,  $SD_i$ , de cada observação, no eixo vertical do gráfico colocou-se a distância ortogonal,  $OD_i$ , de cada observação, em relação ao subespaço PCA. Para classificar as observações, desenharam-se duas linhas de corte que, estatisticamente, correspondem a um intervalo de confiança de 99%. Os pontos que ultrapassam estas linhas são considerados *outliers*.

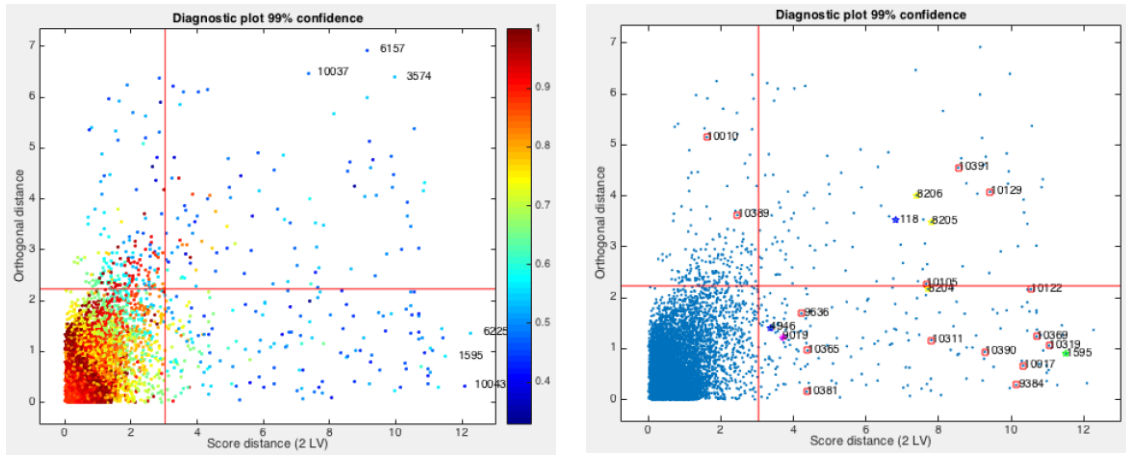


Figura 85 - Esquerda) - Gráfico diagnóstico com pontos coloridos correspondentes aos valores da coerência.  
 Direita) - Gráfico diagnóstico com identificação dos pontos que foram identificados por inspeção visual (sem algoritmos) a partir da análise dos parâmetros, velocidade, altitude residual e coerência.

### 3. Teoria dos Grafos, Diagrama de Voronoi, Gráficos de Vizinhança, Desvio Médio Absoluto e Coeficiente de Semelhança de Jaccard

Através da análise da estrutura em *cluster* do conjunto de dados obtidos no passo 1, pelo algoritmo DBSCAN e através da deteção de *clusterings* de *outliers* detetados pelo método PCA no passo 2, aplicando as regras da teoria de grafos, para gráficos com poucas ligações (Figura 86), é possível descobrir alguns tipos de *outliers* nas fronteiras do conjunto de dados principais (grupos globais de *outliers*), dentro do conjunto de dados principais (grupos locais de *outliers*) e *outliers* isolados, isto é, sem qualquer *outlier* na sua vizinhança. Além de se analisarem, unicamente, os pontos de contacto das células *Voronoi* nalguns *raios* (o mesmo que o parâmetro do passo DBSCAN para obter uma vizinhança próxima de cada ponto), é possível examinar a autocorrelação espacial, através da realização de um gráfico de reflexão do valor da variável de cada unidade, *versus* o valor da mesma variável nas unidades vizinhas (Figura 87). Os pontos excedentes da regra  $2\sigma$ , ou do Desvio Médio Absoluto, são sinalizados como *outliers* locais ou globais.



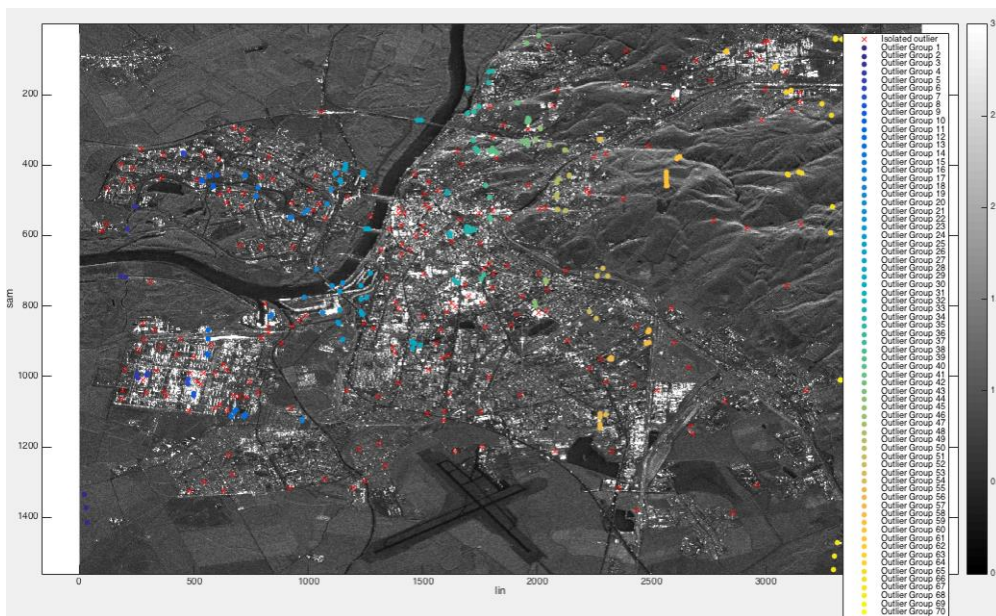


Figura 86 - Grupo de outliers detetados pelo método PCA.

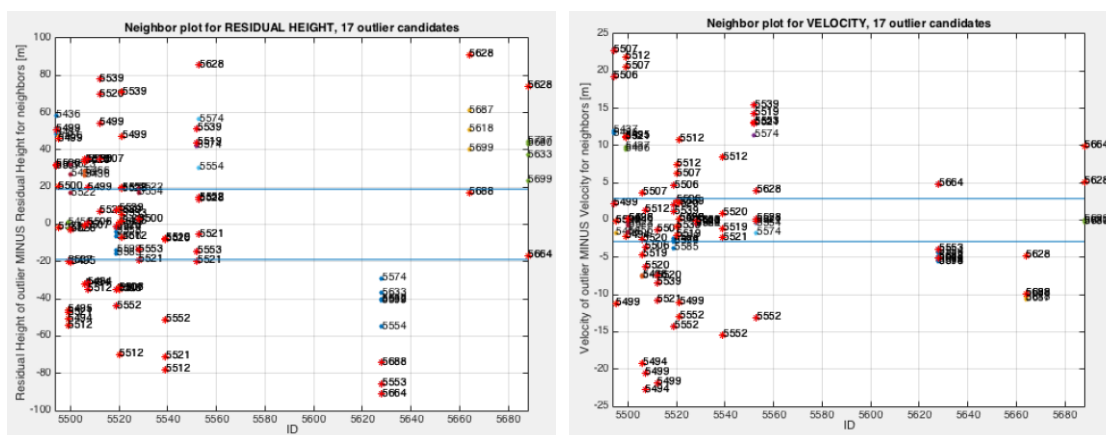


Figura 87 - Gráficos de vizinhança para o grupo de pontos, onde foram detetados outliers pelo método PCA, analisando a altitude residual (esquerda) e velocidade (direita).

Usando o coeficiente de semelhança de *Jaccard*, que mede o grau de semelhança entre dois conjuntos de dados, independentemente de quais sejam as variáveis (Figura 88), é possível identificar qual a variável em que ocorrem mais problemas (onde aparecem mais *outliers*) e classificar esta variável de acordo com o problema, que pode ser um problema de avaliação de velocidade, avaliação da altura residual, movimento sazonal, entre outros que podem surgir aquando da estimativa de diferentes parâmetros.

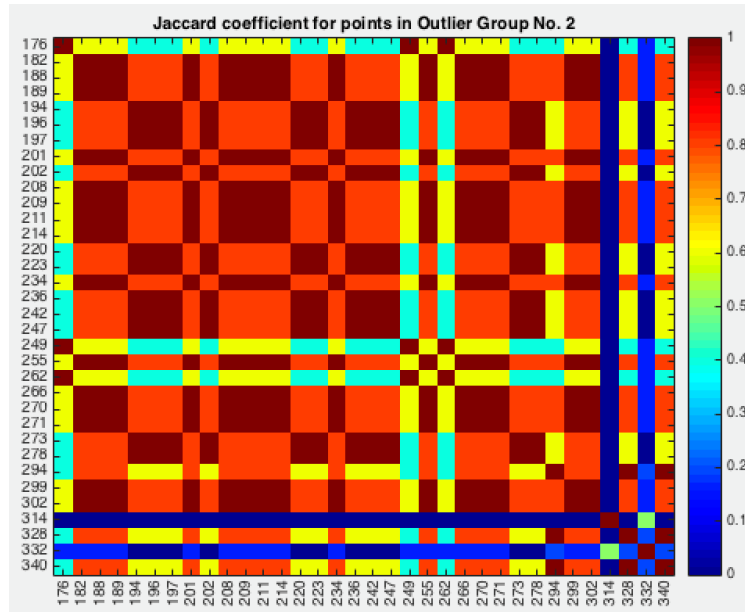


Figura 88 - Matriz exemplo dos coeficientes de Jaccard.

Deste modo, é possível encontrar grande parte dos pontos divergentes, visíveis em cada *cluster*, detetado por DBSCAN/PCA e manter os pontos com características semelhantes dentro do *cluster*. No final, os pontos que se desviem, significativamente, de cada *cluster* e não tenham um comportamento semelhante na vizinhança, serão assinalados com marcas a vermelho (Figura 89 e 90) com o intuito de serem excluídos dos resultados finais.

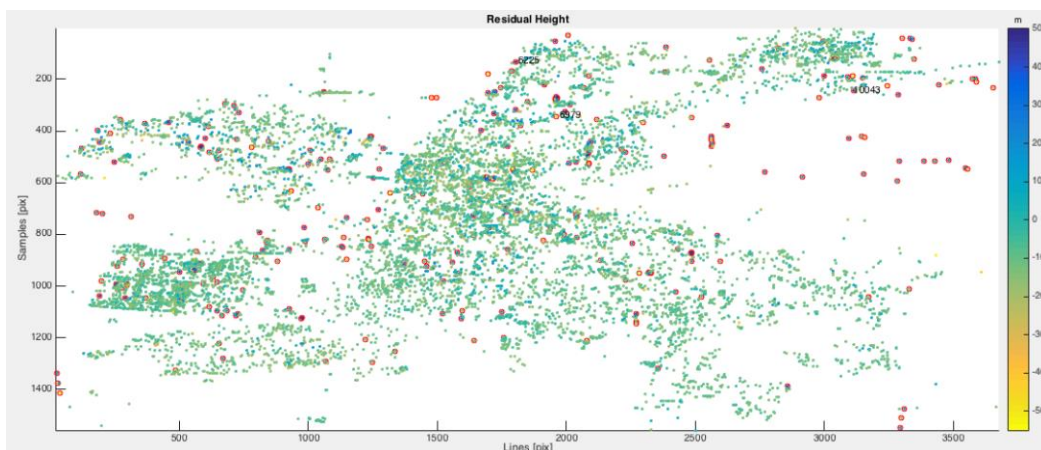


Figura 89 - Altitude residual dos pontos e deteção de outliers (marcas a vermelho).

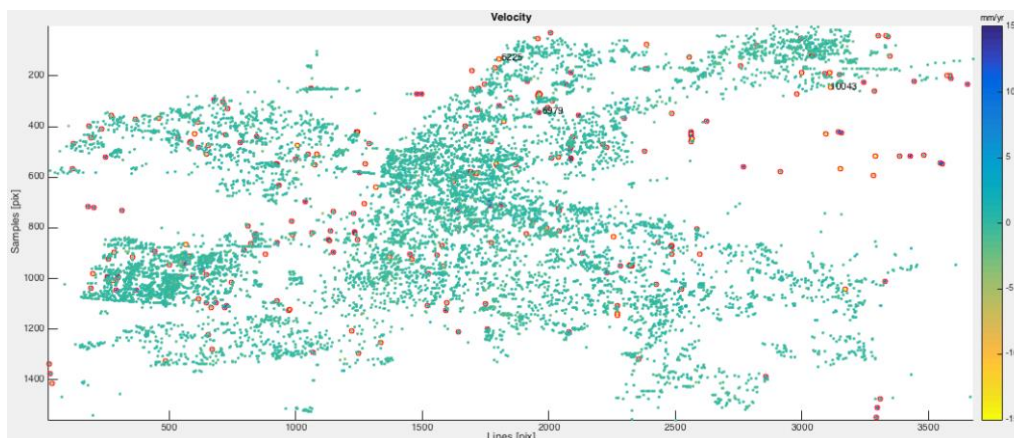


Figura 90 - Velocidade e deteção de outliers (marcas a vermelho).

Concluindo, os *outliers* que não foram excluídos como ruído no primeiro e segundo passos DBSCAN e PCA, são separados da seguinte maneira: i) *outliers* sem qualquer *outlier* na sua vizinhança são considerados isolados, e ii) *outliers* com a presença de outros *outliers* no grupo de pontos formam um grupo *outlier*. Somente os pontos que compartilham células adjacentes *Voronoi* e estejam dentro do *raio* definido, são consideradas como vizinhança. Desta forma, o cálculo pode ser pouco eficiente e os pontos podem ter um número diferente de pontos vizinhos “naturais”, próximos para o limite do *raio* estabelecido que implica também os limites para o ruído.

A estrutura em *outliers*, criada com base neste pressuposto, é testada com o método de *clusters* DBSCAN, analisando o seu desempenho.

As variáveis para *outliers* isolados e *outliers* agrupados são, então, assinaladas de acordo com o Desvio Absoluto Médio (MAD) dos pontos na sua vizinhança, ou pontos não periféricos restantes, que fazem parte do *cluster* completo, respetivamente.

Para *outliers* isolados, se a sua discrepância não exceder o critério de rejeição em 2, 2.5 ou 3, em qualquer variável e a coerência do ponto analisado for maior que um mínimo selecionado, o ponto é mantido no conjunto de dados. Caso contrário é reconhecido como um *outlier* padrão.

Para grupos de *outliers* é calculado o coeficiente de semelhança de *Jaccard* para cada par de pontos dentro do grupo, avaliando o conjunto de amostras finais.

Os pares de pontos com coeficiente de *Jaccard* inferior a um determinado limite (por exemplo 0,6) são usados para o passo decisivo de todo o processo, que consiste em avaliar o valor de coerência dos pontos. Se o valor da coerência for baixo, será necessário decidir se o ponto tem uma coerência incorreta, porque é inferior ao valor

mínimo escolhido, e retirá-lo do conjunto final de pontos. Se a coerência for elevada, isto é, superior ao limiar definido para o ponto ser excluído, então esse ponto será mantido no conjunto de dados, com tendência a ser problemático e/ou ambíguo, mas integrado no grupo de *outliers* correspondente.

## 7.2. Dilatação Térmica

De acordo com algum conhecimento prático, é possível afirmar que a principal limitação na monitorização do deslocamento em determinado tipo de estruturas, como por exemplo, em pontes, está relacionada com os movimentos horizontais, devido à dilatação térmica. Dado que a sensibilidade InSAR, é preferencialmente adequada para detetar movimentos verticais e a dilatação térmica em pontes ultrapassar frequentemente, a ordem dos centímetros ou até decímetros, isto faz com que a componente da fase InSAR seja difícil de distinguir de outras componentes que causam a deformação, sobretudo quando a direção da ponte é quase paralela à linha de vista do satélite. Nesse caso, a dilatação térmica surge como a principal componente de fase e deverá ser estimada de modo a modelar, de forma adequada, outras componentes, tais como a tendência de deformação linear,  $k_{def}$ , e a estimativa residual da altura,  $k_{hei}$ . Essas componentes podem ser devidamente diferenciadas se o conjunto de dados englobar um número adequado de imagens SAR, se nenhuma das componentes apresentar valores extremos e se não existir correlação significativa entre os vetores que definem as linhas de base temporais, espaciais e baseados em temperatura.

No caso de monitorização de pontes a situação é, ainda, mais complicada, tendo em conta a possível não-linearidade do movimento das pontes no tempo e no espaço, ou seja, nos primeiros anos após a sua construção, uma ponte pode estabelecer-se de forma não linear, com movimentos máximos na zona central da parte superior da construção. ([Gernhardt and Bamler, 2015](#)).

No âmbito deste trabalho, foi usada uma abordagem para identificação da componente de dilatação térmica,  $k_{temp}$ , com base na correção/calibração das diferenças de temperatura, tal como descrito em ([Perissin and Rocca, 2006](#)), de forma a calcular o deslocamento de acordo com as propriedades físicas da ponte. Essa componente deverá ser compatível com o modelo de dilatação térmica conhecido,  $t_d$ , apresentado na [Equação 7.1](#):

$$t_d = c \cdot l \cdot \Delta T \tag{7.1}$$

em que  $c$  representa o coeficiente de dilatação térmica para o material usado na construção (ex:  $12 \cdot 10^{-6} \cdot k^{-1}$  para aço/betão),  $l$  o comprimento da estrutura passível de dilatação e  $\Delta T$  a diferença de valores da temperatura no período considerado para a avaliação do deslocamento.

Os efeitos que provocam a mudança de fase diferem com base na orientação da ponte, relativamente à LOS do satélite. Como já referido na secção 2.2, o movimento esperado das pontes é na direção vertical, devido ao assentamento da construção, à flexão resultante das diferenças de carga na ponte, ou na direção horizontal, ao longo do comprimento da ponte, devido à dilatação térmica.

Por causa da dificuldade, que muitas vezes acontece, de não haver imagens SAR disponíveis, em simultâneo, no sentido ascendente e descendente do satélite, para uma mesma área, de modo a permitir efetuar a separação do movimento em componentes 3D, existe a possibilidade de usar uma transformação simplificada de medidas do deslocamento da direção LOS,  $d_{LOS}$ , para a direção do deslocamento esperada  $d$  (Alhborn, T. *et al.*, 2010), tal como apresentado na Equação 7.2.

$$d = \frac{d_{LOS}}{\cos\alpha_v \cos\theta_{inc} + \sin\alpha_v \cos\alpha_{hor} \sin\theta_{inc}} \tag{7.2}$$

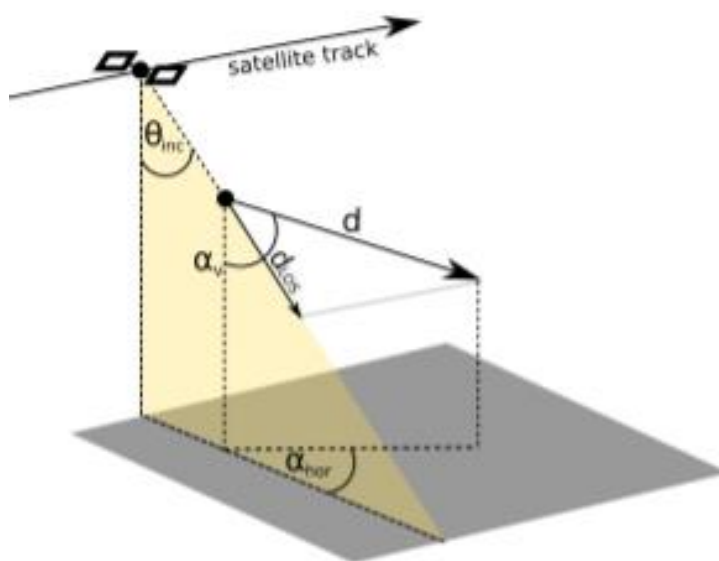


Figura 91 - Esquema do movimento detetado na direção  $d_{LOS}$  relativamente à direção do movimento real  $d$ . Fonte: Lazecky, M. *et al.*, 2016



Como referido, a componente da dilatação térmica afeta, de forma mais significativa, a componente horizontal do deslocamento ao longo do eixo longitudinal da ponte,  $d_h$ . As [Equações 7.3 e 7.4](#), apresentam, respetivamente, o deslocamento horizontal do eixo longitudinal da ponte,  $d_{h,long}$ , e uma taxa de deslocamento na direção vertical,  $d_v$ , obtida da direção,  $d_{LOS}$ , assumindo que nenhum outro movimento afeta o valor  $d_{LOS}$  no tempo.  $\alpha_v$ , representa o ângulo entre o movimento real  $d$  e a direção vertical, como mostra a [Figura 91](#) ( $\alpha_v$  toma o valor 0 ou  $\frac{\pi}{2}rad.$ .) então:

$$d_{h,long} = \frac{d_{LOS}}{\sin\theta_{inc} \cdot \cos\alpha_{hor}} = \frac{d_{LOS}}{S_{h,long}} \quad (7.3)$$

$$d_v = \frac{d_{LOS}}{\cos\theta_{inc}} = \frac{d_{LOS}}{S_v} \quad (7.4)$$

Para melhorar a disponibilidade do InSAR na direção do vetor de deformação, é possível considerar o denominador da [Equação 7.3](#) como um parâmetro de sensibilidade,  $S$ , da direção do deslocamento  $d_{LOS}$ . Então, a sensibilidade  $S_{h,long}$ , que corresponde ao denominador da [Equação 7.3](#), descreve a sensibilidade do deslocamento da ponte na direção longitudinal/horizontal para a  $d_{LOS}$  do satélite, tendo em conta que não são considerados os deslocamentos verticais. Da mesma forma  $S_v$ , na [equação 7.4](#) descreve a sensibilidade do InSAR na direção vertical relativa ao  $d_{LOS}$ .

A monitorização do deslocamento horizontal de pontes pode ser dificultada devido à dilatação térmica da ponte e, como consequência, complicar a monitorização da ponte no geral, uma vez que a componente térmica da fase pode exceder valores centimétricos e tornar difícil distinguir essa componente de outras fontes de contribuição da fase.

Nesses casos, a dilatação térmica aparece como a componente principal da fase e deve ser estimada para se modelar adequadamente as restantes componentes, como a tendência de deformação linear,  $K_{def}$  ( $m/ano$ ) e a estimativa da altitude residual,  $k_{hei}$  ( $m$ ). Ambas as componentes  $k_{def}$  e  $k_{hei}$  são estimados em algoritmos MT-InSAR comuns, encontrando uma relação linear entre os valores da fase de interferogramas desenrolados  $\Delta\phi_i$  ( $rad$ ) e as diferenças temporais  $\Delta t_i$  ( $anos$ ), no caso de  $k_{def}$ , ou linhas de base normais  $B_i$  ( $m$ ), no caso de  $k_{hei}$ , entre cada uma das combinações

interferométricas de imagens SAR, com  $i$  a variar de 1...N (Colesanti, *et al.*, 2003). Conforme implementado no *software* SARPROZ (Perissin and Rocca, 2006), a abordagem para identificar a componente de dilatação térmica,  $k_{temp}(rad/°C)$ , usa um parâmetro adicional, procurando, também, uma relação entre diferenças de fase,  $\Delta\varphi_i$ , e as diferenças de valores da temperatura, entre os tempos de aquisição da imagem  $\Delta T_i$ . Estes componentes são valores que maximizam a coerência, (Equação 7.5), minimizando os resíduos de fase,  $\omega_i$  (Equação 7.6).

$$[k_{def}, K_{hei}, k_{temp}] = argmax \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{j\omega_i} \right| \quad (7.5)$$

$$\omega_i = \Delta\varphi_i + \frac{4\pi}{\lambda} \left( k_{def} \Delta t_i - k_{hei} \frac{B_i}{R \sin \theta_{inc}} \right) - k_{temp} \Delta T_i \quad (7.6)$$

Onde  $\lambda$  representa o comprimento de onda base do sistema SAR e  $R$  a distância mínima aproximada, entre o satélite e o sensor.

A título de exemplo, apresenta-se o processamento de dados das pontes *Svinov*, na rotunda da estrada D1, em Ostrava na República Checa. Para efeitos de monitorização foram processadas 17 imagens TerraSAR-X obtidas no modo *Stripmap*, entre outubro de 2013 e maio de 2015, a maioria das vezes com 33 dias de linha de base temporal. Para estimativa de  $k_{temp}$ , foram obtidos dados referentes à temperatura do ar,  $T_{air}$ , e à temperatura da superfície da estrada,  $T_{sur}$ , a partir de uma estação meteorológica, localizada na mesma estrada a 4 km de distância.

A sensibilidade do InSAR, para deslocamentos horizontais na direção da ponte,  $S_{h,long}$ , foi processada, apresentando um valor igual a 40%, com base em (Samiei-Esfahany *et al.*, 2009). Assumindo que a única fonte de deformação é a dilatação térmica, pode calcular-se o seu valor (Equação 7.1), considerando como valores de referência o coeficiente térmico,  $c$  ( $12 \cdot 10^{-6} k^{-1}$ ), a diferença de temperatura máxima,  $\Delta T$  (21,2 °C), entre o início e fim do período de imagens considerado, e o comprimento da ponte,  $l$  (585 m). O resultado obtido para a dilatação térmica máxima,  $t_d$ , é de 149 mm e causará um  $d_{LOS}$ , relativamente grande, de 50 mm.



Efetivamente,  $k_{temp}$  foi estimado como sendo, proporcionalmente, mais baixo, mas o seu efeito manteve-se como o principal componente de fase. Os outros componentes,  $k_{hei}$  e  $k_{def}$ , só foram corretamente estimados depois de se obter a totalidade dos dados, abrangendo um período de um ano e meio, assumido que este é o período mínimo necessário, para não haver sobreposição entre os valores estimados de  $k_{def}$  e  $k_{temp}$ . A Figura 92, mostra as estimativas finais de  $k_{temp}$  e  $k_{def}$  das pontes. As juntas de dilatação térmica  $k_{temp}$  podem ser claramente detetadas na inclinação dos pontos mais extremos. Prevê-se que alguns pontos tenham deformações temporais, como por exemplo, os pontos PS detetados na junta de dilatação térmica, situada imediatamente atrás da ponte, com  $k_{def}$  igual a -5mm/ano, na linha de vista do satélite LOS.

A tendência da deformação linear do ponto 3282, é devida, provavelmente, à reflexão proveniente de um corrimão metálico inclinado na rampa da ponte.

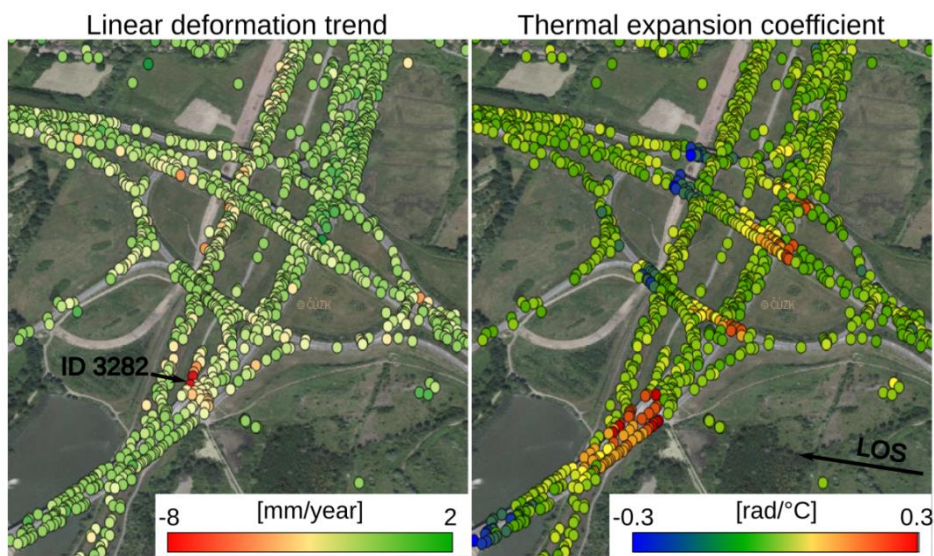


Figura 92 - Tendência da deformação linear  $k_{def}$  (esquerda) e coeficiente da dilatação térmica  $k_{temp}$  (direita) das pontes Svinov em Ostrava. Ambas as componentes foram diferenciadas usando dados abrangendo 1,5 vezes o ciclo sazonal.

A dilatação térmica foi estimada como sendo o coeficiente,  $K_{temp}$ , tendo por base a medição de temperaturas, e assumindo uma relação linear entre a temperatura e a fase SAR. Foram observadas diferenças até 11°C, entre a temperatura atmosférica,  $T_{air}$ , e a temperatura da superfície da estrada,  $T_{sur}$ , registadas na estação meteorológica mais próxima, com 5 minutos de tolerância. As diferenças de temperatura foram corrigidas de

forma a obter o coeficiente  $k_{temp}$ , em conformidade com as propriedades físicas das pontes. Utilizando os dois conjuntos de dados de temperatura, obtiveram-se resultados de  $k_{temp}$  semelhantes, mas mais próximos aos das temperaturas da superfície da estrada. O desvio padrão da fase residual (i.e., os valores da fase após remoção das estimativas de  $k_{temp}$ ,  $k_{def}$ ,  $k_{hei}$ ) foi menor nos locais de estudo, quando se utilizaram os valores da temperatura medida na superfície da estrada,  $T_{sur}$ . Contudo, em ambos os casos de utilização de  $T_{air}$  e  $T_{sur}$ , foram observados padrões espaciais semelhantes aos padrões dos coeficientes  $k_{temp}$ , em gráficos individuais de resíduos da fase para alguns interferogramas (Figura 93). Estes padrões podem ser atribuídos a deslocamentos não modelados, nomeadamente dilatação térmica não modelada, ou a um valor de temperatura impreciso, que pode ser atribuído à diferença entre a temperatura do ar ou da estrada e a temperatura da superfície da própria estrutura da ponte.

No caso de valores de temperatura errados, os valores dos resíduos da fase dos pontos PS, para um interferograma selecionado, aumentam em relação ao seu  $k_{temp}$  estimado. Os valores de temperatura podem ser corrigidos, através da procura de correlação entre os resíduos da fase  $\omega$ , de um interferograma, e o  $k_{temp}$ , dos pontos de PS (selecionados com base no limite de coerência). Essa relação pode ser visualizada para cada interferograma  $i$  como uma nuvem de pontos, como se mostra na parte direita da Figura 93. A dependência de ambos os valores, pode ser aproximada por uma linha (Equação 7.7):

$$r = a \cdot K_{temp} + b \tag{7.7}$$

sendo  $r$  os resíduos de fase para cada dado adquirido,  $k_{temp}$  os valores de dilatação térmica estimados, para todos os pontos da ponte, e  $a$  e  $b$  os resultados da regressão por mínimos quadrados. O parâmetro  $a$  pode ser aplicado diretamente como correção de temperatura a cada  $i$ -ésimo par adquirido.

O padrão de dilatação térmica pode ser eliminado dos resíduos da fase, após a estimativa do coeficiente de correlação de *Pearson* e da estimativa do parâmetro  $a$  entre os resíduos e o  $k_{temp}$  (Figura 93).

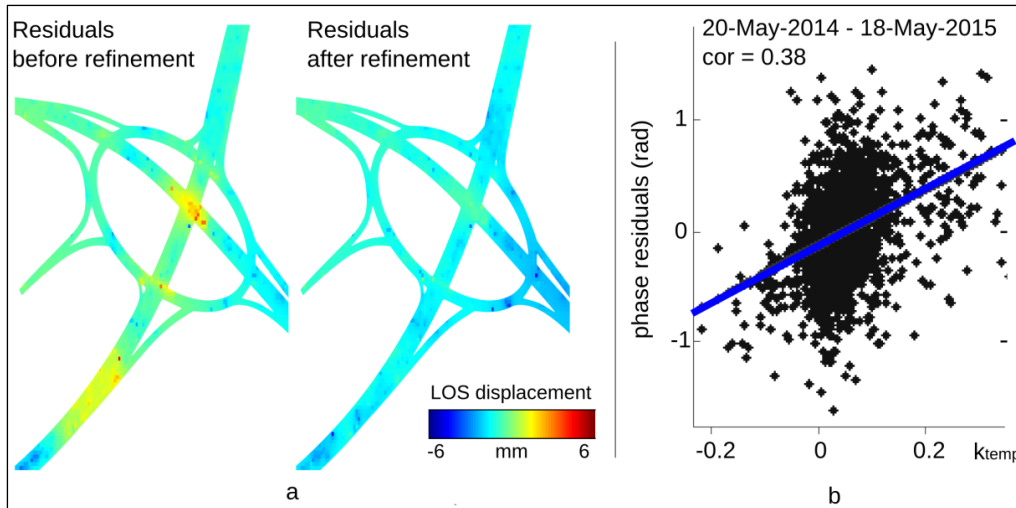


Figura 93 - Deslocamento residual da área de Svinov (Ostrava) nos interferogramas do período de 20 maio 2014 a 18 maio 2015, depois da eliminação dos parâmetros  $k_{hei}$ ,  $k_{def}$  e  $k_{temp}$  estimados com os valores originais da temperatura do ar e depois com valores da temperatura do ar corrigidos (esquerda). Correlação entre a fase residual e o  $k_{temp}$ , estimado com os valores originais da temperatura do ar (direita).

A Figura 94, mostra as temperaturas originais e corrigidas, após duas iterações, para melhoria da  $T_{air}$  e da  $T_{sur}$ . O desvio padrão da fase residual diminuiu cerca de 5 a 60%, com essa melhoria.

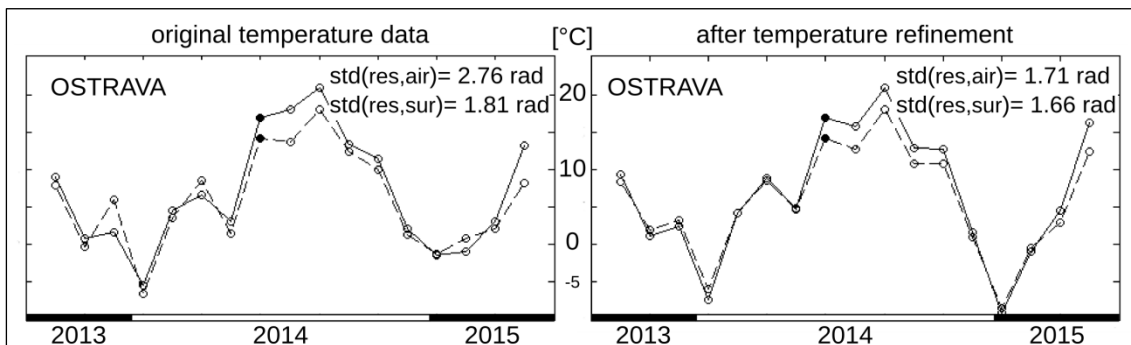


Figura 94 - Temperaturas originais e corrigidas para a área de Svinov (Ostrava). O gráfico da esquerda mostra a distribuição temporal dos valores originais da temperatura do ar e à superfície, para estações meteorológicas vizinhas. O gráfico da direita apresenta os valores da temperatura após correção.

A coerência melhorou para a maioria dos pontos PS, sendo, o aumento, mais significativo com a correção da temperatura do ar, por isso, apresenta-se, apenas, o histograma da temperatura do ar corrigida (Figura 95).

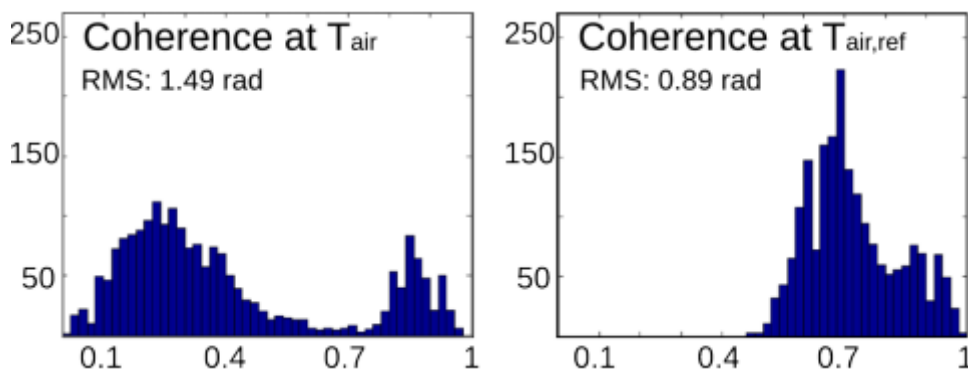


Figura 95 - Histograma da coerência dos PS antes e depois da correção da temperatura do ar  
 Fonte: Lazecky *et al.*, 2016

Pode estabelecer-se uma relação  $\rho$ , (Equação 7.8) entre dois valores de  $k_{temp}$  estimados com os dois conjuntos de dados da temperatura do ar e da superfície da estrada, corrigidos. A relação  $\rho$  é, aproximadamente, a mesma para a estimativa  $k_{temp}$ , de cada ponto PS e aproximadamente a mesma para a  $\Delta T$  de cada interferograma.

$$\rho = \frac{k_{temp,air,ref}}{k_{temp,sur,ref}} = \frac{\Delta T_{sur,ref}}{\Delta T_{air,ref}} \tag{7.8}$$

Para fazer um simples modelo de dilatação térmica no plano horizontal, é possível usar as coordenadas das juntas de dilatação e, depois, calcular a posição dos centros de dilatação, assumindo que essa posição se encontra entre as juntas.

O segmento da ponte entre as juntas de dilatação pode ser baseado no modelo de expansão térmica da Equação 7.1,  $t_d = c \cdot l \cdot \Delta T$ .

Posteriormente, a componente da fase do modelo de dilatação térmica,  $k_{temp,mod}$ , para um ponto PS selecionado ao longo da direção horizontal, a partir do centro de dilatação é dada por (Equação 7.9):

$$k_{temp,mod} = c \cdot l \cdot S_{h.long} \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \tag{7.9}$$

Em casos especiais de séries temporais de dados pequenas, por exemplo menos de um ano, o  $k_{temp,mod}$  pode substituir estimativas de  $k_{temp}$ . Nesses casos, são

necessárias medidas precisas da temperatura da estrutura e um coeficiente  $c$  apropriado.

Usando  $k_{temp,mod}$ , na [Equação 7.8](#), é possível recalculer (calibrar) o valor de  $T_{ref}$  corrigido, usado para estimar o parâmetro  $k_{temp,ref}$  corrigido, de acordo com a ([Equação 7.10](#)):

$$\Delta T_{cal} = \frac{k_{temp,ref}}{k_{temp,mod}} \cdot \Delta T_{ref} \quad (7.10)$$

Teoricamente, os valores da temperatura corrigidos,  $T_{cal}$ , podem dar os valores reais da temperatura da estrutura, assumindo o valor do coeficiente de dilatação térmica  $c$ , correto. A sua utilização nas [Equações 7.5 e 7.6](#) leva ao parâmetro  $k_{temp,cal}$  corrigido.

Neste estudo não foi tido em conta o efeito do atraso devido à atmosfera, APS, a fim de evitar a remoção de uma parte da dilatação térmica que seria modelada em APS. Sabe-se que o APS varia lentamente no espaço, mas de facto pode afetar os resultados da correção da temperatura mesmo numa escala local.

A dilatação térmica é uma componente importante no caso de monitorização de pontes com InSAR na banda-X. Estimado como  $k_{temp}$ , a sua fiabilidade depende dos valores corretos de  $T$ . Neste trabalho propõe-se um novo método para refinar e corrigir  $T$  e, portanto, o próprio  $k_{temp}$ . O refinamento do  $k_{temp}$  melhora a coerência dos pontos e ajuda a avaliar, com precisão, a deformação linear de uma ponte. Da mesma forma que proposto por [Wegmuller and Werner \(2015\)](#), este método não tem em conta a variação da temperatura no interior da estrutura monitorizada.

Assumindo que a temperatura é homogénea, os valores ajustados são corrigidos de forma relativa, independentemente dos dados de entrada, e diferem, apenas, nos valores absolutos. A sua fiabilidade dependerá dos valores corretos da temperatura da estrutura (pode ser baseada nos valores corrigidos) e do coeficiente de dilatação térmica apropriado. Uma vez confiável, o modelo pode ser usado para calibrar o  $k_{temp}$ , baseado em InSAR, ou mesmo detetar tendências de deformações linear com temperatura. Uma grande vantagem do modelo de dilatação térmica,  $k_{temp}$ , é ter aplicação, com fiabilidade, no caso de haver um número limitado de imagens SAR, ou um intervalo de tempo de aquisição pequeno.

## CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES

Este capítulo sumariza as principais conclusões sobre os resultados obtidos com a realização dos testes InSAR realizados nesta tese e detalhados nos capítulos anteriores.

O impacto desta investigação refletiu-se nas publicações em congressos e em revistas indexadas e no debate que suscitou entre os vários profissionais do setor nos vários congressos, nacionais e internacionais.

No Capítulo 1, foram definidas as duas questões centrais desta investigação:

1. Terão, efetivamente, as técnicas interferométricas mais recentes, atingido um estado de maturação e de desenvolvimento que possibilitam a monitorização de estruturas?
2. Quais são os principais constrangimentos à aplicação das técnicas InSAR na monitorização de estruturas?

Assim, as principais conclusões deste trabalho serão apresentadas como resposta a estas questões centrais.

1. As técnicas InSAR permitem atingir resultados comparáveis aos obtidos com os métodos clássicos/convencionais (por exemplo ao nivelamento geométrico)?

Sim é possível adquirir resultados comparáveis aos do Nivelamento Geométrico, se determinadas condições de observação se verificarem. A orientação da estrutura durante a passagem do satélite deverá ser perpendicular à linha de vista do satélite. Nos casos de estudo da barragem da Raiva e Paradela, com imagens Envisat, foram obtidas velocidades de deformação de 2 e 5 mm/ano. No caso da barragem de *Cunovo* a análise foi efetuada em imagens obtidas pelo satélite TerraSAR-X, ou seja, com melhor resolução espacial, e com uma série temporal de apenas 3 anos verificaram-se velocidades de deformação de 5mm/ano.

2. Qual o número de imagens SAR, necessário para garantir a qualidade e a fiabilidade dos resultados?

Embora a maior parte da literatura referente a InSAR, aponte para um mínimo de 15 imagens, não ficou provado com este trabalho que esse número fosse um valor fixo. São exemplos a encosta do IC5 e a barragem do Alto Ceira, que, com a utilização de 15 e 42 imagens respectivamente, não foi possível obter uma boa interpretação dos resultados.

Por outro lado, nas encostas de Zilina com 34 imagens, o resultado pode ser considerado um caso de sucesso da aplicação da técnica. Na área das escombrelas de Salamonde, com duas trajetórias ascendentes e 20 imagens cada uma, não foi possível obter resultados comparáveis nas duas trajetórias.

3. O que é que se entende por “ruído” no caso da análise das barragens? (Dilatação térmica? Alterações no nível da água? Outra coisa?)

A albufeira (nível da água) pode condicionar a reflexão dos pontos PS no paramento de uma barragem, como se verificou por exemplo na Barragem do Alto Ceira. No caso da Barragem da Paradela, o nível da água e os valores da temperatura foram assumidos como ruído devido à falta de correlação com os resíduos da fase.

A sensibilidade do processamento InSAR, em relação aos movimentos horizontais esperados tanto por efeitos de dilatação devido à temperatura, como do nível de água, é apenas cerca de 25% (dado pelo ângulo entre o raio de incidência do radar e a direção dos movimentos). Mesmo nos casos, em que a orientação da barragem é quase ideal, o movimento horizontal mínimo visível, devido a estes efeitos, seria de cerca de 8 mm/°C, no caso da temperatura, e 8 mm/m, no caso de alteração do nível da água.

4. Ainda no caso das barragens, serão todos os tipos de barragens passíveis de serem monitorizadas por recurso a esta técnica? Dependerá do material, da orientação, da envolvente, ...?

Não, e as principais condicionantes são a envolvente e a orientação. Vales encaixados e de curta dimensão, como por exemplo no caso da Barragem do Alto Ceira, não permitem obter os melhores resultados.

A orientação da obra, quando não é paralela à direção da passagem do satélite, não permite obter pontos PS com a coerência desejada, além de limitar o número desses pontos, logo a monitorização torna-se difícil. Ex. Encosta da barragem da Raiva.



Também as características do material e a vegetação, condicionam a aplicação da técnica InSAR em obras de origem natural. Ex. Encosta do IC5.

Em relação à resolução espacial da imagem, satélites como o TerraSAR-X e o COSMO sky Med, com resoluções de 1m, deverão ser usados para análise de estruturas artificiais, já os de menor resolução e com banda espectral adequada, deverão ser usados para análise de obras de origem natural, nomeadamente encostas.

5. Como é que as técnicas InSAR podem contribuir, efetivamente, para a monitorização de estruturas, barragens, pontes, ...?

As técnicas InSAR permitem efetuar uma análise retrospectiva do comportamento da obra. Caso se verifique um historial de comportamento anómalo, este pode indicar o primeiro alerta de deslocamento, podendo posteriormente ser efetuada a realização de monitorização no local, e tomar assim as medidas necessárias.

Estas técnicas, têm a vantagem de oferecer a possibilidade de analisar zonas ou pontos críticos da estrutura, em locais que poderão ser de difícil acesso.

Devido à direção da LOS, as técnicas InSAR adaptam-se a analisar o assentamento de pontes ou barragens. Permitem também analisar a dilatação térmica da estrutura, um indicador importante para quantificar deslocamentos horizontais.

Em suma, com os dados atualmente disponíveis, é possível determinar deslocamentos na crosta terrestre, mas também em estruturas de origem natural e artificial, em ambas as direções (vertical e horizontal) virtualmente, em qualquer ponto do globo, tendo em conta as condições limitativas como por exemplo, a cobertura vegetal. Enquanto os deslocamentos verticais podem ser detetados com sensibilidade inferior ao milímetro, a componente horizontal do deslocamento é normalmente mais baixa e requer a passagem do satélite em órbitas ascendentes e descendentes.

Conclui-se também que a verdadeira importância das técnicas InSAR, não é substituir as técnicas geodésicas convencionais pelo menos em barragens, mas sim complementá-las, nomeadamente em sítios remotos como por exemplo nas encostas envolventes, ou em taludes de qualquer natureza. De qualquer forma, a banda espectral deve ser bem escolhida, sendo a banda-L apropriada para o estudo de encostas com vegetação, e a banda-X para barragens ou pontes. Também o facto de uma mesma imagem contemplar várias obras, indica que o InSAR pode ser uma técnica vantajosa, com redução de custos relativamente a outras técnicas.

Uma desvantagem da técnica InSAR relativamente aos métodos clássicos da geodesia, surge na análise dos resultados, pelo facto de não ter associado um modelo estocástico de ajustamento. Cada PS só pode ser analisado pelo parâmetro da coerência e não pela elipse de erro associada ao ponto. Os pontos com coerência zero, é como se não existissem no terreno. Também nos casos de vales encaixados a técnica não se adapta.

Como resultado desta investigação, verificou-se que é possível desenvolver metodologias, baseadas em técnicas interferométricas, para monitorização da integridade estrutural de grandes obras, mas também, para estudar a estabilidade de encostas/taludes em risco de deslizamento. Do ponto de vista tecnológico, esta abordagem representa uma evolução substancial em relação ao estado da arte atual. E proporcionou a obtenção do objetivo principal, introduzir as novas tecnologias de deteção remota na monitorização de estruturas críticas (por exemplo, pontes e barragens), levando à deteção precoce dos potenciais riscos, permitindo melhorar a segurança, e reduzir, significativamente, os custos de manutenção por meio da otimização de estratégias de controlo. Hoje em dia, um sistema InSAR instalado em supercomputadores é capaz de processar dados SAR de um determinado lugar de forma semi-automática, com aplicação de abordagens diferentes e com dados de áreas urbanas e não urbanas e analisar os resultados para se detetarem áreas com uma tendência de deformação fora do normal. O valor limite de 5 mm/m já indica uma estrutura afetada pela deformação do terreno, se for um movimento de 10 mm/m a estrutura (não reforçada) já está em risco. Essa análise pode ser feita em tempo quase real, sendo possível analisar a última tendência de deslocamento não linear e prevendo-se pelo menos o valor de deslocamento seguinte na série temporal.

A decisão pode ser tomada com base na série temporal (obtida por InSAR) de vários pontos próximos na AOI (com referência a pontos considerados fixos selecionados pelo utilizador), juntamente com informações de amplitude e coerência, e ainda em conjunto com dados externos (por exemplo, precipitação, humidade do solo no caso de deslizamentos de terra) se estes estiverem disponíveis. Para cada área a ser monitorizada, o processo de decisão deve ser ajustado individualmente, com base no historial do deslizamento do terreno e eventualmente efetuar rastreamento com diferentes satélites /comprimento de onda/resolução e/ou ângulo de incidência diferente. A faixa espacial da possível ocorrência também deve ser levada em conta.

Como conclusão global, pode afirmar-se que os objetivos propostos para este trabalho foram, claramente, atingidos e, em alguns casos, mesmo superados. Estes promissores

resultados e desenvolvimentos foram, no entanto, possíveis pelo trabalho realizado no seio de uma equipa muito dinâmica e colaborativa.

## FUTURO

Num futuro próximo, poderá ser preparado um projeto para desenvolver uma aplicação web que permita, aos interessados, visualizar mapas de deformações. Nos casos em que sejam detetados deslocamentos capazes de colocarem em risco as estruturas monitorizadas, o utilizador do serviço poderá requerer um estudo mais detalhado, que poderá incluir um processamento interferométrico minucioso e visitas ao local. Este serviço será, também, uma ferramenta importante para tarefas de planeamento regional e urbano, pois permitirá aos técnicos envolvidos a perceção da evolução espaciotemporal dos deslocamentos e, dessa forma, tomarem as medidas que se impõem.

O trabalho a desenvolver incluirá aspetos teóricos de planeamento, mas permitirá, simultaneamente, validar os resultados existentes, que, no seu conjunto, poderão incorporar um sistema de alerta quando forem detetadas vulnerabilidades, por exemplo, em estruturas. A elevada frequência de aquisição de imagens por parte dos novos satélites (6 dias para os Sentinel-1A e 1B e 1, 2 ou 4 dias para os satélites da constelação COSMO) conjugada com as elevadas precisões espaciais (~1 m no caso dos sensores que atuam na banda-X) transforma a interferometria SAR numa tecnologia de deteção/monitorização de deslocamentos única.

A possibilidade de monitorização com Interferometria SAR e a qualidade dos pontos PS depende muito da orientação da barragem em relação à direção do voo do satélite. Sabe-se que a sensibilidade dos satélites InSAR para deformações horizontais na direção N-S é muito baixa. A precisão também depende da resolução da imagem SAR e do comprimento de onda do radar.

O número de imagens usadas para descrever os casos de estudo é bastante pequeno e a sua resolução não é apropriada para monitorização de barragens. Para lidar com o ruído na série temporal e para aumentar a precisão em geral dos parâmetros estimados, sugere-se o uso de um grande conjunto de dados SAR e com alta resolução (por exemplo TerraSAR-X, COSMO-SkyMed). Graças à sua elevada sensibilidade, deve ser também possível estimar com precisão a influência de várias fontes de deformação, tais como o nível de água ou as alterações de temperatura.

Em relação à orientação das deformações detetadas, não é possível decompor inequivocamente a taxa de deformação linear estimada em direções verticais ou horizontais sem outros dados (por exemplo, combinação com a trajetória descendente

ou conhecendo observações geodésicas) ou sem o conhecimento do vetor que descreve a direção da deformação maior. Outra possibilidade é a utilização de trajetórias tanto ascendentes como descendentes, permitindo a divisão dos movimentos detetados nas três componentes. Também é recomendado efetuar a devida comparação de observações geodésicas com os resultados PS-InSAR.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahlborn, T.M., Shuchman, R., Sutter, L.L., Brooks, C.N., Harris, D.K., Urns, J.W., Endsley, K.A., Evans, D.C., Vaghefi, K. e Oats, R.C. (2010). *An Evaluation of Commercially Available Remote Sensors for Assessing Highway Bridge Condition*. Technical Report, Michigan Technological University, Department of Civil and Environmental Engineering.
- Bakker, J.D., Volwerk, J. e Verlaan J. (2006). *Maintenance management from an economical perspective*. IABMAS.
- Bamler, R.e Hartl, P. (1998). *Synthetic aperture radar interferometry*. Inverse Probl. 14, R1–R54.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R.e Sansosti, E. (2002). *A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(11), 2375 – 83.
- Brownjohn, J., Tjin, S., Tan, G., Tan, B. e Chakraboorty, S. (2004). *A Structural Health Monitoring Paradigm for Civil Infrastructure*. Proc. 1st FIG *International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering*, Nottingham, United Kingdom.
- BRIME - Bridge Management in Europe* (2001). Deliverable D14 Final report, 2001 - European Commission DG VII 4th Framework Programme. Acedido em: 15 novembro 2014 em: <http://www.trl.co.uk/brime>.
- Bulletin 121 (ICOLD), (2001). Published by United Nations Environmental Programme (UNEP) Division of Technology, Industry and Economics (DTIE). Paris. pp 144.
- Cantieni, R., Deger, Y.e Pietrzko, S. (1994). *Large structure investigation with dynamic methods: the bridge on the river Area at Aarburg. Prestressed Concrete in Switzerland*, Report of the Swiss FIP Group to the 12th FIP Congress, Washington D.C.
- Cantieni R. (2001). *Assessing a dam's structural properties using forced vibration testing*. Proc. IABSE *International Conference on Safety, Risk and Reliability - Trends in Engineering*, Malta.

- Chang, F.K. (1999). *What is Structural Health Monitoring? Structural Health Monitoring: A Report of the First International Workshop*. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 1062.
- Chang, P.C., Flatau, A. and Liu, S.C. (2003). Review Paper: Health Monitoring of Civil Infrastructure. *Structural Health Monitoring*. Vol. 2, No. 3. pp. 257-267.
- Colesanti, C. e Wasowski, J. (2006). *Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry*. Eng. Geol. 88 (3), pp.173–199.
- Coutinho, F. e Pereira, M. (2016). *A Jurisprudência Resumida do Tribunal Internacional de Justiça*. Publicações D. Quixote, do grupo Leya. ISBN 9789722059831.
- Cusson, D., Ghuman, P., Gara, M. e McCardle, A. (2012). *Remote Monitoring of Bridges From Space*. CBC; IBRACON. ISSN 2175-8182.
- Cumming, I., e Wong, F., (2005); *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*. ISBN 1580530583
- Cuenca, M. (2012). *Improving radar interferometry for monitoring fault-related surface deformation. Applications for the Roer Valley Graben and coal mine induced displacements in the southern Netherlands. PhD Thesis*.
- Cruz, P. (2006). *Inspeção, Diagnóstico Conservação e Monitorização de Pontes*. Universidade do Minho. Paper-Repositório UM.
- Döngi, F. (19 de Sept de 2011). SPIE Remote Sensing. *Earth Observation from Space - The European Landscape in the Second Decade*. Prague, Czech Republic. Acedido em 22 de Janeiro de 2017, em: <http://spie.org/Documents/AboutSPIE/PDF/ERS11-plenary-Doengi.pdf>.
- Farr, T. G., et al. (2007). *The Shuttle Radar Topography Mission*, Rev. Geophys., 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
- Farrar, C.R. e Worden, K. (2007). *An Introduction to Structural Health Monitoring*, Phil. Trans. R. Soc. A. Vol. 365. pp. 303-315.
- Ferretti, A., Prati, C. e Rocca, F. (2000). *Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry*. IEEE TGRS 38 (5), 2202–2212.
- Ferretti, A., Prati, C. e Rocca, F. (2001). *Permanent scatterers in SAR interferometry*. IEEE TGRS 39 (1), 8–20.



- Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., Prati, C., and Rocca, F. (2007). "Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 45, no. 5, pp. 1142–1153.
- Fonte, C.C. (1992). *Controlo de Deformações - Instrumentação e Metodologia*. Provas Públicas de Capacidade Científica e Aptidão Pedagógica (MSC. Equivalent) in Geomatic Engineering. Universidade de Coimbra.
- Fu, L. e Holt, B. (1982). *Seasat Views Oceans and Sea Ice With Synthetic-Aperture Radar*. California Institute of Technology. NASA, JPL-Publication 81-120, Pasadena, California.
- Gabriel, A.K., Goldstein, R.M. e Zebker, H.A. (1989). *Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry*. *J. Geophys. Res.* 94 (B7), 9183–9191.
- Gastineau, A., Johnson, T. e Schultz, A. (2009). *Bridge Health Monitoring and Inspections – A Survey of Methods*. Minnesota Department of Transportation Research. Technical Report.
- Ghiglia, D.C. e Pritt, M. D. (1998). *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software*. 512 pp. ISBN: 978-0-471-24935-1.
- Ghuman P. e Mc Cardle, A. (2012). *Bridge Health Monitoring using PSI*. Eur. Space Agency Spec. Publ., SP-697, ISBN 978-92-9092-261-2.
- Goldstein, R.M. e Werner, C.L. (1998). *Radar interferogram filtering for geophysical applications*, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 4035-4038.
- Gonçalves, J. (2008) Universidade de Porto
- Gomes, A.S. (2002). *Sistemas de Observação em obras Geotécnicas, Planeamento observação e instalação*. VIII Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa.
- Grenerczy, G. e Wegmüller, U. (2011). *Persistent scatterer interferometry analysis of the embankment failure of a red mud reservoir using ENVISAT ASAR data*. *Nat Hazards* 59:1047–1053; DOI 10.1007/s11069-011-9816-6.
- Hanssen, R.F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. The Netherlands.

- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. e Kampes, B. (2004). *A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers*. Geophys Res Lett 31: L23611. doi:10.1029/2004GL021737.
- Hooper, A.J. (2006). *Persistent scatterer radar interferometry for crustal deformation studies and modelling of volcanic deformation*. Ph.D. thesis, Stanford University.
- Hooper, A., Segall, P. e Zebker, H. (2007). *Persistent scatterer InSAR for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos*. J Geophys Res 112: B07407. doi:10.1029/2006JB004763.
- Hooper, A. (2008). *A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches*. Geophys Res Lett 35:L16302. doi:10.1029/2008GL034654.
- Hooper, A. e Zebker, H. (2010). *Phase Unwrapping in Three Dimensions with Application to InSAR Time Series*. Journal of the Optical Society of America.
- Hooper, A. (2010). *A statistical-cost approach to unwrapping the phase of InSAR time series*. European Space Agency ESA SP-677 (Special publication).
- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K. e Arkan, M. (2012). *Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation*. Tectonophysics 514-517. 1– 13. doi: 10.1016/j.tecto.2011.10.013.
- Kampes, B. M. (2005). *Displacement Parameter Estimation using Permanent Scatterer Interferometry*, PhD Thesis, Delft University of Technology.
- Kampes, B.M. (2006). *Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique*. Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Kapović, Z., Novaković, G. e Paar, R. (2005). *Deformation Monitoring of the Bridge by Conventional and GPS Methods. Conference paper, 5th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. SGEM2005, At Albena, Bulgaria. Volume II. Acedido em 06 de junho de 2014, em: <https://www.researchgate.net/publication/291157753>.*
- Keightley, W., Housner, G. e Hudson, D. (1961). *Vibration tests of the Encino Dam in take tower*. Report. California Institute of Technology.

- Ketelaar, V. B. H. (2008). *Monitoring Surface Deformation Induced by Hydrocarbon Production using Satellite Radar Interferometry*. PhD. Thesis, Delft Institute of Earth Observation and Space Systems, TUDelft.
- Ketelaar, V.B.H.G. (2009). *Satellite Radar Interferometry, Subsidence Monitoring Techniques*.
- Lazecký, M., Hlaváčová, I., Bakoň, M., Sousa, J.J., Perissin D., Patrício, G. (2016). *Bridge Displacements Monitoring using Space-Borne X-Band SAR Interferometry*. IEEE, Journal of selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing, July 2016. doi: 10.1109/JSTARS.2016.2587778.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K. e Rabaute, Th. (1993). *The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry*. Nature. vol. 364. nº6433, pp. 138-142. ISSN 0028-0836.
- Olofsson, J. e Elfgrén, L. (2004). Sustainable Bridges. *Assessment for Future Traffic Demands and Longer Lives*. Acedido em 24 de novembro de 2014, em: <http://www.sustainablebridges.net>.
- Olofsson, J. e Elfgrén, L. (2007). Sustainable Bridges. *Guideline for Inspection and Condition Assessment of Existing European Railway Bridges*. Acedido em 24 de novembro de 2014, em: <http://www.sustainablebridges.net>.
- Peltier, A., Bianchi, M., Kaminski, E., Komorowski, J.C., Rucci, A. e Staudacher, T. (2010). *PSInSAR as a new tool to monitor pre-eruptive volcano ground deformation: Validation using GPS measurements on Piton de la Fournaise*, Geophys. Res. Lett., 37, L12301.
- Perissin, D. (2008) Validation of the sub-metric accuracy of vertical positioning of PS's in C- band. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., vol. 5, no. 3, pp. 502–506, Jul. 2008.
- Perissin, D., Wang, Z. e Wang, T. (2011). The SARPROZ InSAR tool for urban subsidence/manmade structure stability monitoring in China. In: *Proceedings of 34th International Symposium for Remote Sensing of the Environment (ISRSE)*, Sydney.
- Perissin, D.; Wang, T. (2011). *Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets*. IEEE TGRS 50 (1), 271–280.

- Perissin, D.; Wang, T. (2010). *Time-series InSAR applications over urban areas in China*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol.4, No 1, pp. 92-99.
- Pietrzko, S., Cantieni, R. e Deger, Y. (1996). Modal testing of a steel/concrete composite bridge with a servo-hydraulic shaker. *Proc. 14th International Modal Analysis Conference (IMAC)*, Dearborn, Michigan. pp 91-98.
- Raposo, E.M. (2011) *Observação de Deslocamentos em Obras Geotécnicas*. Tese de Mestrado em Engenharia Geológica (Geotecnia). Universidade Nova de Lisboa.
- Ribeiro, F., Fazan, J., Neto, N., Blitzkow, D., Junior, E., Cintra, J., Fiorini, A. e Neves, C. (2008). Comparison Between Geodetic Technology and Plum Lines in Monitoring of Displacements on Itaipu Dam. *Proc. 13th FIG Symposium on Deformation Measurements and Analysis, 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*, LNEC, Lisbon.
- Rocha, J., Joaquim, L., Lemos, L. e Rebelo, C. (2008). Pontes Construídas sobre fundos aluvionares: *O colapso da Ponte Hintze Ribeiro*. Academic Paper.
- Rosen, P.A., Hensley, S., Joughin, I.R., Li, F.K., Madsen, S.N., Rodriguez, E. e Goldstein, R.M. (2000). *Synthetic aperture radar interferometry*. Proc. IEEE 88 (3), 333–382.
- Schmidt, D.A. e Bürgmann, R. (2003). *Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set*, *J. Geophys. Res.*, 108, 2416.
- Shirole, A.M. e Holt, M.C. (1991). Planning for a comprehensive bridge safety assurance program. *Transportation research record 1290. Transportation research board of the national academies*. Washington DC. pp. 39-50.
- Silva Gomes, A. (2002). Sistemas de Observação em obras Geotécnicas Planeamento Observação e instalação. *VIII Congresso Nacional de Geotecnia*. Lisboa.
- Soumekh, M. (1999). *Synthetic aperture radar signal processing with MATLAB algorithms*. (p. 648). ISBN: 978-0-471-29706-2.
- Sousa, J.J., Ruiz, A., Bakoň, M., Hlaváčová, I., Lazecký, M., Patrício, G., Delgado, J., Perissin, D., (2016). *Potencial of C-Band SAR Interferometry for Dam Monitoring*.

- Procedia Computer Science 100 (2016) 1103-1114. doi: 10.1016/J.Procs.2016.09.258.
- Sousa, J.J., Lazecký, M., Hlaváčová, I., Bakoň, M., Patrício, G., Perissin D.,(2015). *Satellite SAR Interferometry for Monitoring Dam Deformation in Portugal*. Second International Dam World Conference. Portugal, Lisbon, LNEC, April 21-24, 2015.
- Sousa, J.J., Hlaváčová, I., Bakoň, M., Lazecký, M., Patrício, G., Guimarães, P., Ruiz, A., Bastos, L., Sousa, A., Bento, R., (2014). *Potential of Multi-Temporal InSAR Techniques for Bridges and Dams Monitoring*. Procedia Technology 16, 834-841. doi:10.1016/j.protcy.2014.10.033.
- Sousa, J.J., Magalhães, L.M., Ruiz, A.M., Sousa, A.M.R. e Cardoso, G. (2013): *The viStaMPS tool for visualization and manipulation of time series interferometric results*, Comput. Geosci., 52, 409–421. doi: 10.1016/j.cageo.2012.11.012.
- Sousa, J., Ruiz, A., Hanssen, R., Bastos, L., Gil, A., Galindo-Zaldívar, J. e Sanz de Galdeano, C. (2010). *PS-InSAR processing methodologies in the detection of field surface deformation - study of the Granada Basin (Central Betic Cordilleras, Southern Spain)*. J Geodyn 49:181–189. doi:10.1016/j.jog.2009.12.002.
- Sousa, J., Hooper, A., Hanssen, R., Bastos, L. e Ruiz, A. (2011). *Persistent Scatterer InSAR: a comparison of methodologies based on a model of temporal deformation vs. spatial correlation selection criteria*. Remote Sensing Environ 115(10):2652–2663.
- Sousa, J.J. e Bastos, L. (2012). *Multi-Temporal SAR Interferometry Reveals Acceleration of Bridge Sinking Before Collapse*. Nat. Hazards (In Press).
- Sousa, J.J. (2010). *Potential of integrating PSInSAR Methodologies in the Detection of surface Deformation*. PhD Thesis. Universidade do Porto.
- Usai, S. (1997). The use of man-made features for long time scale INSAR. Geoscience and Remote Sensing. IGARSS '97. *Remote Sensing - A Scientific Vision for Sustainable Development*. IEEE International, 4, 1542-1544. ISBN: 0-7803-3836-7.
- Usai, S. e Hanssen, R. (1997). Long time scale INSAR by means of high coherence features. *Third ERS Symposium on Space at the service of our Environment*, held in Florence, Italy, 14-21 March 1997. Compiled by T.-D. Guyenne and D. Danesy. European Space Agency. pp. 225.

- Van der Kooij, M., Hughes, W., Sato, S., e Poncos, V. (2006). *Coherent target monitoring at high spatial density: Examples of validation results*, Eur. Space Agency Spec. Publ., SP-610.
- Van, L., Freek, J., Hanssen, R.F.; Humme, e Astrid, J.M. (2010). *Stability Monitoring of Water Defense Structures by Satellite Radar Interferometry*. Proceedings (DVD) of ESA Living Planet Symposium, Bergen, Norway.
- Wan, A. (2014). *Satellites reveal Hong Kong building 'sinking fast' before collapse that killed four*. South China Morning Post Hong Kong.
- Wikipedia, the free encyclopedia (2014). *List of bridge failures*. Acedido em 06 de junho de 2014, em: [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_bridge\\_failures](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_bridge_failures).
- Wikipedia, the free encyclopedia (2014). *Dam failure*. Acedido em 06 de junho de 2014, em: [http://en.wikipedia.org/wiki/Dam\\_failure](http://en.wikipedia.org/wiki/Dam_failure).
- Worden, K. e Dulieu-Barton, J.M. (2004). An Overview of Intelligent Fault Detection in Systems and Structures. *Structural Health Monitoring*. Vol. 3, No. 2. pp.85.
- Programa ARTES da ESA, Projeto GeoSHM da ESA em colaboração com a Universidade de Nottingham (maio 2015). *GeoSHM: Agência Espacial Europeia Desenvolve Sistema Avançado de Monitorização Estrutural de Pontes por Satélite*. Acedido em 24 de novembro de 2016, em: <https://www.engenhariacivil.com/geoshm-sistema-monitorizacao-estrutural-pontes-satelite>.
- <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes>, acedido em março 2018.
- <http://www.unwatercoursesconvention.org/resources/figures/>, acedido em março de 2018.

# ANEXOS

Anexo 1 - Exemplo da utilização da aplicação da ESA para verificar a disponibilidade de imagens SAR sobre a área de interesse

The screenshot displays the ESA Shop Cart application. The main window shows a satellite map with a grid overlay and a highlighted green area. On the left side, there are 'Order Options' including Order Service, Order Options, Delivery Method, Delivery Medium, Processing, Quality of Service, Payment Method, and Scene Type. Below the map is a table with columns: Start, Stop, Orbit, Track, Swath, Pass, Medium, Delivery, Processing, Processing Options, Scene Type, and Scene Start.

Start	Stop	Orbit	Track	Swath	Pass	Medium	Delivery	Processing	Processing Options	Scene Type	Scene Start
24 09:23:29.99	2008-08-04 09:24:02.11	32614	494	32	D	file	ftp-p4shop	Processing: PFI (ASA_IMP_IP),QualityOfService: STANDARD	Standard	Flighting Scene	2008-08-04 09:23:30.30
24 09:23:18.78	2008-08-04 09:23:57.30	32615	494	32	D	file	ftp-p4shop	Processing: PFI (ASA_IMP_IP),QualityOfService: STANDARD	Standard	Flighting Scene	2008-08-04 09:23:16.03
22 09:23:27.10	2008-12-21 09:23:59.72	35618	494	32	D	file	ftp-p4shop	Processing: PFI (ASA_IMP_IP),QualityOfService: STANDARD	Standard	Flighting Scene	2008-12-22 09:23:27.67
27 09:23:21.22	2008-12-07 09:23:52.95	40628	494	32	D	file	ftp-p4shop	Processing: PFI (ASA_IMP_IP),QualityOfService: STANDARD	Standard	Flighting Scene	2008-12-07 09:23:11.52
22 09:23:16.61	2008-11-02 09:23:56.11	40117	494	32	D	file	ftp-p4shop	Processing: PFI (ASA_IMP_IP),QualityOfService: STANDARD	Standard	Flighting Scene	2008-11-02 09:23:14.60
26 09:23:04.81	2007-02-26 09:24:05.46	28039	494	32	D	file	ftp-p4shop	Processing: PFI (ASA_IMP_IP),QualityOfService: STANDARD	Standard	Flighting Scene	2007-02-26 09:23:06.59
15 09:23:22.23	2010-02-15 09:23:52.18	41600	494	32	D	file	ftp-p4shop	Processing: PFI (ASA_IMP_IP),QualityOfService: STANDARD	Standard	Flighting Scene	2010-02-15 09:23:22.75
11 09:23:24.61	2010-01-11 09:23:55.28	41129	494	32	D	file	ftp-p4shop	Processing: PFI (ASA_IMP_IP),QualityOfService: STANDARD	Standard	Flighting Scene	2010-01-11 09:23:24.91
14 09:23:11.97	2004-07-26 09:24:15.62	11572	494	32	D	file	ftp-p4shop	Processing: PFI (ASA_IMP_IP),QualityOfService: STANDARD	Standard	Flighting Scene	2004-07-26 09:23:16.78
28 09:23:16.00	2008-09-28 09:23:55.90	38654	494	32	D	file	ftp-p4shop	Processing: PFI (ASA_IMP_IP),QualityOfService: STANDARD	Standard	Flighting Scene	2008-09-28 09:23:15.79
24 09:23:18.13	2008-08-24 09:24:00.74	32123	494	32	D	file	ftp-p4shop	Processing: PFI (ASA_IMP_IP),QualityOfService: STANDARD	Standard	Flighting Scene	2008-08-24 09:23:18.63
23 09:23:08.72	2007-08-23 09:24:00.37	28004	494	32	D	file	ftp-p4shop	Processing: PFI (ASA_IMP_IP),QualityOfService: STANDARD	Standard	Flighting Scene	2007-08-23 09:23:08.03
30 09:23:19.18	2008-07-29 09:24:01.15	38624	494	32	D	file	ftp-p4shop	Processing: PFI (ASA_IMP_IP),QualityOfService: STANDARD	Standard	Flighting Scene	2008-07-29 09:23:19.88
22 09:23:01.17	2007-04-02 09:24:01.82	24600	494	32	D	file	ftp-p4shop	Processing: PFI (ASA_IMP_IP),QualityOfService: STANDARD	Standard	Flighting Scene	2007-04-02 09:23:02.88
27 09:23:26.28	2007-05-07 09:24:06.14	27101	494	32	D	file	ftp-p4shop	Processing: PFI (ASA_IMP_IP),QualityOfService: STANDARD	Standard	Flighting Scene	2007-05-07 09:23:26.85
16 09:23:09.14	2007-07-16 09:24:08.79	28103	494	32	D	file	ftp-p4shop	Processing: PFI (ASA_IMP_IP),QualityOfService: STANDARD	Standard	Flighting Scene	2007-07-16 09:23:09.92



Anexo 2 – Exemplo de uma proposta CAT-1, submetida à ESA, no âmbito da realização deste trabalho

<b>CAT-1</b>	
ID	<b>28760</b>
Title	<b>Monitoring of slope instability in various areas in the world</b>
Type	Restrained Dataset
Class	Peer Review
Cost	Free of Charge/Reproduction costs
Primary Application Domain	Hazards
Location	Global
Status	accepted
<b>Principal Investigator</b>	
Last name (Family name)	Hlavacova
Name (Given name)	Ivana
Title	Mr./Mrs./Ms.
Institution	Czech Technical University, Faculty of Civil Engineering
Address	Thakurova 7
Town	Praha 6
Postal Code	166 29
Country	CZECH REPUBLIC
Phone	+420 2 2435 4954
Fax	
Email Address	hlavacova@insar.cz
<b>Co - Investigators</b>	
<p><b>Mr./Mrs./Ms. Matus Bakon</b> Slovak University of Technology in Bratislava, Department of Theoretical Geodesy matusbakon@gmail.com</p> <p><b>Dr. Joaquim João Sousa</b> Universidade de Tras-os-Montes e Alto Douro jjmsousa@gmail.com</p> <p><b>Dr. Milan Lazecky</b> Vysoka skola banska - Technicka Univerzita Ostrava milan.lazecky@vsb.cz</p> <p><b>Glória Patrício</b> Universidade do Porto gpatricio@ipg.pt</p>	
<b>Team Composition, Experience, Innovation and Contribution</b>	

Team	<p>Ivana Hlavacova - CTU Prague          Joaquim Joao Sousa - University of Trás-os-Montes e Alto Douro          Milan Lazecky - VSB-TU Ostrava          Matus Bakon - SUT Bratislava          Glória Patrício – University of Porto</p>
Experience	<p>Ivana Hlavacova - ten years of InSAR experience, specialized mostly at undermined areas and waste dumps</p> <p>Joaquim Joao Sousa - specialization in SAR Interferometry, deformation monitoring of tectonic faults, active tectonic deformation analysis</p> <p>Milan Lazecky - GIS/InSAR specialist with focus on monitoring landslides, general subsidence, mining-caused subsidence of terrain and particular objects (e.g. deforming highway) in Czech Republic and landslide dangers in Czech Republic, Kyrgyz Republic and Uzbekistan.</p> <p>Matus Bakon - specialization in satellite geodesy (GNSS), satellite radar interferometry (InSAR), infrastructure and surface deformation monitoring</p> <p>Glória Patrício – PhD student at UPorto and UTAD</p>
Innovation	<p>The project is aiming to create an universal technique for landslide monitoring (if possible).</p>
<b>Executive Summary</b>	
Executive Summary	<p>The project is aiming at monitoring of the slope stability in more areas in the world, with Europe prioritized. The emphasis will be put to slopes endangering highways, railways, dams, built-up areas etc.</p> <p>For monitoring, (PS)InSAR technique will be used, processing ERS/ENVISAT data.</p> <p>At the beginning, slope instability in the area near Alfandega da Fe (Portugal) will be monitored, together with landslide areas in Slovakia (Nizna Mysla, Hradec, Velka Lehotka, Krupina, Handlova) and Czechia (northern-Bohemia, a landslide above D8 highway).</p> <p>More areas worldwide may be added during the run of the project.</p> <p>The first area to be monitored, Alfandega da Fe, is monitored also by geodetic methods, estimating the movement to be in tens of centimeters per 2.5 years. In the area, ground cracks are visible.</p>

Schedule	
Schedule	<p>2014 - Mar 2015: data ordering for the specified areas in northern Portugal, northern Bohemia and Slovakia</p> <p>2015 - 2016: processing of the ordered data</p> <p>2014 - 2016: assessing and ordering data for other areas (European areas prioritized)</p> <p>2016 - 2018 processing of the other areas, comparison with other measurements (geodetic techniques, leveling, GPS etc.)</p>

### Anexo 3 – Relatório de progresso submetido à ESA no âmbito do CAT-1 apresentado

<b>PI Ivana Hlavacova</b> ID 28760 Title Monitoring of slope instability in various areas in the world	
<b>Progress Report</b>	
<b>Status</b>	<p>The ERS and ENVISAT data provided within the CAT-1 project ID 28760: “Monitoring of slope instability in various areas in the world” have been processed by different software packages including SARPROZ (Perissin, 2014) and StaMPS (Hooper, 2013).</p> <p>Data for five localities were ordered (all in Portugal):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Alfândega da Fé (unstable slope): both ERS and ASAR</li> <li>- Barragem de Paradela (rockfill dam): ASAR</li> <li>- Encosta da Margem Esquerda à Barragem da Raiva (concrete dam with unstable slopes on both sides): ASAR</li> <li>- Encostas na Albufeira de Ribeiradio (5 unstable slopes): ASAR</li> <li>- Escombeira de Salamonde (unstable slope): ASAR</li> </ul> <p>Up to now, the sites Alfândega da Fé and Escombeira de Salamonde were completely processed.</p>
<b>Public Availability of Status</b>	Not Publicly Available

<b>Problems</b>	<p><b>Alfândega da Fé</b></p> <p>The dataset analyzed within this research consists of 175 SLC images acquired within years 1992 - 2010 along an ascending track No. 273 (19xENVISAT) and descending tracks No. 180 (61x ERS, 20x ENVISAT) and No. 409 (56x ERS, 19x ENVISAT). In the case of monitoring high-priority slope located near Alfândega da Fé (Portugal) that is prone to instability, very little can be known since the datasets we dispose of are:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>I. descending track No. 180: AOI is in decorrelation area due to foreshortening/layover in radar images from both ERS and ENVISAT;</li> <li>II. descending track No. 409: AOI is decorrelated due to foreshortening/layover in both sets of ERS and ENVISAT images again;</li> <li>III. ascending track No. 273: AOI is seen within ENVISAT ASAR images, but there are only 19 images with poor coherence.</li> </ol> <p>Performing different strategies (DInSAR, PSInSAR, Quasi-PSInSAR, together with retrieving information from the coherence matrices and amplitude stability index maps) reveals that any reliable information could very hardly be extracted.</p> <p><b>Encosta da Margem Esquerda à Barragem da Raiva</b></p> <p>Both ordered tracks (44 and 316, both ascending) were processed in the StaMPS software. However the dam is perfectly oriented (unfortunately, not the unstable slopes above it) in these scenes, parallel to the azimuth direction, and its intensity is very high in comparison to the surroundings, and has a good resolution, its phase is spatially unstable, possibly due to long perpendicular baselines in the data stack and imprecise DEM (X-band SRTM) used. The fact of low spatial coherence implies that most of the dam points are excluded from the processing. The work on these two datasets will continue using the SARproZ software and adjusting more parameters in StaMPS, and we would also like to order ERS data for this site where shorter baselines and higher number of scenes are expected (61 scenes in descending track 452, where also one of the unstable slope should be visible, if not in foreshortening/layover); possibly to use them to perform DEM correction and to load it in the ASAR processing.</p> <p>To fully investigate the research objective we would like to extend the quota allocated to the project and process the full archive of SLC images from ENVISAT: for the Alfandega da Fé we would also like to try processing ascending track no. 1.</p> <p><b>For other areas</b> (Raiva and Paradela dams, Escombreira de Salamonde and probably also for Encostas na Albufeira de Ribeiradio which processing was not yet started, but contains five vegetated unstable slopes), we would like to order ALOS L-band data and also ERS data which could not be ordered in the first project phase due to quota.</p> <p>Particularly, we would like to order ERS track 452 (53 scenes) for the Barragem de Paradela and Escombreira de Salamonde localities (the same dataset) and tracks 180 and 452 (55, resp. 51 scenes) for the Raiva dam. If possible, ascending tracks for the Raiva dam (316 and 44) may be also ordered in order to get more complex information, hoping that even if the number of images is comparable to Envisat, the perp. baselines</p>
-----------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<b>Further dataset needed</b>	yes
<b>Achievements</b>	<p><b>Alfândega da Fé:</b></p> <p>The satellite data in ascending and descending orbits have been analysed in the period of years 1992 – 2010 using multi-temporal InSAR techniques namely PSInSAR, SBAS and Quasi-PSInSAR. The highest priority area, unstable slope near Alfândega da Fé (Portugal), is situated in the mountainous area covered mostly by the vegetation. The slope is monitored also by geodetic techniques (leveling, GNSS, etc.) over set of fixed points stabilized in the ground. In the area, new highway was built in 2011. From the geodetic measurements of the latest campaign (Dec, 2012 - Jul, 2014), the area of interest is affected mostly by the subsiding motion in the down-the-slope direction. For the stated period of 1.5 year, the most deviating point in the middle of the slope beholds the signs of fast non-linear motion reaching 75 cm in horizontal and -40 cm in vertical axis. The second highest vertical displacements, for the period of last campaign again, are expected to be approximately from -100 to +10 mm/year in the satellite's line-of-sight. Generally, and for the whole period of monitoring the area is affected by significant deviations on individual points reaching 80 mm in horizontal and -6/+34 mm in vertical axis. Two different approaches have been proposed:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>I. Quasi-PSInSAR and Small Baseline Subset analysis over extended area around Alfândega da Fé where velocities are evaluated applying a linear trend model;</li> <li>II. local analysis of small area which allows to achieve higher accuracy in displacements estimation, and, especially, to detect non-linear trends. Unfortunately, the subjected slope is located in the decorrelation area due to layover/foreshortening in ERS/ENVISAT radar images from descending tracks (180, 409). Furthermore, performing different processing strategies (regarding DInSAR, PSInSAR, Quasi-PSInSAR, together with retrieving information from the coherence matrices and amplitude stability index maps) on 19 ENVISAT's ASAR images from ascending track No. 273 where subjected area of interest (AOI) is visible, reveals that any reliable information could very hardly be extracted due to low coherence of relatively small dataset.</li> </ol> <p>The research was concluded by Quasi-PSInSAR/SBAS analysis of ERS and ENVISAT's descending track No. 409 over extended area discarding zone of interest, to obtain continuous information about movements that may endanger newly built highways, e.g. fastened landslides. Escombreira de Salamonde and Paradela dam:</p> <p>Both locations are present in Envisat ASAR tracks 273 and 44 (both ascending). Both tracks provide data between 2003-2007 within 20 acquisitions, their results should therefore be comparable. Analysis was performed by multi-temporal InSAR techniques PSInSAR, Quasi- PSInSAR and StaMPS MTI. Because the terrain is natural and present vegetation (especially in the river/reservoir valley) causes high decorrelation issues in C-band data, it wasn't possible to detect slope movements using Envisat data. Several slopes were suspected of deformations but cannot be validated within current dataset. InSAR techniques helped to identify only areas that are stable in the area.</p>

	<p>Promising results were achieved in case directly at Paradela dam - some movement was detected at the upper part of Paradela dam in the rate of about 3 mm/year in Envisat line-of-sight (see Fig. 3). Such movements, however, were not detected at the lower part where the temporal trend didn't exceed 1 mm/year. This finding may signalize that the upper part of the dam is slowly bending towards reservoir. Rate of such horizontal bend can reach some 2.5 cm/year and should be further investigated in-situ or using higher resolution SAR data.</p>
<b>Public Availability of</b>	Publicly Available
<b>Upload File</b>	images.zip View
<b>Public Availability of Uploaded</b>	Publicly Available
<b>Application Domain</b>	Hazards
<b>Type of instrument used</b>	SAR
<p><b>Longitude West Latitude North Longitude East Latitude South</b>  -8.569336 41.492121 -7.03125 39.67337 show</p>	



## Anexo 4 – Disponibilidade de imagens SAR nas áreas de interesse

### **Barragem do Alto Ceira**

#### ERS

180 descending = 42 scenes (1992-1998)

#### Envisat

180 descending = 21 scenes (2003-2009)

### **Alfandega da Fé**

#### ASAR:

180 descending = 20 scenes (2003-2009) - 2x 1 year gaps

273 ascending = 20 scenes (2002-2007)

409 descending = 20 scenes (2003-2010) - 3x 1 year gaps

#### ERS:

180 descending = 55 scenes (1992-1999)

409 descending = 47 scenes (1992-1999)

### **Barragem da Paradela AND Escombreira de Salamonde**

#### ASAR:

44 ascending = 20 scenes (2003-2007)

273 ascending = 20 scenes (2002-2007)

#### ERS:

452 descending = 51 scenes (1992-2000)

### **Encosta da Margem Esquerda à Barragem da Raiva AND Encostas na Albufeira de Ribeiradio**

#### ASAR:

44 ascending = 20 scenes (2003-2007) different frame then Barragem AND Salamonde

316 ascending = 19 scenes (2002-2009)

### **Talude de Alfandega da Fé**

#### ASAR:

1 ascending = 19 scenes (2002-2008)

180 descending = 20 scenes (2003-2009) - 2x 1 year gaps

273 ascending = 21 scenes (2002-2007)

409 descending = 20 scenes (2003-2010) - 3x 1 year gaps

#### ERS:

1 ascending = 16 scenes (1992-1999) - **unreliable for PSInSAR**

180 descending = 56 scenes (1992-1999)

273 ascending = 8 scenes (1993-1999) - **unreliable for PSInSAR**

409 descending = 47 scenes (1992-1999)

ALOS:

6 ascending = 15 scenes (2006-2011)

### **Barragem de Paradela**

ASAR:

44 ascending = 20 scenes (2003-2007)

273 ascending = 23 scenes (2002-2007)

452 descending = 17 scenes (2003-2007) - **unreliable for PSInSAR**

ERS:

273 ascending = 9 scenes (only years 3x 1993, 1x 1997, 5x 1999) - **unreliable for PSInSAR**

452 descending = 53 scenes (1992-2000)

ALOS:

7 ascending = 16 scenes (2007-2011, 2010-03-29 **on the edge of sensed area**)

8 ascending = 14 scenes (2007-2010)

### **Encosta da Margem Esquerda à Barragem da Raiva**

ASAR:

44 ascending = 20 scenes (2003-2007)

316 ascending = 19 scenes (2002-2009)

452 descending = 17 scenes (2003-2007)

ERS:

180 descending = 55 scenes (1992-1999)

316 ascending = 19 scenes (1993-1999)

452 descending = 61 scenes (1992-2000)

ALOS:

9 ascending = 10 scenes (2007-2011)

### **Encostas na Albufeira de Ribeiradio**

ASAR:

44 ascending = 20 scenes (2003-2007)

223 descending = 16 scenes (2003-2010) - **cutting AOI in the middle! east slope is not included**

316 ascending = 20 scenes (2002-2009)

452 descending = 17 scenes (2003-2007) - **unreliable for PSInSAR**

ERS:

316 ascending = 20 scenes (1993-1999) - **unreliable for PSInSAR**

452 descending = 51 scenes (1992-2000)

ALOS:

8 ascending = 14 scenes (2007-2010)

9 ascending = 10 scenes (2007-2011)

### **Escombreira de Salamonde**

#### ASAR:

44 ascending = 20 scenes (2003-2007)

223 descending = 18 scenes (2003-2010), 2006-2008 **no data, 2007 1 image) - unreliable for PSInSAR**

273 ascending = 21 scenes (2002-2007)

452 descending = 17 scenes (2003-2007) - unreliable for PSInSAR

#### ERS:

223 descending = 36 scenes (1995-2000) **AOI on the edge of image**

273 ascending = 10 scenes (only years 3x 1993, 1x 1997, 5x 1999) - **unreliable for PSInSAR**

452 descending = 62 scenes (1992 - 2001 january) **AOI on the edge of the image**

#### ALOS:

8 ascending = 14 scenes (2007-2010)

Anexo 5 – Gráficos da distribuição da Base Perpendicular e da diferença de frequências Doppler Centroide, na Encosta de Alfandega da Fé junto ao IC5.

