

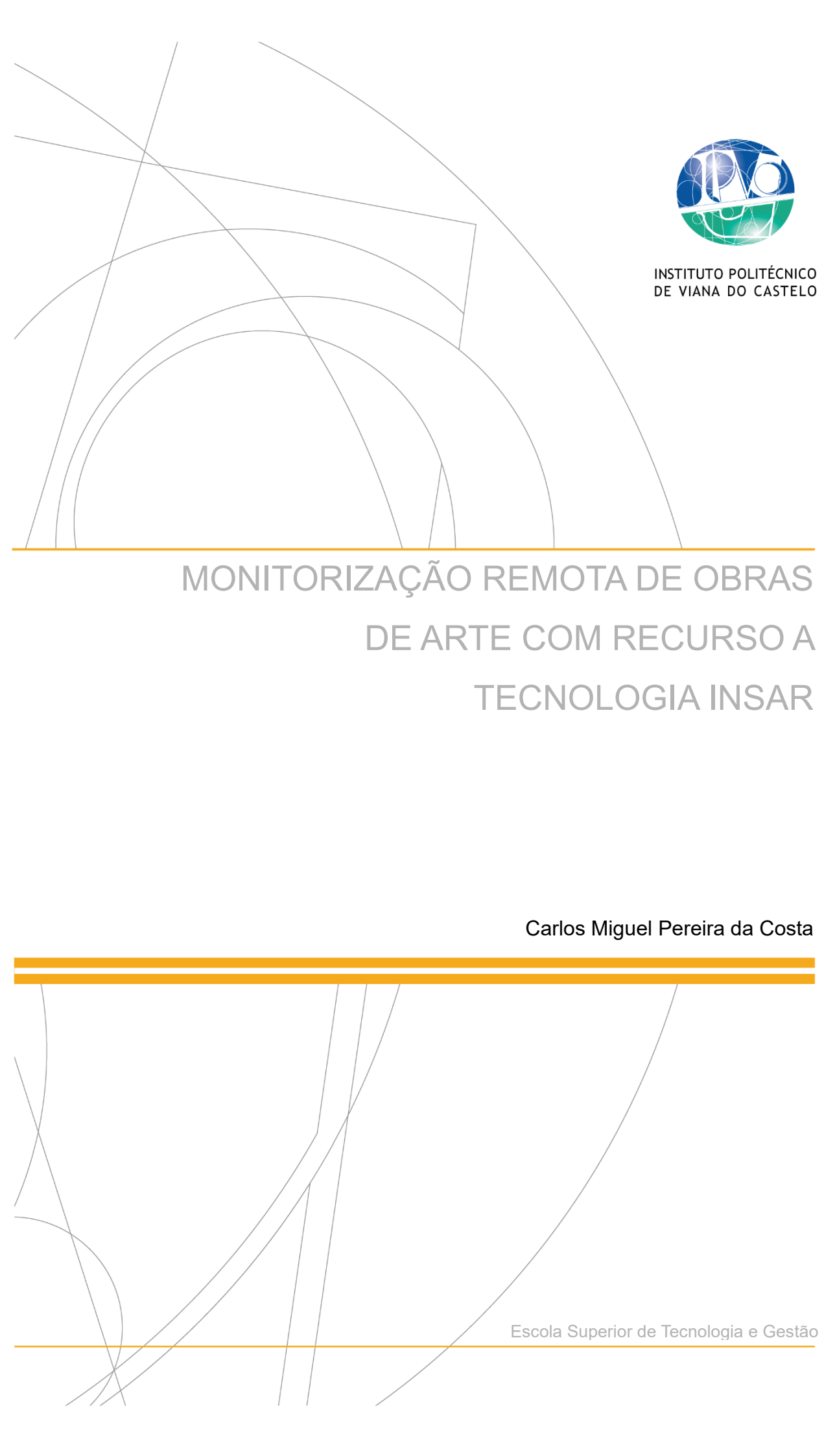


INSTITUTO POLITÉCNICO
DE VIANA DO CASTELO

ESTG

MONITORIZAÇÃO REMOTA DE OBRAS DE ARTE COM RECURSO A TECNOLOGIA INSAR
Carlos Miguel Pereira da Costa

2024



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE VIANA DO CASTELO

MONITORIZAÇÃO REMOTA DE OBRAS DE ARTE COM RECURSO A TECNOLOGIA INSAR

Carlos Miguel Pereira da Costa

Escola Superior de Tecnologia e Gestão



Instituto Politécnico
de Viana do Castelo

Carlos Miguel Pereira da Costa

Monitorização remota de Obras de Arte com recurso a tecnologia InSAR

Mestrado em Engenharia Civil e do Ambiente

Dissertação sob orientação de
Professora Doutora Joana Maia de Oliveira Almeida
Professor Doutor Pedro Miguel Ribeiro de Castro

Maio de 2024

MEMBROS DO JÚRI

*À minha família,
em especial ao meu pai.*

Give me the third best technology. The second best won't be ready in time.

The best will never be ready.

Sir Robert Alexander Watson-Watt

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Professora Doutora Joana Maia de Oliveira Almeida e ao Professor Doutor Pedro Miguel Ribeiro de Castro pelo acompanhamento ao longo da elaboração desta tese, pela disponibilidade, orientações, rigor crítico corretivo e paciência, particularmente à professora Joana Almeida pela introdução e motivação ao tema da gestão de Obras de Arte.

Sobretudo agradeço pela oportunidade para experimentar e errar.

Agradeço também:

À IP - Infraestruturas De Portugal pela partilha de medições *in situ* recentes sobre duas pontes que permitiu comparar os resultados conseguidos.

Ao Professor Doutor Francisco Piqueiro pelas questões e conselhos no caso de estudo do Quebra-Mar Na Foz Do Douro.

Agradeço à comunidade científica que pensa, descobre e disponibiliza resultados e ferramentas que tornam possível executar análises como a apresentada nesta tese.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo contribuir para o estudo da utilização de dados provenientes de tecnologias de Radar de Abertura Sintética (SAR) no âmbito de sistemas de gestão de obras de arte, como forma de cálculo de deslocamentos em estruturas para monitorização remota de grandes áreas. Para o efeito, a dissertação apresenta uma metodologia que utiliza dados de Interferometria de Radar de Abertura Sintética (InSar) para detetar deslocamentos em obras de arte e testa a sua validade por comparação com dados de medições registadas por meios tradicionais.

Após enquadramento e apresentação dos principais conceitos associados a SAR, dos métodos de interferometria e de outras aplicações para pontes, é feita uma descrição mais detalhada dos processos relacionados com a abordagem *Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar* (DInSAR) escolhida para o presente trabalho: *Stanford Method for Persistent Scatterers* (StaMPS).

Esta abordagem tem uma cadeia de processos *Sentinel Application Platform* (SNAP)-StaMPS adaptada ao uso de imagens da missão Sentinel 1, para estimativas de deslocamentos em *Line of Sight* (LOS). Posteriormente, esses dados são analisados num Sistema de Informação Geográfica (SIG) onde foi criado um conjunto de códigos em *python*, designado por *Assistente de Análise*, para conversão dos deslocamentos LOS e para visualização e tratamento das séries temporais.

Num primeiro caso de estudo prático, a implementação dessa cadeia de processos foi feita para um Quebra-mar na Foz do Douro, que permitiu evidenciar a importância de correta topografia e da automação do pós-processamento. Posteriormente, com a aplicação da metodologia a duas pontes, a Ponte D. Luís e a Ponte da Asseca em Santarém, foram obtidos resultados promissores em termos de correspondência entre a variação ao longo do tempo e a ordem de grandeza, sobretudo em termos de deslocamentos verticais.

De uma forma geral, os resultados obtidos apontam para a aplicabilidade da tecnologia InSAR na monitorização de estruturas observáveis do espaço, como as pontes, permitindo obter estimativas de deslocamentos com uma precisão sub-centimétrica, semelhante às tolerâncias obtidas com aparelhos topográficos tradicionais.

PALAVRAS-CHAVE: MT-InSAR, StaMPS, Difusores persistentes, SIG, Pontes, Monitorização.

ABSTRACT

This work aims to contribute to the study of data implementation from Synthetic Aperture Radar (SAR) technologies in bridges management systems, as a way of calculating displacements in structures for remote monitoring of large areas. Towards that, the dissertation presents a methodology that uses Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSar) data to detect displacements in bridges and tests its validity by comparison with measurement data recorded by traditional methods.

After presenting the main concepts associated with SAR, interferometry methods and other applications for bridges, a more detailed description of the process related to the chosen Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) approach is made: Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS).

This approach has a Sentinel Application Platform (SNAP)-StaMPS process chain adapted to the use of images from the Sentinel 1 mission for displacement estimates in Line of Sight (LOS). Subsequently, this data is analyzed in Geographic Information System (GIS) where a set of codes in Python, called *Assistente de Análise*, was created to convert LOS displacements and to process and visualize time series.

This process chain implementation was first carried out with the case study of a breakwater in Foz do Douro where the importance of correct topography and post-processing automation was concluded. Subsequently, two bridges, Ponte D. Luís and Ponte da Asseca in Santarém, were studied and the application of the methodology produces promising results, with a good correspondence between the variation over time and the order of magnitude, especially in terms of vertical displacements.

In general, the results obtained point to the applicability of InSAR technology in monitoring structures seen from space, such as bridges, allowing displacement estimates to be obtained with sub-centimeter precision, similar to the tolerances obtained with traditional topographic devices.

KEYWORDS: MT-InSAR, StaMPS, Persistent Scatterer, GIS, Bridges, Monitoring.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE GERAL	vi
ÍNDICE DE TEXTO	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xxi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xxii
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS	xxiv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - TECNOLOGIAS DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR)	11
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO REMOTA DE DESLOCAMENTOS EM ESTRUTURAS	67
CAPÍTULO 4 - ESTUDO DE QUEBRA-MAR NA FOZ DO RIO DOURO.....	93
CAPÍTULO 5 - ESTUDO DE PONTES EM SANTARÉM	119
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO	177
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	R.1
ANEXOS.....	A.1

ÍNDICE DE TEXTO

AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE GERAL	vi
ÍNDICE DE TEXTO	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xxi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xxii
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS	xxiv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Sistemas de gestão de obras de arte.....	4
1.3. Principais objetivos.....	7
1.4. Estrutura da dissertação	8
CAPÍTULO 2 - TECNOLOGIAS DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR)	11
2.1. Radares de abertura sintética (SAR) - principais conceitos	11
2.1.1. Sistemas SLAR (Side-Looking Airborn Radars)	12
2.1.2. Abertura Sintética.....	13
2.1.3. Frequência e Comprimento de onda.....	14
2.1.4. Fase e amplitude.....	16
2.1.5. Polarização e mecanismos de retrodifusão.....	17
2.1.6. Geometria de um radar	19
2.1.7. Resolução SAR	21
2.1.8. Distorções Geométricos	22
2.1.9. Efeito de <i>speckle</i>	23

2.1.10.	Geometrias de aquisição	24
2.1.11.	Características de diferentes plataformas com sensores SAR	26
2.2.	Métodos de interferometria SAR.....	28
2.2.1.	InSAR.....	28
2.2.2.	DInSAR.....	30
2.2.3.	PSI.....	30
2.2.4.	SBAS.....	32
2.2.5.	Técnicas mais comuns de interferometria SAR	34
2.3.	Algoritmos InSAR.....	41
2.3.1.	Evolução dos algoritmos InSAR.....	41
2.3.2.	Terminologia para classificação dos algoritmos	43
2.4.	Agência Espacial Europeia.....	45
2.5.	Programa Copernicus	46
2.5.1.	A família dos Sentinel	47
2.5.2.	Sentinel 1.....	48
2.6.	Softwares para processar imagens satélites	55
2.7.	Aplicações InSAR	56
2.7.1.	Aplicações InSAR em Pontes	57
2.7.2.	InSAR com Inteligência Artificial.....	65
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO REMOTA DE DESLOCAMENTOS EM ESTRUTURAS		67
3.1.	Metodologia.....	67
3.2.	Escolha dos dados.....	71
3.3.	Construção da pilha interferométrica	73
3.3.1.	Operadores usados.....	76
3.4.	Análise StaMPS.....	83
3.4.1.	Análise da amplitude.....	83

3.4.2.	Análise da fase (Passo 2).....	84
3.4.3.	Seleção dos Difusores Persistentes (Passo 3).....	85
3.4.4.	Depuração dos Difusores Persistentes (Passo 4).....	86
3.4.5.	Correção da fase (Passo 5)	87
3.4.6.	Desenrolar de fase (Passo 6)	87
3.4.7.	Estimar o erro do ângulo de vista espacialmente correlacionado (Passo 7).....	88
3.4.8.	Filtragem atmosférica (Passo 8).....	88
3.5.	Estimativa dos deslocamentos em pontos georreferenciados na estrutura	89
4.	ESTUDO DE QUEBRA-MAR NA FOZ DO RIO DOURO	93
4.1.	Enquadramento e descrição da estrutura	93
4.2.	Dados e respectivas linhas de base perpendicular e temporal	96
4.3.	Modelo Digital de Terreno.....	98
4.4.	Procedimentos e parâmetros usados na análise	101
4.5.	Geometrias de interesse	102
4.6.	Cálculo de deslocamentos	103
4.6.1.	Trajetória descendente.....	103
4.6.2.	Trajetória ascendente.....	106
4.6.3.	Conjugação da trajetória ascendente com a trajetória descendente	108
4.7.	Análise dos resultados por comparação com medições baseadas em ortofotomapas	
	113	
5.	ESTUDO DE PONTES EM SANTARÉM	119
5.1.	Enquadramento e descrição das estruturas	119
5.1.1.	Ponte D. Luis.....	120
5.1.2.	Ponte da Asseca.....	121
5.2.	Dados e respectivas linhas de base perpendicular e temporal	123
5.3.	Modelo digital do terreno	127
5.4.	Procedimentos e parâmetros usados na análise	128

5.5.	Geometrias de interesse	130
5.6.	Cálculo dos deslocamentos em ambiente SIG.....	131
5.7.	Análise dos resultados por comparação com medições topográficas.....	137
5.7.1.	Análise dos resultados obtidos para a Ponte D. Luís	140
5.7.2.	Análise dos resultados obtidos para a Ponte da Asseca	165
5.7.3.	Outras considerações sobre os Resultados	174
6.	CONCLUSÃO	177
6.1.	Causas para Eventuais limitações de algumas das estimativas obtidas.....	180
6.2.	Recomendações para futuras aplicações.....	183
6.3.	Desenvolvimentos futuros	185
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	R.1
	ANEXOS.....	A.1
	Anexo 1 – Nomenclatura e ferramentas de software aberto para SAR.....	A.2
	Anexo 2 – Resultados obtidos para as pontes estudadas - análise StaMPS – Trajetória Ascendente	A.4
	Anexo 3 – Resultados obtidos para as pontes estudadas - análise StaMPS – Trajetória Descendente	A.7
	Anexo 4 – Exemplos de programas desenvolvidos para o Assistente de Análise.....	A.10

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 - Esquema de funcionamento do programa de gestão de pontes (J. O. Almeida, 2013).....	5
--	---

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Esquematização dos ecos recebidos de volta pela antena. Fonte:(ESA, 2007)....	11
Figura 2.2 - Representação da ambiguidade do radar nadir à esquerda e solução em lateral à direita. Fonte:(CSR, n.d.)	12
Figura 2.3 - Geometria das observações usadas para formar a abertura sintética. Fonte:(Meyer, 2019).....	13
Figura 2.4 - Penetração do sinal SAR pelo comprimento de onda do sensor. Fonte:.(Meyer, 2019).....	15
Figura 2.5 - Onda de radar representada como uma função senoidal com período de 2π radianos. Fonte: adaptado de(Ferretti et al., 2007).....	16
Figura 2.6 - Esquema das polarizações SAR. Fonte:(Alaska Satellite Facility, n.d.)	17
Figura 2.7 - Esquema dos principais tipos de difusores a considerar em análise SAR. Fonte: adaptado de (Meyer, 2019):.....	18
Figura 2.8 - Geometria de um radar em SLAR. Fonte: adaptado de (Meyer, 2019).....	19
Figura 2.9 - Ângulos da geometria de um radar. Fonte:(Roque et al., 2016).....	20
Figura 2.10 - Esquema do observado em alcance oblíquo vs real da superfície em alcance terrestre. Fonte: (Zyl & Kim, 2010)	22
Figura 2.11 - Principais distorções geométricas em imagens SAR. Fonte:(Meyer, 2019).....	22
Figura 2.12 - Fase e amplitude aleatórias de uma coleção de difusores numa célula de resolução somados num vetor. Fonte:(Woodhouse, 2005).....	23
Figura 2.13 – Da esquerda para a direita sobre a Reserva Natural do Estuário do Tejo: Imagem ótica google, imagem radar Sentinel 1 com speckle e imagem radar com filtro de remoção speckle	23
Figura 2.14 - Modos de aquisição Sentinel-1. Fonte: adaptado de (Copernicus, n.d.-g)	24
Figura 2.15 - Princípio da interferometria SAR na monitorização dos deslocamentos. Fonte: adaptado de (Schindler et al., 2011)	29
Figura 2.16 - Geometria da separação de órbita em interferometria SAR. Fonte:(Ferretti et al., 2007).....	29

Figura 2.17 - Exemplo de gráfico para método PSI. Fonte: (A. Hooper et al., 2012)	31
Figura 2.18 - Princípio PSI - a) DS - difusores distribuídos b) PS - difusores persistentes. Fonte:(A. Hooper et al., 2012)	32
Figura 2.19 - Exemplo gráfico SBAS. Fonte:(A. Hooper et al., 2012).....	33
Figura 2.20 - Representação da força do sinal retornado por alvos numa medida em alcance. Fonte:(Tre Altamira, n.d.).....	34
Figura 2.21 - Plataforma TreMaps de TreAltamira para visualização e gestão de dados InSa. Fonte: (Tre Altamira, n.d.).....	36
Figura 2.22 - StaMPS instalado e pronto a ser usado no MatLab. Fonte: Autor.....	37
Figura 2.23 – Exemplo de StaMPS a ser usado no MatLab - podem observar-se os deslocamentos para uma área de interesse (Santarém) e respetiva série temporal para um conjunto de pontos exemplo. Fonte: Autor.....	38
Figura 2.24 - Interface SARPROZ. Fonte:(Perissin et al., 2011).....	39
Figura 2.25 - Porta Web da ferramenta P-SBAS. Em (a) Parâmetros gerais de processamento (b) Mapa com seleção de AoI(Area of interest). Fonte:(Luca et al., 2015).....	40
Figura 2.26 - Infraestruturas ESA, fonte:(ESA, n.d.-c).....	45
Figura 2.27 - Missões de observação da Terra desenvolvidas e a desenvolver pela ESA para o programa Copernicus. Fonte:(ESA, 2023a)	46
Figura 2.28 - Representação de um satélite da família Sentinel-1. fonte:(ESA, n.d.-f).....	48
Figura 2.29 - Sentinel-1C em testes de radiofrequências na camara anecoica nas instalações da Thales Alenia Space em Cannes, França. Fonte:(ESA, 2023b)	49
Figura 2.30 - Representação das orbitas pela constelação Sentinel 1. Fonte:(Copernicus, n.d.- d).....	50
Figura 2.31 - Cenário de observação pela constelação, repetição e frequência. Fonte:(Copernicus, n.d.-e).....	51
Figura 2.32 - Extrato de parte do plano de aquisição pelo Sentinel-1A em passagem ascendente e descendente. Fonte:(ESA, n.d.-a)	51
Figura 2.33 - Representação gráfica dos produtos do Sentinel-1. Fonte: (Copernicus, n.d.-f)	53
Figura 2.34 - Deslocamentos verticais PS7 e PS8, velocidades e coerência dos mesmos. Fonte:(Roque et al., 2014).....	56
Figura 2.35 - Análise MTInSAR da ponte Albiano-Magra colapsada. Fonte:(Nettis et al., 2023).....	58
Figura 2.36 - Análise MTInSAR para a ponte em Fossano. Fonte:(Nettis et al., 2023)	58
Figura 2.37 - Resultado da análise InSAR	59

Figura 2.38 - Resultado da aplicação da metodologia	59
Figura 2.39 - Pontos PS e respetiva velocidade em LOS sobre mapa atualizado da zona.(J. J. Sousa & Bastos, 2013)	62
Figura 2.40 - Deslocamento em (a) principal ponte HZMB e três outras pontes: (b) JZB, (c) JHB e (d) QZB. Fonte: (Xiong et al., 2021).....	63
Figura 2.41 - Contagem de artigos na biblioteca b-on sobre InSAR e AI.....	65
Figura 2.42 - Diagrama geral da metodologia (Ranjgar et al., 2021)	66
Figura 2.43 - N° de publicações sobre desenrolar de fase com base em AI. Fonte: (Zhou et al., 2021).....	66

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Esquemas dos processos, a abordagem PSI e pós processamento. Adaptado de (Foumelis et al., 2018), (Blasco et al., 2019), (Serco Italia S.p.A., 2021) (A. Hooper et al., 2018) e (Jung et al., 2019).....	68
Figura 3.2 - Plataforma Copernicus Open Access Hub usada para transferir as imagens SLC necessárias. Terminada em dezembro 2023	71
Figura 3.3 - Esquema do modo TOPS do Sentinel 1.....	72
Figura 3.4 - Exemplo imagem SLC pelo Sentinel 1na orbita 147 ascendente.....	73
Figura 3.5 - Configurações necessárias para executar snap2stamps.	74
Figura 3.6 - Operadores para processar as imagens slaves.	75
Figura 3.7 - Operadores para usar uma slave com a master para fazer co-registo e criação de interferogramas e por fim exportar para o formato usado no StaMPS.....	75
Figura 3.8 - Configuração do mt_prep_snap.....	75
Figura 3.9 - Operador TOPSAR Split no SNAP e respetivas especificações	76
Figura 3.10 - Operador Apply Orbit File no SNAP e respetivas especificações.....	77
Figura 3.11 - Operador Back Geocoding no SNAP e respetivas especificações	77
Figura 3.12 - Operador Enhanced Spectral Diversity no SNAP e respetivas especificações. .	78
Figura 3.13 - Operador Interferogram Formation no SNAP e respetivas especificações	79
Figura 3.14 - Exemplo de remoção flat earth. Fonte:(Valentino, 2021).....	79
Figura 3.15 - Operador TOPSAR Debrust no SNAP e respetivas especificações	80
Figura 3.16 - Operador Topographic Phase Removal no SNAP e respetivas características...	80
Figura 3.17 - Exemplo de formação de interferograma diferencial (Valentino, 2021)	81
Figura 3.18 - Operador Subset no SNAP e respetivas especificações.	81
Figura 3.19 - Operador StaMPS Export no SNAP e respetivas especificações.	82

Figura 3.20 - Princípio de desenrolar da fase.(Braun, 2021)	88
---	----

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 - Elementos na foz do rio Douro.....	93
Figura 4.2 - localização das obras de melhoria. Fonte:(APAmbiente et al., 2003).....	94
Figura 4.3 - Perfil transversal-tipo de um quebra-mar destacado. Fonte:(Pereira, 2008)	95
Figura 4.4 - Colocação do manto resistente no quebra-mar destacado. Fonte:(IRMÃOS CAVACO, n.d.).....	95
Figura 4.5 - Geometrias das imagens radar para trajetória ascendente e descendente sobre o quebra-mar em estudo	96
Figura 4.6 - Resultado da ferramenta InSar Stack Overview, ascendente.	97
Figura 4.7 - Gráfico da relação da linha de base perpendicular e temporal relativamente à master, ascendente.....	97
Figura 4.8 - Resultado da ferramenta InSar Stack Overview, descendente.	97
Figura 4.9 - Gráfico da relação da linha de base perpendicular e temporal relativamente à master, descendente.....	98
Figura 4.10 - SRTM 30m para cidade do Porto e foz do Douro	98
Figura 4.11 - Copernicus Global 30m para a cidade do Porto e foz do Douro	99
Figura 4.12 - EU DTM 30 para a cidade do Porto e foz do Douro	99
Figura 4.13 - ALOS World 30m para a cidade do porto e foz do Douro	99
Figura 4.14 - Modelo digital do terreno que abrange os splits usados no estudo. Proveniência: Copernicus 30m.....	100
Figura 4.15 - Modelo digital de superfície usado.....	100
Figura 4.16 - Modelo Digital do terreno/superfície usado nos procedimentos.....	100
Figura 4.17 - Procedimento executado para trajetória descendente e ascendente na análise preliminar	101
Figura 4.18 - Ângulos de enquadramento do quebra-mar para com trajetórias das imagens radar.....	102
Figura 4.19 - Elevação a partir do elipsoide para cada ponto persistente calculado pelo StaMPS.....	103
Figura 4.20 - Elevação a partir do elipsoide para o quebra-mar em estudo	103
Figura 4.21 - Velocidade do deslocamento em linha de vista. Análise: descendente e SRTM	104

Figura 4.22- Localização dos difusores da velocidade de deslocamento em linha de vista corrigida.	104
Figura 4.23 - Localização e valores dos difusores da velocidade de deslocamento, usando MDT personalizado. Trajetória descendente.....	105
Figura 4.24 - Velocidade do deslocamento em linha de vista. Análise: ascendente e SRTM	106
Figura 4.25 - Localização dos difusores da velocidade de deslocamento em linha de vista corrigida.	106
Figura 4.26 - Localização e valores dos difusores da velocidade de deslocamento, usando MDT personalizado. Trajetória ascendente.....	107
Figura 4.27 - Difusores persistentes ascendentes e descendentes sobre o Quebra-Mar	109
Figura 4.28 - Representação da resolução espacial por ponto persistente (4m em alcance, 13m azimuth).....	109
Figura 4.29 - Valores da velocidade anual de deslocamento em linha de vista para trajetória ascendente	110
Figura 4.30 - Valores da velocidade anual de deslocamento em linha de vista para trajetória descendente	110
Figura 4.31 - Divisão do quebra-mar por estabilidade da superfície.	111
Figura 4.32- Definição simples das áreas de influência para fazer reamostragem espacial. .	111
Figura 4.33 - Deslocamentos verticais	112
Figura 4.34 - Deslocamentos longitudinais.....	112
Figura 4.35 - Comparação dos resultados obtidos por sobreposição com medições baseadas em ortofotomapas. Fonte: Foto Engenho, Lda (Piqueiro, n.d.).....	113
Figura 4.36 - Corte 6	115
Figura 4.37 - Corte 7	115
Figura 4.38 - Corte 8	115
Figura 4.39 - Corte 9	115
Figura 4.40 - Corte 10	116
Figura 4.41 - Corte 11	116
Figura 4.42 - Corte 12	116
Figura 4.43 - PS sobre pontos no rio Douro, Porto.	117

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 - Pontes em estudo e áreas de referência para StaMPS	119
---	-----

Figura 5.2 - Ponte D. Luis no início do século XX. Fonte: a) - (eugostodesantarem.pt, 2015); b) - (eugostodesantarem.pt, 2020).....	120
Figura 5.3 - Ponte D.Luis na atualidade, a) parte sobre o leito do rio tejo (Torres, 2013), b) parte sobre a margem esquerda (Garcia, 2012).	121
Figura 5.4 - Ponte da Asseca no início do século XX (Cardoso, 2013).....	121
Figura 5.5 - Ponte da Asseca na atualidade - lado montante (Cardoso, 2012).....	122
Figura 5.6 - Ponte da Asseca – vista de Santarém para o Cartaxo (Google Street View).	122
Figura 5.7 - Geometria das imagens radar para trajetória ascendente (a verde) e descendente (a cor de laranja) sobre as duas pontes de Santarém em estudo.	123
Figura 5.8 - Gráfico da relação da base perpendicular e temporal relativamente à master, trajetória ascendente.	125
Figura 5.9 - Gráfico da relação da base perpendicular e temporal relativamente à master, trajetória descendente.	127
Figura 5.10 - a) Copernicus Global DSM 30m original para área de Santarém. b) - modelo Digital modificado considerado para a análise realizada.	128
Figura 5.11 - Procedimento executado para análise das estruturas na área de Santarém.....	128
Figura 5.12 - Ângulos de enquadramento da ponte D. Luis (a) e Asseca (b) para com as trajetórias das imagens radar	130
Figura 5.13 - Cobertura de difusores persistentes provenientes de trajetória ascendente e descendente incluídos no buffer de recorte – ponte de D. Luís	131
Figura 5.14 - Representação da resolução espacial por difusor persistente – ponte D. Luís .	132
Figura 5.15 - Cobertura de difusores persistentes provenientes de trajetória ascendente e descendente incluídos no buffer de recorte assim como representação espacial em azimute e alcance -ponte da Asseca.	132
Figura 5.16 - Buffer aos pontos e respetivos difusores a serem unidos - Pilar 32 da Ponte D. Luís.....	133
Figura 5.17 - Aba Cálculo trajetória única do assistente de análise.	134
Figura 5.18 - Aba Unir Pontos no assistente de análise	134
Figura 5.19 - Aba Cálculo Trajetória Múltipla no assistente de análise.....	135
Figura 5.20 - Exemplo da visualização das velocidades de deslocamento - valores em LOS a branco, o cálculo YXZ para ambas trajetórias a verde e cálculo vertical e longitudinal a azul	135
Figura 5.21 - Aba Construir Gráficos do assistente de análise com gráficos das series temporais do ponto 191, 188, 185 ascendente LOS.....	136

Figura 5.22 - Esquema da Ponte D. Luis e respetivas posições dos alvos. Fonte: (Infraestruturas de Portugal, n.d.).....	140
Figura 5.23 - Posição vertical dos sensores nos pilares da ponte D. Luís Esquema: (Infraestruturas de Portugal, n.d.), Fotografia: Google Street Maps.....	140
Figura 5.24 - Resultados velocidade de deslocamento anual para as várias referências na trajetória múltipla, ponte D. Luis	141
Figura 5.25 - Resultados velocidade de deslocamento anual para as várias referências, na trajetória ascendente, ponte D. Luis	142
Figura 5.26 - Resultados velocidade de deslocamento anual para as várias referências, na trajetória descendente, ponte D. Luis	143
Figura 5.27 - Comparação pilar 9 a montante, deslocamento vertical, trajetória múltipla. ...	145
Figura 5.28 - Comparação pilar 9 a jusante, deslocamento vertical, trajetória múltipla.....	145
Figura 5.29 - Comparação média móvel para pilar 9 a montante, deslocamento vertical, trajetória múltipla	146
Figura 5.30 - Comparação média móvel para pilar 9 a jusante, deslocamento vertical, trajetória múltipla	146
Figura 5.31 - Comparação para pilar 9 a montante, deslocamento longitudinal, trajetória múltipla.....	147
Figura 5.32 - Comparação para pilar 9 a jusante, deslocamento longitudinal, trajetória múltipla.....	147
Figura 5.33 - Comparação para pilar 14 a montante, deslocamento vertical, trajetória múltipla	148
Figura 5.34 - Comparação para pilar 14 a montante, deslocamento longitudinal, trajetória múltipla.....	148
Figura 5.35 - Comparação para pilar 19 a jusante, deslocamento vertical, trajetória múltipla	149
Figura 5.36 - Comparação para pilar 19 a jusante, deslocamento vertical, trajetória múltipla	149
Figura 5.37 - Comparação para pilar 24 a montante, deslocamento vertical, trajetória múltipla	150
Figura 5.38 - Comparação para pilar 24 a montante, deslocamento longitudinal, trajetória múltipla.....	150
Figura 5.39 -Comparação para pilar 28 a jusante, deslocamento vertical, trajetória múltipla	151

Figura 5.40 - Comparação para pilar 28 a jusante, deslocamento longitudinal, trajetória múltipla.....	151
Figura 5.41 - Comparação para pilar 32 a montante, deslocamento vertical, trajetória múltipla	152
Figura 5.42 - Comparação para pilar 32 a montante, deslocamento vertical, trajetória múltipla	152
Figura 5.43 - Comparação para pilar 33 a jusante, deslocamento vertical, trajetória múltipla	153
Figura 5.44 - Comparação para pilar 33 a montante, deslocamento vertical, trajetória múltipla	153
Figura 5.45 -Comparação para pilar 33 a jusante, deslocamento longitudinal, trajetória múltipla.....	154
Figura 5.46 - Comparação para pilar 33 a montante, deslocamento longitudinal, trajetória múltipla.....	154
Figura 5.47 - Comparação para pilar 34 a jusante, deslocamento vertical, trajetória única ..	155
Figura 5.48 - Comparação para pilar 34 a montante, deslocamento vertical, trajetória única	155
Figura 5.49 - Comparação para pilar 34 a jusante, deslocamento longitudinal, trajetória única	156
Figura 5.50 - Comparação para pilar 34 a montante, deslocamento longitudinal, trajetória única	156
Figura 5.51 - Comparação para pilar 35 a jusante, deslocamento longitudinal, trajetória única	157
Figura 5.52 - Comparação para pilar 35 a montante, deslocamento vertical, trajetória única	157
Figura 5.53 - Comparação para pilar 35 a jusante, deslocamento longitudinal, trajetória única	158
Figura 5.54 -Comparação para pilar 35 a montante, deslocamento longitudinal, trajetória única	158
Figura 5.55 - Comparação para pilar 36 a jusante, deslocamento vertical, trajetória única ..	159
Figura 5.56 - Comparação para pilar 36 a jusante, deslocamento longitudinal, trajetória única	159
Figura 5.57 - Comparação para pilar 41 a jusante, deslocamento longitudinal, trajetória única	160
Figura 5.58 - Comparação para pilar 41 a jusante, deslocamento vertical, trajetória única ..	160

Figura 5.59 - Comparação para pilar 45 a montante, deslocamento longitudinal, trajetória única	161
Figura 5.60 - Comparação para pilar 45 a montante, deslocamento longitudinal, trajetória única	161
Figura 5.61 - Distribuição das diferenças entre estimativas e medições in situ para a ponte D. Luís.....	162
Figura 5.62 - Distribuição das diferenças entre estimativas e medições in situ para os pilares 9, 32, 36 da ponte D. Luís	164
Figura 5.63 - Esquema da Ponte da Asseca e respetivas posições dos alvos. Fonte: (Infraestruturas de Portugal, n.d.).....	165
Figura 5.64 - Resultados velocidade de deslocamento anual para várias referências na trajetória múltipla, ponte da Asseca	166
Figura 5.65 - Resultados velocidade de deslocamento anual para várias referências, na trajetória ascendente, ponte da Asseca	166
Figura 5.66 - Resultados velocidade de deslocamento anual para várias referências, na trajetória descendente, ponte da Asseca	167
Figura 5.67 - Comparação arco 4 a jusante, deslocamento vertical, trajetória múltipla.	168
Figura 5.68 - Comparação arco 4 a montante, deslocamento vertical, trajetória múltipla.....	168
Figura 5.69 - Comparação arco 4 a jusante, deslocamento longitudinal, trajetória múltipla.	169
Figura 5.70- Comparação arco 4 a montante, deslocamento longitudinal, trajetória múltipla.	169
Figura 5.71- Comparação arco 5 a jusante, deslocamento vertical, trajetória múltipla.	170
Figura 5.72 - Comparação arco 5 a montante, deslocamento vertical, trajetória múltipla.....	170
Figura 5.73 - Comparação arco 5 a jusante, deslocamento longitudinal, trajetória múltipla.	171
Figura 5.74 -- Comparação arco 5 a montante, deslocamento longitudinal, trajetória múltipla.	171
Figura 5.75 - Distribuição das diferenças entre estimativas e medições in situ para a ponte da Asseca.....	172
Figura 5.76 - Desvio padrão em LOS para ambas as trajetórias sobre a ponte da Asseca rodoviária (caso de estudo considerado) e sobre a ponte da Asseca ferroviária (próxima da anterior).	173
Figura 5.77 – Imagem radar da Ponte D. Luís, a – trajetória descendente, b – trajetória ascendente.	174

Figura 5.78 – Imagem radar da Ponte da Asseca, a – trajetória descendente, b – trajetória ascendente.	174
Figura 5.79 - Coerência dos pares interferométricos e datas correspondentes às medições in situ da ponte D. Luís	175
Figura 5.80 - Distribuição das diferenças entre estimativas verticais no topo e medições in situ para a ponte D. Luís	175

ANEXOS

Figura A.1 - Resultado passo 1 StaMPS - Ascendente – Sobre a Ponte da Asseca.....	A.4
Figura A.2 - Resultado passo 5 StaMPS - Ascendente – Sobre a Ponte da Asseca.....	A.4
Figura A.3 - Resultado passo 1 StaMPS - Ascendente – Sobre a Ponte D. Luís	A.5
Figura A.4 - Resultado passo 5 StaMPS - Ascendente – Sobre a Ponte D. Luís	A.5
Figura A.5 - Resultado passo 6 StaMPS - Ascendente – Sobre AOI	A.6
Figura A.6 - Resultado passo 8 StaMPS - Ascendente – Sobre AOI	A.6
Figura A.7 - Resultado passo 1 StaMPS - Descendente – Sobre a Ponte da Asseca.....	A.7
Figura A.8 - Resultado passo 5 StaMPS - Descendente – Sobre a Ponte da Asseca.....	A.7
Figura A.9 - Resultado passo 1 StaMPS - Descendente – Sobre a Ponte D Luís	A.8
Figura A.10 - Resultado passo 5 StaMPS - Descendente – Sobre a Ponte D. Luís	A.8
Figura A.11 - Resultado passo 6 StaMPS - Descendente – Sobre a AOI.....	A.9
Figura A.12 - Resultado passo 8 StaMPS - Descendente – Sobre a AOI.....	A.9

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 - Caracterização das bandas e aplicações. Adaptado de: (Earth Data Nasa, n.d.) ..	14
Tabela 2.2 - Comparação relativa da força por polarização. Fonte:(Meyer, 2019).....	18
Tabela 2.3- Lista de antigos, atuais e futuros sensores SAR. Fonte:(Meyer, 2019).....	26
Tabela 2.4 - Principais abordagens InSAR ao longo dos anos (Crosetto et al., 2016) e (Alam et al., 2022).....	43
Tabela 2.5 - Principais casos de estudo sobre uso de SAR em pontes. Adaptado de (Nettis et al., 2023).....	59

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 - Fontes de referência para abordagem PSI adotada com uso de imagens SLC Sentinel 1.....	67
---	----

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 - Valores para os parâmetros da monitorização sobre o quebra-mar	102
---	-----

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 - Resultado da ferramenta InSAR Stack para aquisições em trajetória ascendente	124
Tabela 5.2 - Resultado da ferramenta InSAR Stack para aquisições em trajetória descendente	125
Tabela 5.3 - Valores para os parâmetros da monitorização sobre as estruturas a estudar na área de Santarém.	130
Tabela 5.4 - Datas das aquisições (imagens SAR) de trajetória Descendente e respetivo ID	137
Tabela 5.5 - Datas das aquisições de trajetória Ascendente e respetivos ID's	138
Tabela 5.6 - Média das datas das trajetórias Ascendente e Descendente e respetivos ID's ...	138
Tabela 5.7 - Datas das medições in situ (as datas a laranja são exclusivas da Ponte da Asseca)	138
Tabela 5.8 - Comparação da elevação dos pontos com a elevação real da sua posição.....	163

ANEXOS

Tabela A.1 - Propriedades dos sensores SAR a bordo de satélites. Fonte:(Meyer, 2019).....	A.2
---	-----

LISTA DE ABREVIATURAS

AI - Artificial Intelligence

ANFIS - Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

AOE - Master atmosphere and orbit error (Erro de atmosfera e orbita da *master*)

AOI - Area Of Interest

BIM - Building Information Modeling

CE - Comissão Europeia

CNR-IREA - Institute for Electromagnetic Sensing of the Environment, Itália

DEM - Digital Elevation Model

DInSAR - Differential interferometric synthetic aperture radar (Interferometria Diferencial de Radar de Abertura Sintética)

DS - Distributed Scatterer (Difusores distribuídos)

DSM - Digital Surface Model

ESA - European Space Agency (Agência Espacial Europeia)

EO-SSO - Earth Observation Single Sign-On

EPN - EUREF Permanent Network

ERS - European Remote Sensing

EW - Extra-Wide swath

GEP - Geohazards Thematic Exploitation Platform

G-POD - Grid Processing on Demand

GRD - Ground Range Detected

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

IW - Interferometric Wide Swath

IP - Infraestruturas de Portugal

LOS - Line of Sight (linha de vista ou visão)

MDE - Modelo Digital de Elevação

MDS - Modelo Digital de Superfície

MDT - Modelo Digital de Terreno

MT-InSAR - Multi-Temporal satellite-based differential interferometry

NCN - The NOAA CORS Network

OCN - Ocean

OSW - Ocean Swell spectral

OWI - Ocean Wind field

P-SBAS - Parallel Small BAseline Subset

PS - Persistent Scatterer (Difusores Persistentes)

PSI - Persistent Scatterer Interferometry

QPS - Quasi Persistent Scatterer

RMSE - Root Mean Square Error

RNGAP - Nivelamento Geométrico de Alta Precisão

ROI_PAC - Repeat Orbit Interferometry PACkage

RUS - Research and User Support for Sentinel Core Products

RVL - Surface Radial Velocity

SAR - Synthetic Aperture Radar (Radar de Abertura Sintética)

SABRI - SATellite-based BRidge monitoring via Interferometry

SBAS - Small Baseline Subset (linha base pequena de subconjunto)

SCLA - Spatially-Correlated Look Angle (ângulo de vista espacialmente correlacionado)

SIG - Sistemas de Informação Geográfica

SLAR - Side-Looking Airborne Radars

SLC - Single Look Complex

SNAP - The Sentinel Application Platform

SNR - Signal-to-Noise Ratio (Razão Sinal-Ruído)

SPINUA - Stable Point INterferometry even over Un-urbanised Areas

SM - Stripmap

SULA - Spatially-Uncorrelated Look Angle (ângulo de vista espacialmente não correlacionado)

StaMPS - Stanford Method for Persistent Scatterers

TOPSAR - The Terrain Observation with Progressive Scans SAR

TRAIN - Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise

WV - Wave mode

VRD - Variable Resolution Raster

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

λ	Comprimento de onda
τ	Atraso entre transmissão e recepção de radiação
Φ	Fase da radiação
σ_A	Desvio padrão de uma série de valores de amplitude
μ_A	Média de uma série de valores de amplitude
$\Psi_{x,i}$	Fase enrolada
$\emptyset_{D,x,i}$	Mudança de fase devido ao movimento do pixel na direção da linha de vista
$\emptyset_{A,x,i}$	Fase devido à diferença no atraso atmosférico entre as passagens
$\Delta\emptyset_{S,x,i}$	Fase residual devido a imprecisões na órbita do satélite
$\Delta\emptyset_{\theta,x,i}$	Fase residual devido ao erro no ângulo de vista
$\emptyset_{N,x,i}$	Termo de ruído da fase desenrolada
γ_x	Nível do ruído de fase
$\tilde{\psi}_{x,i}$	Fase enrolada filtrada
$\Delta\hat{\emptyset}_{\theta,x,i}^{nc}$	Fase residual não correlacionada espacialmente devido ao erro do ângulo de vista
$\hat{D}_{A,x}$	Dispersão da amplitude dos pixels
γ^{thresh}	Pixels com γ_x acima de um determinado valor limite
$P_B(\gamma_x)$	Probabilidade de distribuição dos pixels com fase aleatória
Δr	Deslocamento do pixel alvo em LOS
α ou φ	Ângulo azimutal
θ	Ângulo de incidência
α	Orientação da ponte por (Jung et al., 2019)
Δx e Δy	Distância em x e y à posição real do pixel PS
ΔH	Altura topográfica
d_{asc}	Deslocamento LOS em ascendente
d_{des}	Deslocamento LOS em descendente
d_{lon}	Deslocamento longitudinal
d_{ver}	Deslocamento vertical
D_A	Valor que descreve a estabilidade da amplitude
N	O número de interferogramas
R	Distância
W	Operador de enrolamento

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

As pontes são infraestruturas importantes das redes de mobilidade, com um papel fundamental de suporte ao desenvolvimento económico e social das regiões onde se inserem. Para garantir a funcionalidade e a segurança de um parque de pontes é necessário promover o seu acompanhamento periódico e implementar as intervenções que se forem verificando necessárias ao longo do tempo. Dada a grande responsabilidade e os elevados custos envolvidos nessas intervenções, importa otimizar o processo de programação dos trabalhos a realizar ao longo do tempo e implementar medidas que permitam alertar atempadamente para as situações mais críticas (J. O. Almeida, 2013).

A gestão das principais pontes rodoviárias e ferroviárias portuguesas é feita pela Infraestruturas de Portugal de uma forma já bastante sistematizada. No entanto há várias outras pontes e obras de arte que estão sobre tutela municipal e que importa também acompanhar de forma periódica ao longo da sua vida em serviço, de forma a garantir a segurança de todos os que diariamente as utilizam ou passam por perto. Num inquérito realizado aos municípios portugueses em 2015 relativamente ao acompanhamento das suas obras de arte (M. Sousa, 2017; M. Sousa et al., 2016), cerca de 64% afirmaram não ter sequer registo das obras sob tutela. Outros 36% (26 municípios) indicaram ter um inventário, sendo importante referir que nove declararam ter esses dados registados em formato analógico (papel), sete em formato digital simples (como Excel ou Word), dois em base de dados alfanumérica e oito em base de dados geográfica. Além disso, 73% dos municípios participantes reconheceu que não realizava inspeções.

Há assim uma necessidade urgente em implementar instrumentos de gestão em parques de obras de arte recorrendo a ferramentas que auxiliem nas tarefas de inventariação e inspeção periódica desse tipo de estruturas, bem como no registo e organização de toda a informação associada, de forma que o seu processamento permita depois gerar relatórios de apoio à decisão.

As inspeções convencionais são demoradas e implicam muitos recursos associados a deslocações, mão-de-obra especializada e outros custos. Assim sendo, uma monitorização remota em grandes áreas, pode permitir estimar deslocamentos ao longo do tempo sem a necessidade de deslocação ao local, possibilitando a criação de sistemas de alerta e

evitando possíveis acidentes futuros. Essa vantagem poderá ser particularmente relevante no acompanhamento de estruturas envelhecidas e sujeitas a alterações climáticas.

Um dos objetivos principais inerentes à implementação de sistema de gestão de pontes é a prevenção de acidentes e a garantia de segurança nesse tipo de infraestruturas. As causas e mecanismos para falhas em pontes podem ser divididas em fenómenos naturais como terremotos, ventos, ciclones, erosão das fundações, deslizamentos de terra/cheias e em fatores humanos tais como erros de design e construção, sobrecargas, colisões, fogo e falta de inspeção ou manutenção (Reza Choudhury & Hasnat, 2015).

Com a monitorização remota, sobretudo por sensores a bordo de satélites, os acontecimentos/evoluções estão a ser registados de forma abrangente, mas não são correntemente analisados. No entanto, a análise destes registos tem potencial para ser aproveitada como gerador de alertas baseados num histórico de alterações geométricas ao nível de infraestruturas construídas, como as pontes.

Aliás, vários estudos foram publicados que mostram que alguns dos colapsos em pontes podiam ter sido previstos de forma abrangente e independente, uma vez que as alterações na estrutura estavam a ser registadas por deteção remota, concretamente por sensores radar:

- O colapso da ponte Entre-os-Rios em 2001 (J. J. Sousa & Bastos, 2013) que demonstrou um deslocamento máximo de 20mm/ano num período de 5 anos até ao colapso;
- Bakon *et al.*, (2014) mostraram a aceleração das deformações da ponte após a colisão de um rebocador na Old Bridge na Eslováquia;
- Selvakumaran *et al.*, (2018) mostraram deformações incomuns um mês antes do colapso parcial da ponte Tadcaster Bridge em England;
- A ponte Albiano Magra na Toscana, Itália, analisada em (Nettis *et al.*, 2023), onde se demonstrou deformações consideradas pelo autor como classe média-alta e identificação de deslizamento de terras como possível causa do colapso;
- Também Nettis *et al.*, (2023) demonstraram deformações médias-altas (superiores a 7.5 mm/ano) no vão colapsado da ponte Fossano em Piemonte, Itália;
- Polcevera Viaduct em Genoa por Milillo *et al.*, (2019), onde é revelada que as deformações ao longo de 15 anos tinham uma magnitude crescente até ao colapso;

- Himera viaduct em Sicily, Itália, por Macchiarulo *et al.*, (2022), onde são identificadas movimentações típicas de deslizamento de terras de 2011 a 2014 até ao deslizamento de 2015 que provocou o colapso parcial do viaduto.

1.2. Sistemas de gestão de obras de arte

A gestão de obras de arte como as pontes deve ser efetuada de forma sistemática e procurando garantir a segurança e otimização dos recursos. Para o efeito recomenda-se a utilização de um sistema de gestão. Um Sistema de Gestão de Pontes é uma ferramenta de apoio à decisão que permite planejar as intervenções num parque de obras de arte a curto e longo prazo (Cruz, 2006; FHWA, 2010). Podem ser adotados diversos modelos para o Sistema de Gestão de Pontes, com base em softwares comerciais ou noutros especificamente desenvolvidos para uma determinada entidade com responsabilidade na gestão desse tipo de obras de arte. Neste ponto será feita uma breve referência comparativa a alguns softwares de gestão de obras. Aliás, os Sistemas de Gestão de Pontes têm vindo a ser desenvolvidos em vários países de forma bastante distinta, com metodologias e competências bastante diversificadas (Adey et al., 2010; J. M. M. R. M. de O. Almeida, 2003; Alonso, 2006; Austroads, 2002; Bien et al., 2007; Casas & Bien, 2007; Godart & Vassie, 2001; Klinghoffer et al., 2002; Poças, 2009; Ryall, 2001; Woodward et al., 2001).

A título de exemplo, pode apresentar-se o sistema de gestão proposto em (J. O. Almeida, 2013; J. O. Almeida et al., 2015) que envolve um modelo de previsão da degradação de pontes, um modelo de estimativa dos seus custos de ciclo de vida e um processo de otimização dos custos de ciclo de vida para determinação das intervenções que devem ir sendo implementadas em cada uma das pontes ao longo do tempo, como base no esquema que se apresenta na Figura 1.1. Para a previsão da degradação esse sistema de gestão de pontes usa modelos probabilísticos baseados em Matrizes de Markov estacionários e não-estacionários. O indicador de degradação considerado é o estado de condição global, com uma escala classificativa de 5 níveis. Na estimativa dos custos de ciclo de vida, são considerados parâmetros de custos diretos de intervenções em pontes, bem como indicadores relativos à sua duração, de forma a poder estimar também os respetivos custos indiretos.

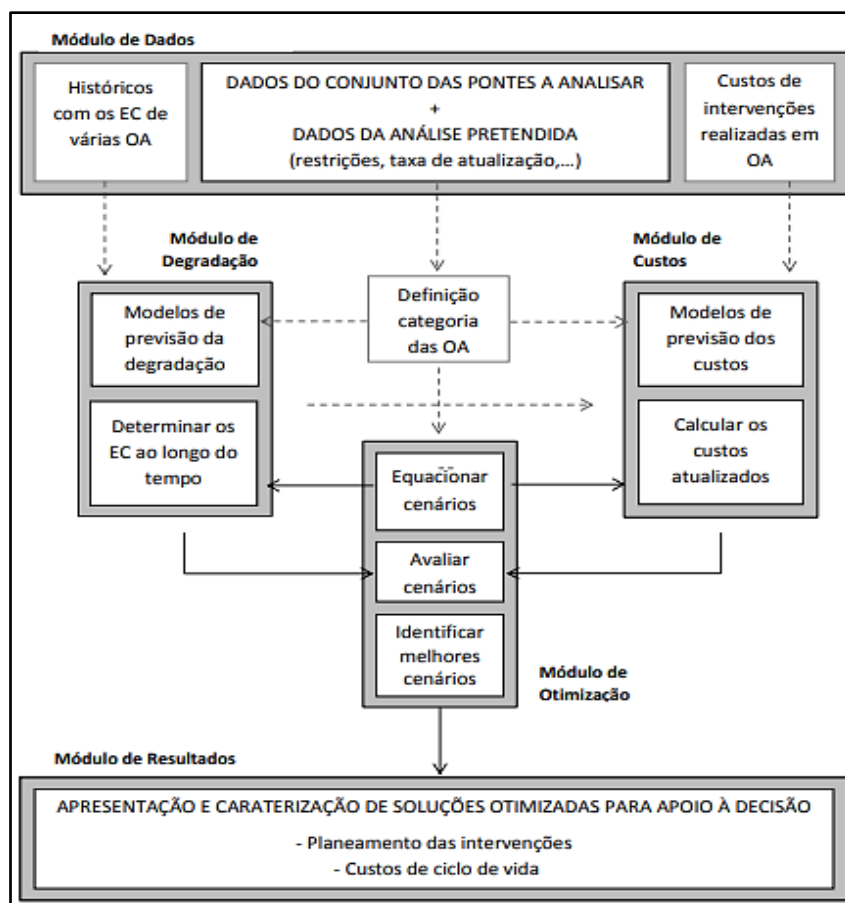


Figura 1.1 - Esquema de funcionamento do programa de gestão de pontes (J. O. Almeida, 2013)

Os dados relativos ao estado das pontes são recolhidos em inspeções regulares ou extraordinárias, com base na avaliação de peritos, eventualmente tendo por base ensaios não destrutivos e dados de monitorização. Porém, as inspeções convencionais são demoradas e implicam muitos recursos associados a deslocações, meios de acesso e mão-de-obra especializada.

Como existem satélites a captar sistematicamente informação da superfície terrestre há interesse em usar essa informação para fazer uma monitorização remota das pontes, minimizar a necessidade de inspeções convencionais e criar alertas úteis para a gestão desse tipo de obras de arte.

O processamento de dados SAR pode ser computacionalmente intensivo, as imagens radar de maiores resoluções podem ser dispendiosas e o uso de certas técnicas pode estar sujeito a condições de patentes. Esse problema pode ser mitigado recorrendo ao uso de plataformas comerciais de processamento de dados SAR (GAMMA, n.d.; Rheticus, n.d.; Tre Altamira, n.d.). Um arranjo entre estas diferentes abordagens permite aumentar o peso

da monitorização por deslocamentos num sistema de gestão e por consequência um apoio à decisão mais informado em relação à segurança e manutenção.

As plataformas comerciais de processamento de dados SAR, usadas como complemento de sistemas de gestão de pontes, tais como Gamma-rs (gamma-rs.ch), Rheticus (rheticus.eu), Tre Altamira (site.tre-altamira.com), são fornecedores de bases de dados e serviços baseados em medições InSAR¹ - *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (Interferometria de Radar de Abertura Sintética) a partir de imagens radar de vários instrumentos como o Sentinel-1.

Além das opções comerciais, tem surgido alguns estudos interessantes sobre criação de sistemas de gestão para pontes com base em InSAR (Bianchini Ciampoli et al., 2019; Nettis et al., 2023; Qin et al., 2019) em combinação com outras tecnologias focadas na automatização da introdução e preparação de dados SAR, das análises InSAR em si, da visualização e da implementação de classes de deformação, como por exemplo os Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Um desses estudos é a *Monitorização automática de portefólio de pontes por meio da integração de catálogos InSAR e SIG* de (Bianchini Ciampoli et al., 2019) onde é realizada uma análise InSAR nomeadamente uma abordagem PSI² - *Persistent Scatterer Interferometry* sobre as estruturas identificadas produzindo um conjunto de dados PS³ - *Persistent Scatterers* (Difusores Persistentes) com os respetivos deslocamentos.

Outro estudo por Nettis et al. (2023) apresenta uma metodologia de nome *SAtellite-based BRidge monitoring via Interferometry* (SABRI) para a monitorização em grande escala de pontes. É feita uma combinação entre a abordagem PSI e SBAS⁴ - *Small Baseline Subset* e depois implementada uma cadeia de geoprocessamento para uma interpretação automática de cenários de deformações em pontes, com a atribuição de classes de prioridade de monitorização e avaliação.

Em (Qin et al., 2019) é demonstrado o uso da tecnologia InSAR em pontes de estrutura mais complexa, onde também combina PSI com SBAS com o objetivo final de classificar deformações.

¹ Medição da fase do sinal de radar entre duas imagens e conversão em deslocamento. Mais em 2.2.

² Abordagem InSAR que procura por difusores persistentes

³ Objetos na superfície responsáveis por reflexão consistente do sinal

⁴ Abordagem InSAR que procura por difusores distribuidores

1.3. Principais objetivos

A presente dissertação pretende apresentar uma análise automatizada de detecção de alterações em pontes existentes, com recursos a ferramentas de análise de dados de detecção remota, sobretudo dados de radar, com vista à sua integração na gestão de parques de obras de arte. Serão desenvolvidas e testadas funcionalidades informáticas com utilidade no âmbito da inspeção regular de pontes e de outros tipos de estruturas, de forma a preparar ferramentas de detecção remota de alterações em pontes ao longo do tempo, que possam apoiar a gestão desse e de outros tipos de estruturas. Os instrumentos propostos serão validados por comparação dos resultados obtidos com a metodologia desenvolvida, com os obtidos com outros meios topográficos para algumas estruturas que serão consideradas como casos de estudo.

Os objetivos mais específicos relacionados com a evolução deste trabalho são:

1. Pesquisa bibliográfica sobre diferentes tipos de gestão de obras de arte, sobretudo sistemas de gestão de obras de arte que tem por base a análise de dados provenientes de radares de abertura sintética.
2. Agregação e implementação de procedimentos com o intuito de chegar a um output que represente deslocamentos em obras de arte, que se pode dividir em:
 - a. Uso de software gratuito para preparar imagens radar e efetuar a interferometria;
 - b. Estudo de metodologias que possibilitem o tratamento da grande quantidade de dados de radar registados, para cálculo de deslocamentos de pontos da superfície terrestre;
 - c. Integração em Sistemas de Gestão Geográfica (SIG) para análise de deslocamentos calculados para diferentes zonas de uma estrutura.
3. Teste dessa metodologia através da sua aplicação em casos de estudo de estruturas reais e análise crítica dos resultados, com base na sua comparação com dados obtidos com levantamentos topográficos tradicionais realizados *in situ*.

1.4. Estrutura da dissertação

Depois do primeiro capítulo de introdução ao tema da dissertação, o Capítulo 2 apresenta os principais conceitos teóricos dos fatores a ter em conta sobre os radares de abertura sintética e a consequente interferometria. Neste capítulo é também apresentado o estado da arte associado a tecnologias de radar de abertura sintética (SAR), apresentando os algoritmos mais usados atualmente. É também neste capítulo que são apresentados os softwares de processamento de imagens radar satélite e é feita uma retrospectiva das aplicações InSAR, na generalidade e mais especificamente em pontes. O Capítulo faz ainda uma introdução à missão do satélite Sentinel 1A, do programa Copernicus executado pela Agência Espacial Europeia, cujo produtos são essenciais para o desenvolvimento não só deste trabalho, mas globalmente, visto ser uma opção incontornável nas aplicações SAR. O capítulo acaba com a aplicabilidade desta tecnologia em pontes, apresentando alguns exemplos com o uso de imagens do satélite escolhido e uma visão geral do uso de Inteligência Artificial (AI - *Artificial Intelligence*) nas abordagens apresentadas.

O Capítulo 3 descreve a metodologia adotada para determinação remota de deslocamentos em estruturas, desde a obtenção das imagens radar até obtenção dos valores de deslocamentos das estruturas nos casos de estudo. A cadeia de processos é explicada em 4 partes – a escolha de dados, o pré processamento com o uso de scripts *snap2stamps* com dependência do software SNAP, a análise *Stanford Method for Persistent Scatterers* (StaMPS)⁵ e o pós-processamento no ambiente SIG onde é criado um *Assistente de Analise* em python.

O Capítulo 4 apresenta os resultados da aplicação da metodologia a um Quebra-mar na foz do rio Douro. Esse primeiro caso de estudo serviu sobretudo como experimentação da implementação e funcionamento das cadeias de processos propostas na metodologia.

Para ir ao encontro das questões referidas nos objetivos, o Capítulo 5 apresenta os resultados da aplicação da metodologia a duas pontes rodoviárias da Infraestruturas de Portugal, localizadas em Santarém. Nesse segundo estudo é feita uma análise crítica dos resultados das estimativas de deslocamentos de pontos das pontes obtidas com a

⁵ Técnica PSI usada, baseada sobretudo em limpeza da fase.

metodologia, por comparação com dados de levantamentos feitos *in situ* com metodologias tradicionais.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões dos estudos realizados. É também um capítulo onde se dá espaço a intenções futuras.

Nos anexos é possível encontrar alguns elementos complementares, como exemplos de código desenvolvido para processamento dos dados e algumas imagens extraídas de passos intermédios da análise do StaMPS.

CAPÍTULO 2 - TECNOLOGIAS DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR)

2.1. Radares de abertura sintética (SAR) - principais conceitos

Um radar de abertura sintética (SAR) é um processo que permite criar imagens com base em ondas rádio. Consiste num sensor ativo que primeiro transmite sinais de micro-ondas e depois recebe de volta os sinais que são refletidos ou retrodifundidos pelos elementos na superfície terrestre. Após o radar enviar um pulso eletromagnético em direção à superfície terrestre, os objetos atingidos refletem-na (objeto refletor). Essa reflexão é denominada de retrodifusão representado na Figura 2.1.

Após receber a energia retrodifundida, o sensor analisa a diferença do tempo de emissão e recepção do pulso e alterações no sinal, nomeadamente a fase, a amplitude e polarização. As alterações ao sinal são, sobretudo, características do objeto refletor uma vez que a radiação micro-ondas é pouco afetada pela dispersão atmosférica e independente de luz solar (Sutcliffe et al., 2016)(Roque et al., 2016)(Alaska Satellite Facility, n.d.-a).

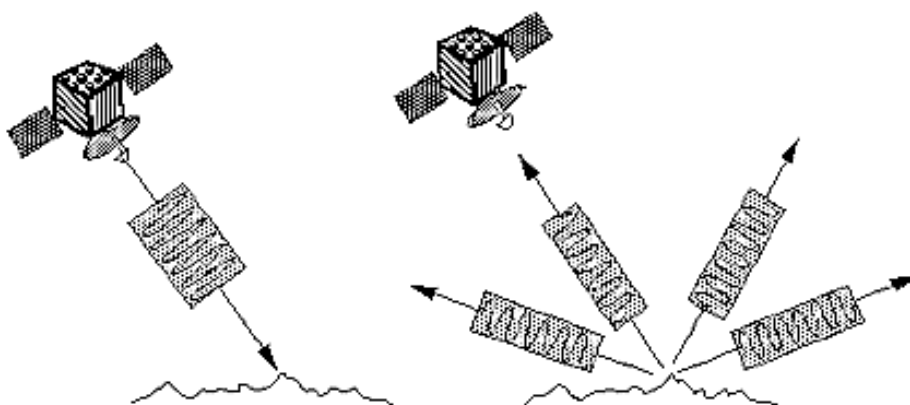


Figura 2.1 - Esquematização dos ecos recebidos de volta pela antena. Fonte:(ESA, 2007)

2.1.1. Sistemas SLAR (Side-Looking Airborn Radars)

Os radares usados para detecção remota de terreno, como é o caso do SAR, são maioritariamente sistemas de visão lateral (SLAR - *Side-Looking Airborne Radars*), ao contrário da maioria dos instrumentos óticos que são de visão nadir, ou seja, visão diretamente abaixo da observação. Essa diferença existe porque os instrumentos óticos são capazes de distinguir alvos com base na distância angular em relação ao sensor enquanto, um radar só pode distinguir os retornos de vários alvos com base no tempo de chegada dos sinais recebidos.

Tendo em conta a Figura 2.2, um radar de visão nadir não poderia distinguir entre dois difusores a e b que estão à mesma distância do sensor porque uma única onda incidente ilumina ambos os pontos ao mesmo tempo, e como consequência os retornos dispersos de ambos os pontos chegam à antena recetora simultaneamente.

Se a iluminação do radar for restrita a um lado da plataforma, a onda incidente atinge os mesmos dois pontos em momentos diferentes e assim, os retornos correspondentes chegam ao sensor em tempos diferentes, portanto, podem ser distinguíveis entre si (CSR, n.d.).

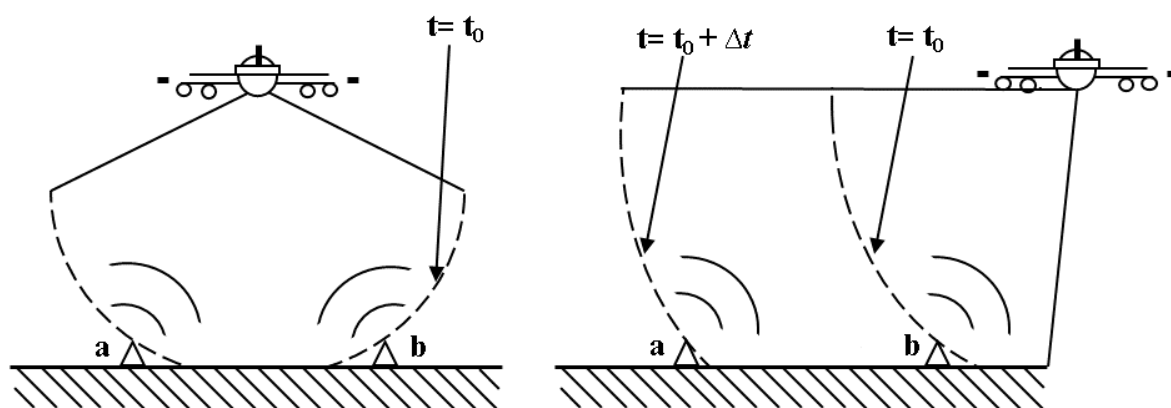


Figura 2.2 - Representação da ambiguidade do radar nadir à esquerda e solução em lateral à direita. Fonte: (CSR, n.d.)

2.1.2. Abertura Sintética

Nos radares de abertura real a imagem é construída a partir de sinais no qual os objetos refletores são colocados de acordo com a distância ao radar (em alcance) e de acordo com a posição da antena ao longo da trajetória (em azimuth). Isto é, a resolução em azimuth está sujeita à iluminação do solo pelo feixe que se move a uma velocidade igual à velocidade da plataforma que transporta o radar (Brown, 2020).

Para mitigar efeitos não desejados da abertura sintética quanto à pobre resolução em azimuth, é possível sintetizar a abertura. Quanto mais estreito for o feixe de radiação emitido que depende do comprimento da antena, maior será a resolução em azimuth. Um feixe estreito só é conseguido com antenas muito compridas, capazes de focar a radiação (Sutcliffe et al., 2016). No entanto, no espaço as antenas não são grandes. Portanto, o movimento dos radares é usado, juntamente com técnicas avançadas de processamento de sinal, para simular uma antena maior (Alaska Satellite Facility, n.d.).

A resolução espacial dos dados do radar está diretamente relacionada com a razão entre o comprimento de onda do sensor e o comprimento da antena do sensor. Para um dado comprimento de onda, quanto maior a antena, maior será a resolução espacial.

Um satélite radar para obter uma resolução espacial de 10m com um comprimento de onda de cerca de 5 cm, precisaria de uma antena de radar com cerca de 4.250 m de comprimento. O uso de uma sequência de aquisições da antena combinadas simula uma antena maior, proporcionando dados de melhor resolução, conforme esquematizado na Figura 2.3 (Earth

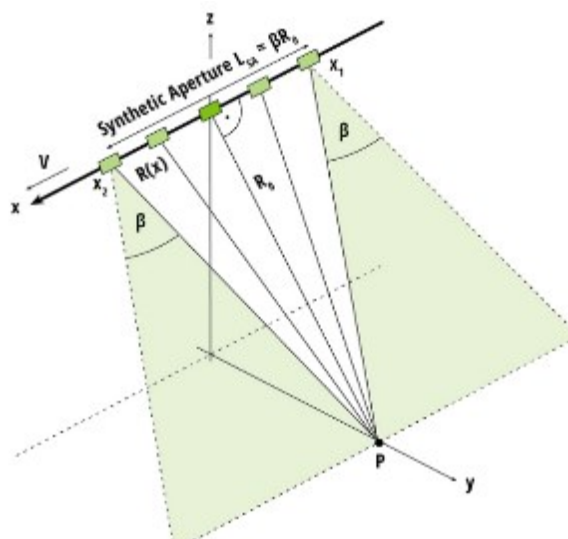


Figura 2.3 - Geometria das observações usadas para formar a abertura sintética. Fonte: (Meyer, 2019)

Data Nasa, n.d.).

Nessa figura é possível observar que várias posições da antena iluminam o objeto P à medida que o sensor se desloca do ponto x_1 (primeira vez que o objeto P é visto) até ao ponto x_2 (última vez que P é observado). Após esta configuração de aquisição dos dados é aplicada uma abordagem de pós-processamento para combinar todas as aquisições entre

x_1 e x_2 num único conjunto de dados simulando assim uma antena mais longa (Meyer, 2019).

O pós-processamento segue-se ao envio dos dados para as estações na terra, onde é combinada a informação de muitos pulsos recebidos no espaço do comprimento da antena sintética.

2.1.3. Frequência e Comprimento de onda

Uma onda eletromagnética é definida pela sua amplitude, comprimento de onda, fase e polarização. Sensores de radar utilizam comprimentos de onda mais longos na escala de centímetros a metros no espectro eletromagnético, o que lhes confere propriedades especiais, como a capacidade de ver através de nuvens. O comprimento de onda é uma característica importante a considerar ao trabalhar com SAR, pois determina como o sinal de radar interage com a superfície e a profundidade que o sinal pode atingir num meio.

Os diferentes comprimentos de onda do SAR são frequentemente referidos como bandas, com designações de letras, como X, C, L e P. A Tabela 2.1 apresenta as bandas com a frequência associada, o comprimento de onda e a aplicação típica associadas a cada uma delas (Earth Data Nasa, n.d.).

Tabela 2.1 - Caracterização das bandas e aplicações. Adaptado de: (Earth Data Nasa, n.d.)

Banda	Frequência	Comprimento de onda	Aplicação típica
Ka	27–40 GHz	1.1–0.8 cm	Raramente usado para SAR (vigilância de aeroportos)
K	18–27 GHz	1.7–1.1 cm	Raramente usado (absorção de H ₂ O)
Ku	12–18 GHz	2.4–1.7 cm	Raramente usado para SAR (altimetria por satélite)
X	8–12 GHz	3.8–2.4 cm	SAR de alta resolução (monitorização urbana; gelo e neve, com pouca penetração na cobertura vegetal; rápida degradação da coerência em áreas vegetadas)
C	4–8 GHz	7.5–3.8 cm	SAR Padrão (mapeamento global; deteção de mudanças; monitorização de áreas com penetração baixa a moderada; maior coerência); gelo, navegação oceânica marítima
S	2–4 GHz	15–7.5 cm	Uso limitado, mas crescente, para observação da Terra com base em SAR; monitorização da agricultura

			(NISAR terá um canal na faixa S; expande aplicações na faixa C para maior densidade de vegetação)
L	1–2 GHz	30–15 cm	SAR de resolução média (monitorização geofísica; mapeamento de biomassa e vegetação; alta penetração, InSAR)
P	0.3–1 GHz	100–30 cm	Biomassa. O primeiro SAR da faixa P a ser lançado no espaço será por volta de 2024; mapeamento e avaliação de vegetação. SAR experimental.

Na Figura 2.4 é possível perceber de forma geral a influência do comprimento de onda do sensor (λ) na penetração do sinal em vários tipos de superfícies. Os sinais de radar penetram mais profundamente à medida que o comprimento de onda do sensor aumenta. Isso está relacionado com a dependência da constante dielétrica e com o comprimento de onda incidente, permitindo uma maior penetração na faixa L em comparação com as faixas C ou X. Para áreas com vegetação, isso implica que os sensores SAR da faixa X, na maioria das vezes, dispersam na parte superior das copas das árvores, enquanto os sinais da faixa C e L penetram cada vez mais na massa vegetal.

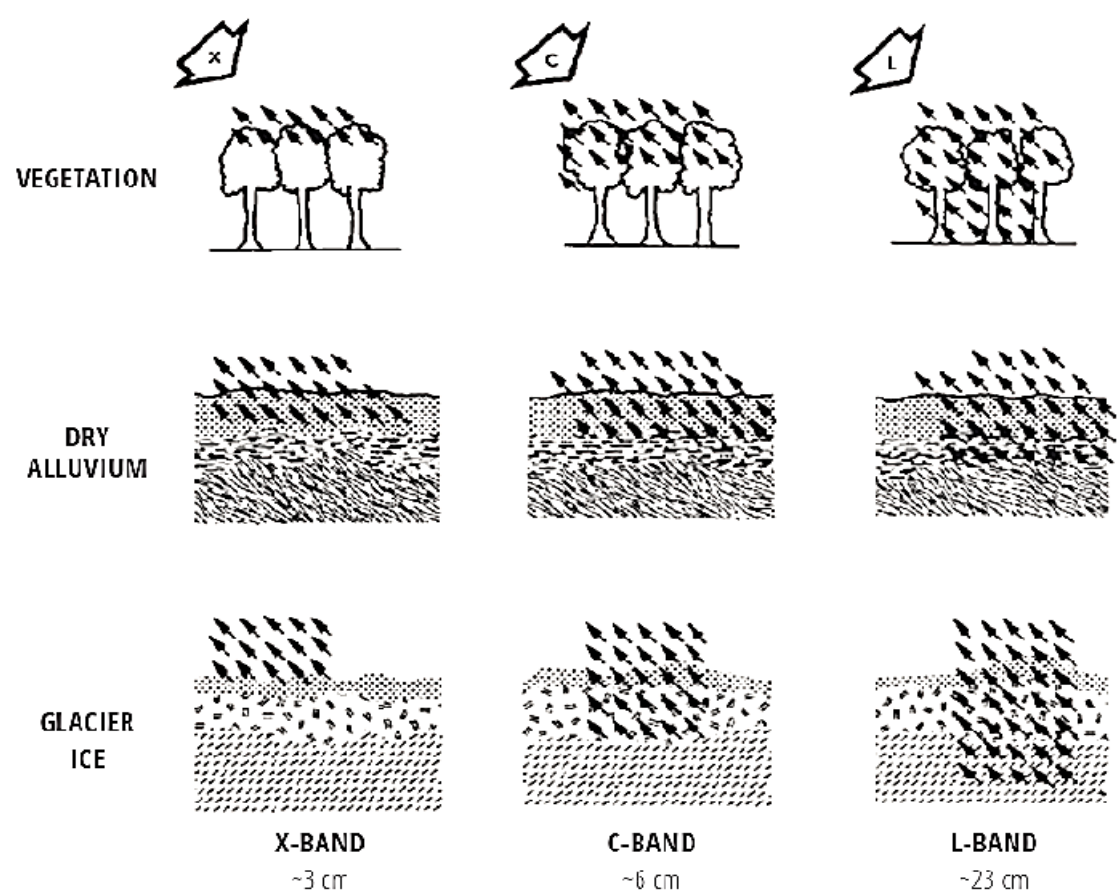


Figura 2.4 - Penetração do sinal SAR pelo comprimento de onda do sensor. Fonte: (Meyer, 2019)

2.1.4. Fase e amplitude

A fase é uma propriedade de um fenómeno periódico (onda eletromagnética) em relação a uma origem arbitrária. É expressa em graus ou radianos. A amplitude é uma medida da intensidade de um sinal, neste contexto, a altura da onda eletromagnética (Cigna & Tapete, 2019).

As imagens SAR contem uma medição da amplitude da radiação retrodifundida em direção ao radar pelos alvos contidos em cada célula de resolução. Indica a quantidade de sinal enviado que retorna ao sensor. Essa amplitude depende mais da rugosidade do que da composição química dos difusores no terreno. Tipicamente, rochas expostas e áreas urbanas mostram amplitudes fortes, enquanto superfícies planas e suaves (como bacias de água calma) exibem amplitudes baixas, uma vez que a radiação é principalmente refletida para longe do radar (ESA, 2007).

Difusores a diferentes distâncias do radar (distâncias oblíquas) são responsáveis por diferentes atrasos entre a transmissão e recepção da radiação. Devido à natureza quase puramente sinusoidal do sinal transmitido, o atraso (τ) é equivalente a uma mudança de fase (Φ) entre o sinal transmitido e recebido ilustrado na Figura 2.5. Pontos com a mesma cor (preto, vermelho, azul ou verde) correspondem a um valor de mudança de fase entre 0 e 2π (Ferretti et al., 2007).

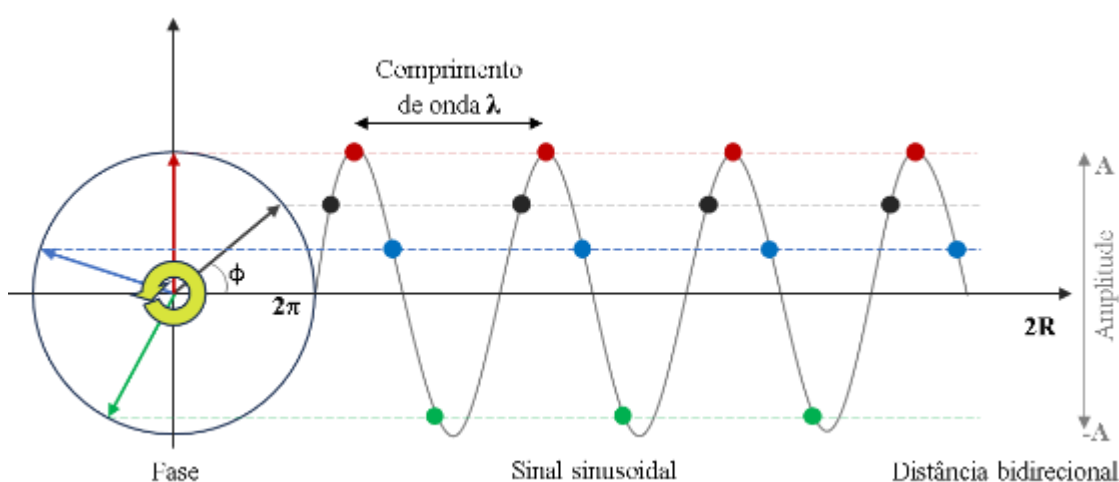


Figura 2.5 - Onda de radar representada como uma função senoidal com período de 2π radianos. Fonte: adaptado de(Ferretti et al., 2007)

Assim a mudança de fase é proporcional à distância bidirecional ($2R$) da radiação dividida pelo comprimento de onda (λ), conforme indicado na Equação 2.1.

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2R = \frac{4\pi}{\lambda} R$$

Equação 2.1- Relação entre fase da radiação Φ com a distância R . Fonte: (Ferretti et al., 2007)

A fase da onda descreve em que parte do ciclo a onda se encontra e, por definição, é igual ao ângulo ϕ . É uma medida apenas da fração final da distância de viagem de ida e volta que é menor que o comprimento de onda transmitido. Isto ocorre porque, na natureza periódica do sinal, distâncias de viagem que diferem por um múltiplo inteiro do comprimento de onda introduzem exatamente a mesma mudança de fase. Se a diferença na distância percorrida for um múltiplo inteiro do comprimento de onda isso significa que a onda refletida estará em fase com a onda original. Isso ocorre porque esses múltiplos inteiros correspondem a ciclos completos da onda, e, portanto, a fase da onda não mudará (Ferretti et al., 2007).

2.1.5. Polarização e mecanismos de retrodifusão

Relativamente ao comprimento de onda, os SAR produzem a própria radiação eletromagnética. Os sinais podem ser transmitidos e/ou recebidos em diferentes modos de polarização. Sendo as ondas eletromagnéticas, as micro-ondas são transversas, ou seja, as vibrações são perpendiculares à direção da propagação da onda. Para um radar, as ondas são tipicamente polarizadas num plano, ou horizontais ou verticais, embora seja possível que as ondas não estejam restritas a um plano (ESA, 2007).

O sinal pode ser transmitido pelo sensor em várias polarizações: num plano vertical (V) ou horizontal (H), respetivamente, plano paralelo ou perpendicular ao plano de incidência. Podem ser recebidos 4 tipos distintos de ecos: HH, HV, VH e VV, em que a primeira letra se refere ao tipo de polarização emitida e a segunda à polarização recebida, como esquematizado na Figura 2.6 (Sutcliffe et al., 2016).

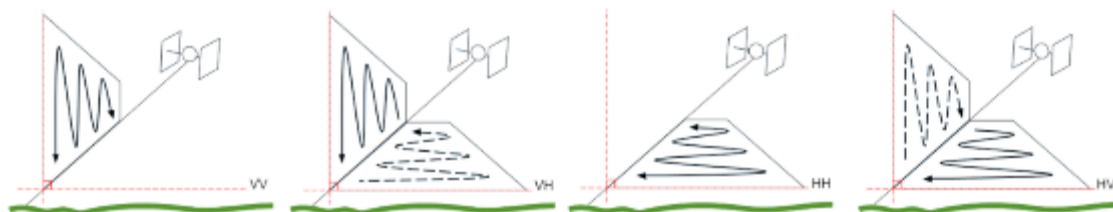


Figura 2.6 - Esquema das polarizações SAR. Fonte: (Alaska Satellite Facility, n.d.)

Quando a polarização recebida é a mesma que a transmitida, a imagem está polarizada da mesma forma. Quando a polarização recebida é oposta à transmitida a imagem diz-se de polarização cruzada e significa que há múltipla difusão pelo alvo, pelo que resulta num retrodifusor mais fraco que a polarização igual. A reflexão das ondas por um objeto depende da relação entre a polarização e a estrutura geométrica desse objeto (ESA, 2007). Examinar a intensidade do sinal de diferentes polarizações permite obter informações sobre a estrutura da superfície mapeada, representados na figura seguinte (Figura 2.7).

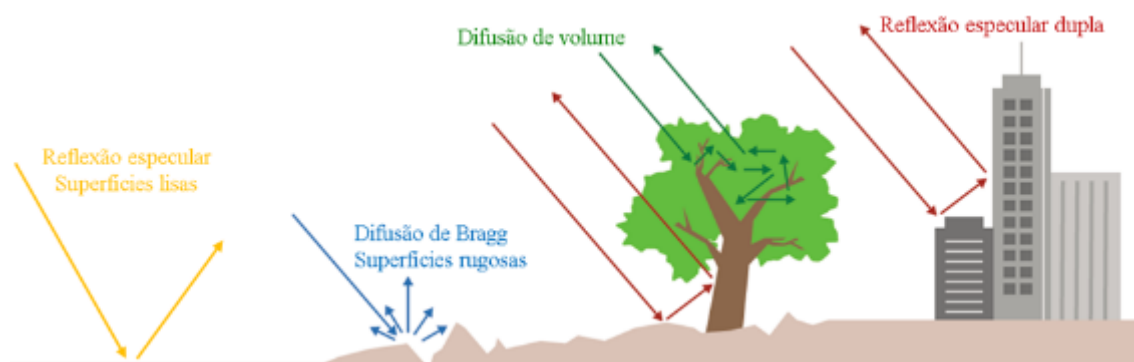


Figura 2.7 - Esquema dos principais tipos de difusores a considerar em análise SAR. Fonte: adaptado de (Meyer, 2019):

Na Figura 2.7, a categoria dos difusores de superfície é composta por campos de baixa vegetação, solos nus, estradas e outras superfícies pavimentadas. As superfícies rugosas são aquelas que tem desvios de altura maiores que a metade do comprimento de onda (Rees, 2013). As copas das árvores pertencem aos difusores de volume pois os sinais sofrem reflexão especular múltipla à medida que se propaga pela estrutura da vegetação. Difusores especulares duplos (refletores de canto) incluem edifícios, troncos de arvores, postes de iluminação e outras estruturas verticais que desviam uma primeira reflexão inicial de volta ao sensor.

Uma forte difusão na polarização HH indica uma predominância de uma reflexão especular dupla (por exemplo, vegetação densa, estruturas artificiais), enquanto que uma forte difusão na polarização VV está relacionada com reflexão de superfícies rugosas. Variações espaciais na polarização dupla indicam a distribuição de difusores de volume.

As regras gerais para comparação relativa da força de um difusor são apresentadas na Tabela 2.2 (Meyer, 2019).

Tabela 2.2 - Comparação relativa da força por polarização. Fonte: (Meyer, 2019)

Força relativa do difusor por polarização S

Reflexão em superfícies rugosas	$ S_{VV} > S_{HH} > S_{HV} $ ou $ S_{VH} $
Reflexão especular dupla	$ S_{HH} > S_{VV} > S_{HV} $ ou $ S_{VH} $
Difusão de volume	Principal fonte de $ S_{HV} $ e $ S_{VH} $

2.1.6. Geometria de um radar

Geralmente, a antena de um radar possui um feixe em forma de leque que ilumina uma área altamente alongada e com forma elíptica na superfície, como mostrado na Figura 2.8. A área iluminada no sentido transversal geralmente define a faixa de imagem (swath).

Dentro do feixe de iluminação o radar transmite uma sequência de pulsos curtos de micro-ondas cada um dos quais ilumina uma área instantânea no solo que é geralmente referida como a pegada da antena. O tamanho dessa pegada instantânea, seja na direção de alcance ou na direção ao longo da trajetória (azimute), é definido pela relação entre o comprimento de onda do sistema e o comprimento lateral da antena, bem como pela distância do sensor em relação ao solo R . Assim, a largura na direção ao longo da trajetória de cada faixa de alcance é igual à pegada da antena ao longo da trajetória (Meyer, 2019; Zyl & Kim, 2010).

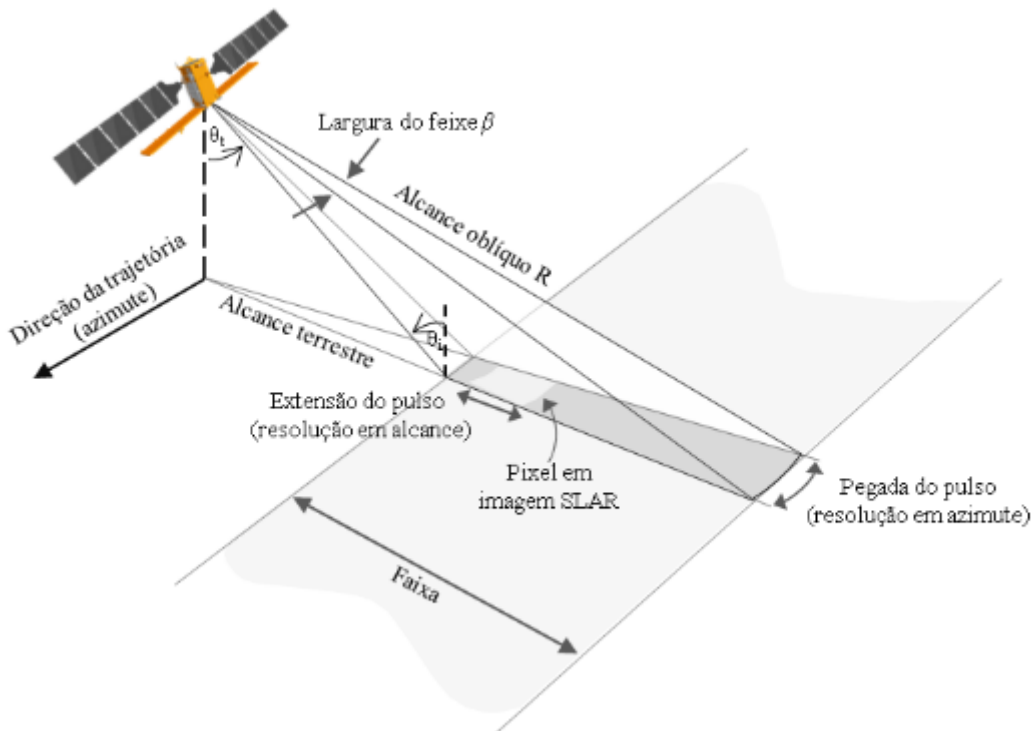


Figura 2.8 - Geometria de um radar em SLAR. Fonte: adaptado de (Meyer, 2019)

Os ecos da superfície recebidos são categorizados pelo tempo de chegada em direção da largura da faixa (alcance) e azimuth. Em direção do alcance os ecos da superfície chegam progressivamente mais tarde, da mais próxima coordenada transversal à mais distante. Na direção ao longo da trajetória (ou azimuth), o varrimento do solo é feita pelo movimento do radar ao longo da sua trajetória. Estão assim criadas as fronteiras que dão origem ao pixel cuja resolução se refere em detalhe em 2.1.7 (Meyer, 2019; Zyl & Kim, 2010).

Também é importante observar que existem dois significados diferentes para o termo "alcance" em imagens de radar. O primeiro é o chamado "alcance oblíquo" (*slant range*) e refere-se ao alcance ao longo da linha de visão do radar, entre o sensor e o difusor. O segundo uso do termo "alcance" refere-se ao "alcance terrestre", que se refere ao alcance ao longo de uma superfície lisa (o solo) até aos difusores. O alcance terrestre é medido a partir do nadir, que representa o ponto projetado na superfície exatamente na vertical do ponto em que se encontra o radar.

Na Figura 2.9 observa-se os ângulos mais comuns a ter em consideração em análises de imagens radar. O ângulo de vista é definido como o ângulo entre a direção vertical e o feixe de radar na plataforma de radar. O ângulo de incidência é definido como o ângulo entre a direção vertical e o vetor de propagação da onda de radar na superfície. Quando os efeitos da curvatura da superfície são negligenciados, o ângulo de vista é igual ao ângulo de incidência na superfície quando esta é plana (Zyl & Kim, 2010).

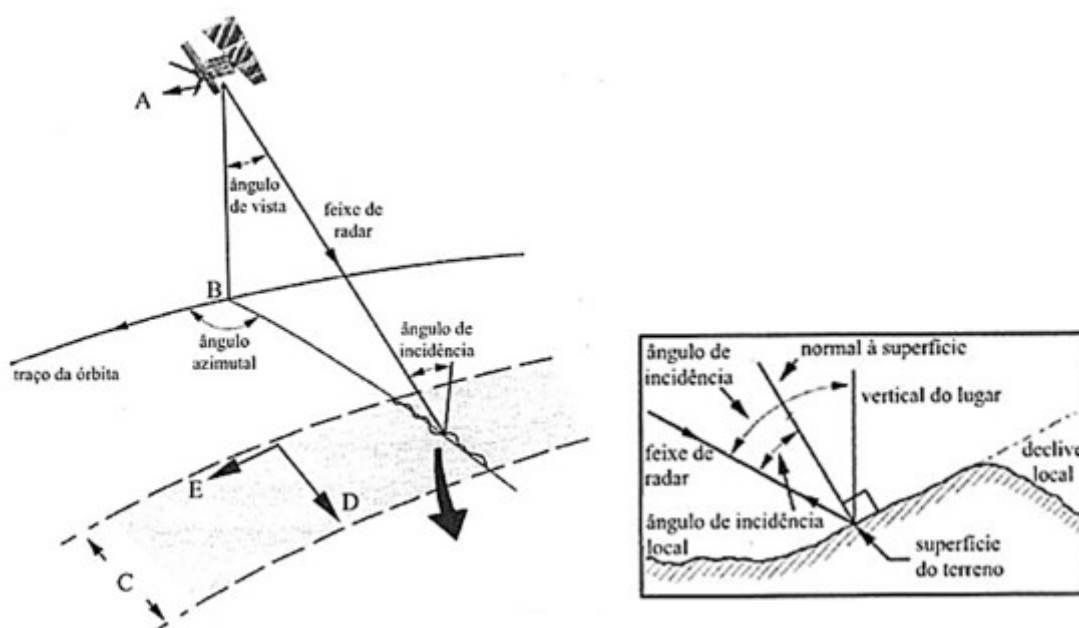


Figura 2.9 - Ângulos da geometria de um radar. Fonte: (Roque et al., 2016)

Linha de vista (LOS – *Line Of Sight*) é uma linha imaginária entre o sensor e o alvo, correspondente ao caminho direto de um transmissor para o receptor (*Line-of-Sight Propagation*, n.d.), representada pela linha do feixe de radar na Figura 2.9.

2.1.7. Resolução SAR

No caso de sistemas SLAR a resolução de azimute (a capacidade de discriminar objetos na direção do azimute) é definida pela largura da pegada da antena no azimute (Figura 2.8) que, por sua vez, é limitada pelo comprimento lateral da antena nessa direção e assim, será maior quanto mais estreito for o feixe de radiação emitido e por isso a necessidade de simular uma antena maior (Meyer, 2019; Zyl & Kim, 2010).

A resolução de azimute diminui linearmente com o aumento da distância entre o sensor e o solo R (Figura 2.8), isto é, da coordenada transversal mais próxima à mais distante a resolução de azimute não é constante no alcance. A dependência da distância ao solo pela resolução em azimute torna as aplicações SLAR em grandes altitudes não praticáveis (Meyer, 2019).

A resolução na direção de alcance depende da precisão com que o sensor consegue medir o tempo entre a emissão do pulso e a recepção do seu eco. A precisão é maior, quanto menor for o pulso emitido (Sutcliffe et al., 2016). Para manter um pulso longo, ou seja, capaz de manter o poder de transmissão forte, e ter um sinal identificável em fração de um pulso (manter a resolução em alcance o mais curta possível) o pulso é *chirped*⁶ (Woodhouse, 2005).

A resolução de alcance terrestre não é constante ao longo da faixa e na verdade melhora com a distância a partir do nadir (devido ao aumento de θ_i na Figura 2.8). Isso é oposto ao comportamento da maioria dos sistemas óticos e por isso contraintuitivo (Meyer, 2019).

⁶ Chirp: Variação de frequência dentro de uma pequena largura de banda que codifica o sinal para que os sinais de retorno sobrepostos sejam distinguidos através do tempo (Woodhouse, 2005).

2.1.8. Distorções Geométricas

Os sistemas radar tem uma geometria de observação oblíqua, assim as imagens radar, que são projeções cilíndricas no plano de imagem, contêm distorções geométricas. Na Figura 2.10 observa-se que b' é recebido antes que a' , que d' e e' estão mais próximos que na realidade, e que entre h e i há uma zona que não é iluminada pelo radar.

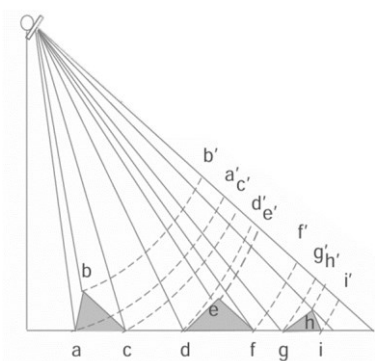


Figura 2.10 - Esquema do observado em alcance oblíquo vs real da superfície em alcance terrestre. Fonte: (Zyl & Kim, 2010)

O efeito chamado foreshortening (Figura 2.11) é caracterizado por áreas que inclinam em direção ao

sensor e parecem mais curtas na imagem, enquanto áreas que inclinam em direção oposta ao sensor parecem mais longas na imagem do que áreas mais horizontais (Zyl & Kim, 2010). Se a inclinação for maior que o ângulo de incidência acontece o layover (Figura 2.11) que é um deslocamento do topo relativamente à base. O sinal de topo chega ao mesmo tempo ou antes que o sinal da base. Nesse caso, uma colina pode estar projetada sobre a região à sua frente (Meyer, 2019; Zyl & Kim, 2010). Quando uma superfície inclinada, que é oposta ao radar, apresenta uma inclinação íngreme o suficiente para não ser iluminada pelas ondas do radar, ocorre o fenômeno de sombra (Figura 2.11). Nesses casos, essas zonas não apresentam informação criando um efeito de sombra (Zyl & Kim, 2010).

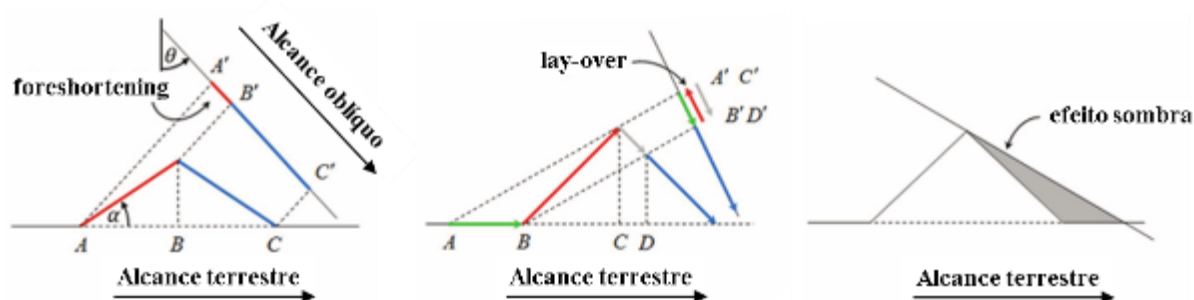


Figura 2.11 - Principais distorções geométricas em imagens SAR. Fonte: (Meyer, 2019)

Os efeitos de *Layover* e *Foreshortening* podem ser reduzidos se o ângulo de vista aumentar, havendo, no entanto, a desvantagem do aumento do efeito de sombra. Assim sendo, as distorções na imagem relacionadas com a topografia não podem ser completamente removidas e a aquisição de imagens de mais de um ponto de vista pode ser necessária para, conjuntamente, minimizar estas três distorções (Meyer, 2019).

2.1.9. Efeito de *speckle*

O efeito de *speckle* é resultado da interferência dos ecos dos difusores distribuídos aleatoriamente dentro de uma célula de resolução. A resposta de difusão de uma célula de resolução é a soma coerente de amplitudes e fases de milhares de eventos de difusores individuais, conforme mostrado na Figura 2.12 (Woodhouse, 2005).

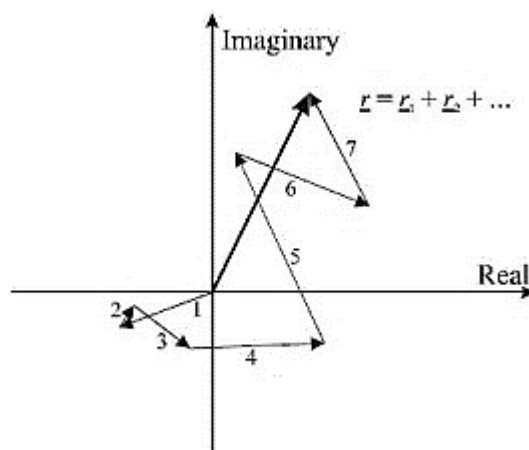


Figura 2.12 - Fase e amplitude aleatórias de uma coleção de difusores numa célula de resolução somados num vetor. Fonte: (Woodhouse, 2005)

Se a disposição dos difusores em diferentes células de resolução de um alvo homogêneo não for idêntica, a amplitude e fase do vetor de soma variarão aleatoriamente de pixel para pixel resultando num aspeto granulado da imagem como demonstrado na Figura 2.13. Remover este efeito leva a perda de resolução (Meyer, 2019) e por isso não é apropriado a todas as aplicações.

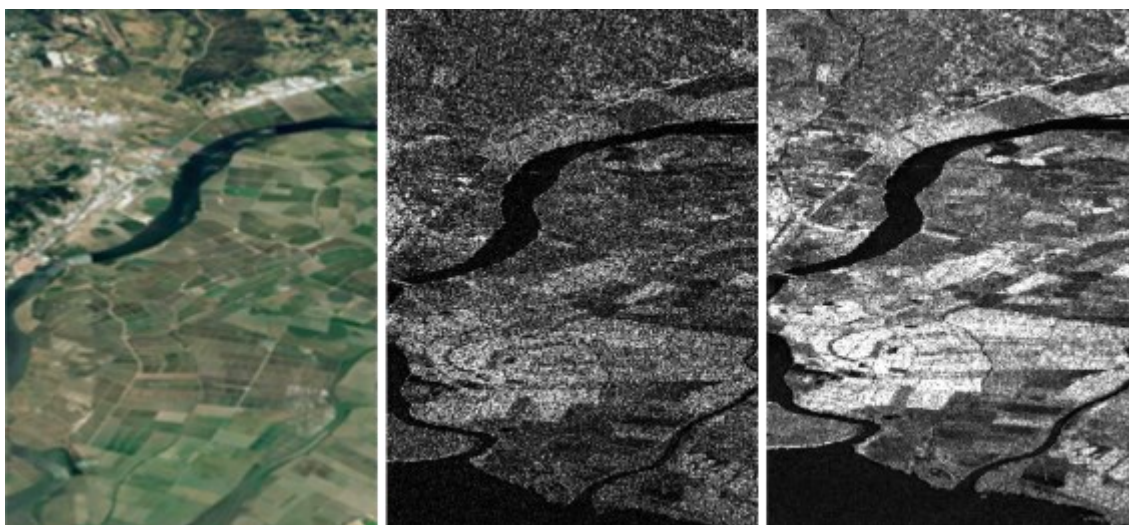


Figura 2.13 – Da esquerda para a direita sobre a Reserva Natural do Estuário do Tejo: Imagem ótica google, imagem radar Sentinel 1 com speckle e imagem radar com filtro de remoção speckle

O *speckle* é um fenómeno determinístico e repetível. Se uma medição for repetida com exatamente o mesmo sistema de imagem, com a mesma geometria, para uma região do terreno que não tenha mudado entre as aquisições de imagens, os padrões de *speckle* em cada imagem serão idênticos (Woodhouse, 2005).

2.1.10. Geometrias de aquisição

Existem várias geometrias de aquisição, sendo as mais comuns as que se passam a descrever em seguida. Na Figura 2.14 observa-se as geometrias de aquisição utilizadas pela plataforma Sentinel 1, que será a usada nos casos de estudo do presente trabalho.

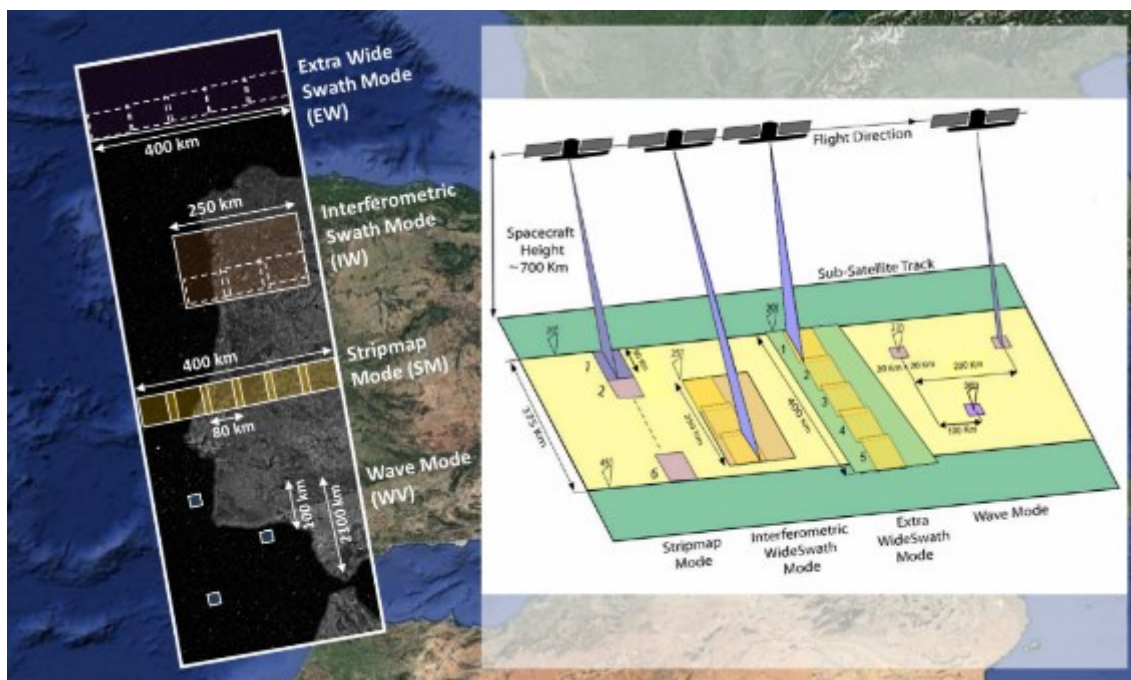


Figura 2.14 - Modos de aquisição Sentinel-1. Fonte: adaptado de (Copernicus, n.d.-g)

Numa geometria de aquisição em modo *StripMap* (SM) o radar desloca-se na sua trajetória a uma velocidade constante em que o ângulo nadir e azimuth são fixos. Este modo permite observar continuamente uma vasta área como que se tratasse de uma fatia da superfície paralela à trajetória. Para cada *swath* (faixa), a antena é configurada para gerar um feixe adequado à superfície alvo. Este é um modo ativado apenas em situações extraordinárias sobre solicitação (Copernicus, n.d.-g; Goulão, 2018).

Um SAR em modo *Spotlight*, usa as capacidades mecânicas e eletrônicas para apontar um feixe estreito para uma determinada área na superfície e deixar o feixe focado durante um maior intervalo de tempo nessa mesma área, enquanto o sensor segue a trajetória. Isto sintetiza uma antena de maiores dimensões, ou seja, o sensor deteta o alvo muito mais cedo e deixa de o ver muito depois, aumentando a resolução em azimuth. O problema com este modo é a perda de cobertura ao longo do trajeto, porque a alta resolução conseguida é apenas para uma área específica da superfície. Assim, o SAR apenas adquire

ecos na área que está focado e não adquire ecos imediatamente antes ou depois (Goulão, 2018; Woodhouse, 2005).

O modo onda, ou modo *Wave* (WM), não requer um contínuo *stripmap*. Superfícies são iluminadas em intervalos regulares ao longo da faixa. É uma operação intermitente que disponibiliza uma taxa de dados baixa que o radar é capaz de guardar internamente sem necessidade imediata de enviar para uma estação. Este modo é geralmente usado para aquisição de dados sobre o oceano (Copernicus, n.d.-a; ESA, 2007).

No modo *ScanSar*, a antena é projetada para aquisição em modo *stripmap*, pelo que é possível ajustar eletronicamente a elevação do feixe (em alcance) para capturar áreas adjacentes ligeiramente sobrepostas com ângulos de incidência diferentes. O ajuste de elevação deve ocorrer num intervalo de tempo inferior ao tempo necessário para que o radar percorra a distância máxima da abertura sintética (Lombardo, n.d.).

O modo *Interferometric Wide Swath* (IW) é a implementação de um novo tipo de *scansar* chamado de *Terrain Observation with Progressive Scan* (TOPSAR) e tem o objetivo de reduzir desvantagens do modo *scansar*. O princípio é reduzir a resolução em azimuth, comparado com SM, diminuindo o tempo de iluminação de um *burst*. Além dos ajustes do feixe em alcance, o feixe também é eletronicamente direcionado de trás para a frente na direção do azimuth para cada pulso. Assim é evitado o efeito de *scalloping*⁷ resultando numa imagem mais homogênea. O modo TOPSAR tem como objetivo alcançar a mesma cobertura e resolução do *ScanSAR*, mas com uma Razão Sinal-Ruído (Signal-to-Noise Ratio, SNR) e Razão de Ambiguidade de Alvo Distribuído (Distributed Target Ambiguity Ratio, DTAR) quase uniformes (Copernicus, n.d.-a).

O modo Extra Wide Swath (EW) também utiliza a técnica TOPSAR para adquirir dados sobre uma área mais ampla do que o modo IW. O modo EW foi especialmente desenvolvido para ser utilizado em regiões de gelo marinho, zonas polares e em determinadas áreas marítimas, sendo particularmente eficaz no monitoramento de gelo, deteção de derrames de óleo e para serviços de segurança. Da mesma forma que o modo IW, o modo EW também oferece a capacidade de realizar interferometria, aproveitando características comuns, como a sincronização de pulsos, estabilidade da linha de base e estabilidade Doppler (Copernicus, n.d.-a).

⁷ Redução de sensibilidade a diferentes distâncias

2.1.11. Características de diferentes plataformas com sensores SAR

A Tabela 2.3 faz menção a algumas das principais missões com sensores que foram lançados desde o início do processamento de dados SAR, indicando as respectivas características e formas de aquisição. Apesar do amplo arquivo de dados temporais disponível, os produtos de dados SAR destas plataformas são, infelizmente, afetados por convenções de nomenclatura inconsistentes causando uma variedade de tipos e formatos de dados, o que pode causar dificuldades no uso de imagens SAR pelos utilizadores, sobretudo os mais interessados em observação de longo prazo da Terra (Meyer, 2019).

Tabela 2.3- Lista de antigos, atuais e futuros sensores SAR. Fonte: (Meyer, 2019)

SENSOR	OPERAÇÃO	ONDA	POLARIZAÇÃO	RESOLUÇÃO	CICLO	ACESSO
Seasat	1978	L-band $\lambda = 24.6\text{cm}$	HH	Az:5m Rg:25m	-	Aberto
ERS-1	1991-2001	C-band $\lambda = 05.6\text{cm}$	VV	Az:6-30m Rg: 26m	35 days	Restrito
JERS-1	1995-1998	L-band $\lambda = 24.6\text{cm}$	HH	Az: 18m Rg: 18m	44 days	Restrito
ERS-2	1995-2011	C-band $\lambda = 05.6\text{cm}$	VV	Az: 6-30m Rg: 26m	35 days	Restrito
ENVISAT	2002-2012	C-band $\lambda = 05.6\text{cm}$	HH, VV, VV/HH, HH/HV, VV/VH	Az: 28m Rg: 28m	35 days	Restrito
Radarsat-1	1995-2013	C-band $\lambda = 05.6\text{cm}$	HH	Standard: 25x28m Fine: 9x9m Wide1: 35x28m Wide2: 35x28m ScanSAR: 50x50-100x100m	24 days	1995-2008: Restrito 2008-2013: Comercial
TerraSAR-X TanDEM-X	2007-2010-	X-band $\lambda = 03.5\text{cm}$	Single: HH, VV Dual: HH/VV, HH/HV, VV/VH Twin: HH/VV, HH/VH, VV/VH	Spotlight: 0.2x1.0-1.7x3.5m Stripmap: 3x3m ScanSAR: 18-40m	11 days	Comercial e Restrito (científico)
Radarsat-2	2007-	C-band $\lambda = 05.6\text{cm}$	Single: HH, VV, HV, VH Dual: HH/HV, VV/VH Quad: HH/HV/VH/VV	Spotlight: ~1.5m Stripmap: ~3x3-25x25m ScanSAR: 35x35-100x100m	24 days	Comercial
COSMO - SkyMed	2007-	X-band $\lambda = 03.5\text{cm}$	Single: HH, VV, HV, VH Dual: HH/HV, HH/VV, VV/VH	Spotlight: $\leq 1\text{m}$ Stripmap: 3-15m ScanSAR: 30-100m	Sat.: 16 days Const.: ~hrs	Comercial e Propostas limitadas (base científica)
ALOS-2 PALSAR-2	2014-	L-band $\lambda = 24.6\text{cm}$	Single: HH, VV, HV, VH Dual: HH/HV, VV/VH Quad: HH/HV/VH/VV	Spotlight: 1x3m Stripmap: 3-10m ScanSAR: 25-100m	14 days	Comercial e Propostas limitadas (base científica)
Sentinel-1	2014-	C-band $\lambda = 05.6\text{cm}$	Single: HH, VV Dual: HH/HV, VV/VH	Stripmap: 5x5m Interferometric Wide Swath (IW): 5x20m Extra Wide Swath (EW): 20-40m	Sat.: 12 days Const.: 6 days	Aberto

SAOCOM	2018-	L-band $\lambda = 24.6\text{cm}$	Single: HH, VV Dual: HH/HV, VV/VH Quad: HH/HV/VH/VV	Stripmap: 10x10m TopSAR: 100x100m	Sat.: 16 days Const.: 8 days	A ser decidido
PAZ SAR	2018-	X-band $\lambda = 03.5\text{cm}$	*See TerraSAR/TanDEM-x	*See TerraSAR/TanDEM-x	11 days	Comercial
RCM	2019	C-band $\lambda = 05.6\text{cm}$	Single: HH, VV, VH, HV Dual: HH/HV, VV/VH, HH/VV Compact Quad	Very high, high, medium, and low-res modes (3-100m)	Sat.: 12 days Const.: ~hrs	A ser decidido
NISAR	2021	L-band $\lambda = 24.6\text{cm}$	Single: HH, VV, VH, HV Dual: HH/HV, VV/VH, HH/VV Quad	3-20m (mode dependent)	12 days	Aberto
BIOMASS	2024	P-band $\lambda = 70.0\text{cm}$	Quad	$\leq 60 \times 50\text{m}$	17 days	Aberto
TanDEM-L	2024	L-band $\lambda = 24.6\text{cm}$	Single, dual, quad modes	12x12m	Sat.: 16 days Const.: 8 days	Aberto

Alguma informação complementar relativa a nomenclatura e ferramentas de software aberto é ainda apresentada no Anexo 1, com base em “THE SAR HANDBOOK - Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation” (Meyer, 2019).

2.2. Métodos de interferometria SAR

Como referido na explicação dos conceitos relativos a SAR, um sinal contém informações de amplitude e fase. A amplitude representa a intensidade da resposta do radar, enquanto a fase representa a fração de um ciclo completo de onda sinusoidal. A fase da imagem SAR é determinada principalmente pela distância entre a antena do satélite e os alvos no solo.

Assim, a interferometria é uma técnica que utiliza as propriedades coerentes da radiação eletromagnética para comparar duas ou mais ondas. A fase de uma onda pode representar uma medição do caminho dessa onda. Uma medição única de fase não é muito útil sem conhecer o número de ciclos da onda, mas a comparação entre duas ou mais fases permite medir a diferença entre comprimentos de caminho da onda. A exploração da diferença da fase entre duas medidas diferentes é conhecida por interferometria (Woodhouse, 2005).

2.2.1. InSAR

O Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), ou Interferometria de Radar de Abertura Sintética, é uma técnica que mede a mudança na fase do sinal de radar entre duas imagens adquiridas sobre a mesma área, mas em momentos diferentes. O InSAR aproveita a diferença de fase entre duas observações de radar complexas da mesma área, obtidas de posições ligeiramente diferentes, para extrair informações de distância sobre a superfície terrestre.

Quando um ponto na superfície da Terra se move, a distância entre esse ponto e o sensor do radar muda, afetando a fase registada pelo sensor, conforme se ilustra na Figura 2.15 e é possível criar um interferograma no qual a fase está altamente relacionada com a topografia do terreno, permitindo mapear padrões de deformações da superfície. (Copernicus, n.d.-h).

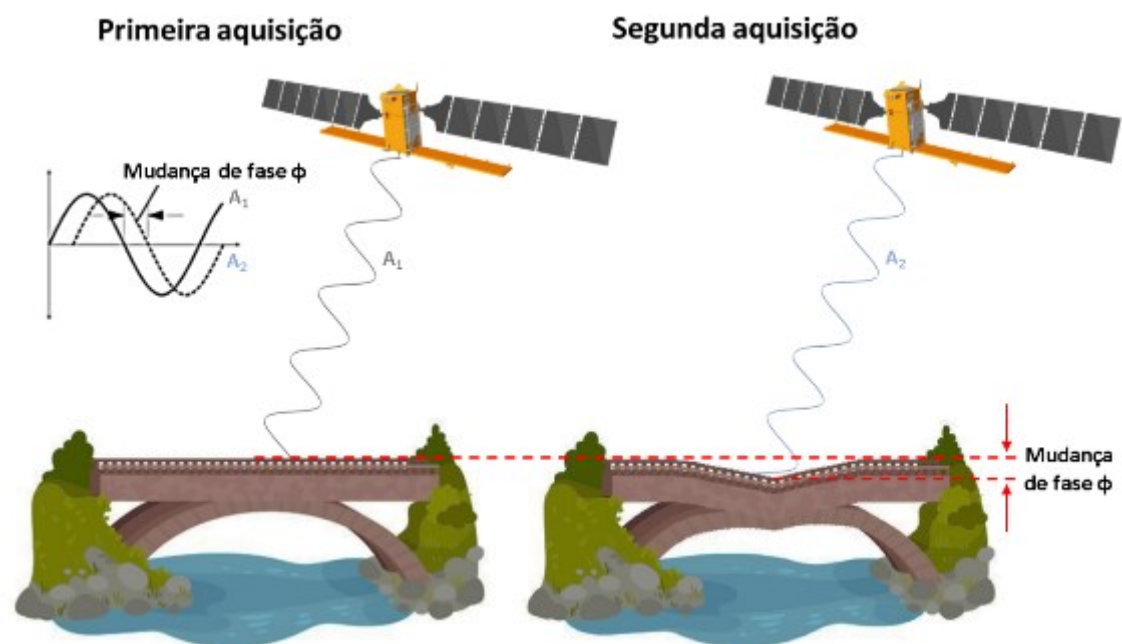


Figura 2.15 - Princípio da interferometria SAR na monitorização dos deslocamentos. Fonte: adaptado de (Schindler et al., 2011)

A distância entre dois satélites ou orbitas no plano perpendicular à orbita chama-se linha de base interferométrica e a sua projeção perpendicular ao alcance oblíquo é a linha de base perpendicular, como observado na Figura 2.16 (Ferretti et al., 2007).

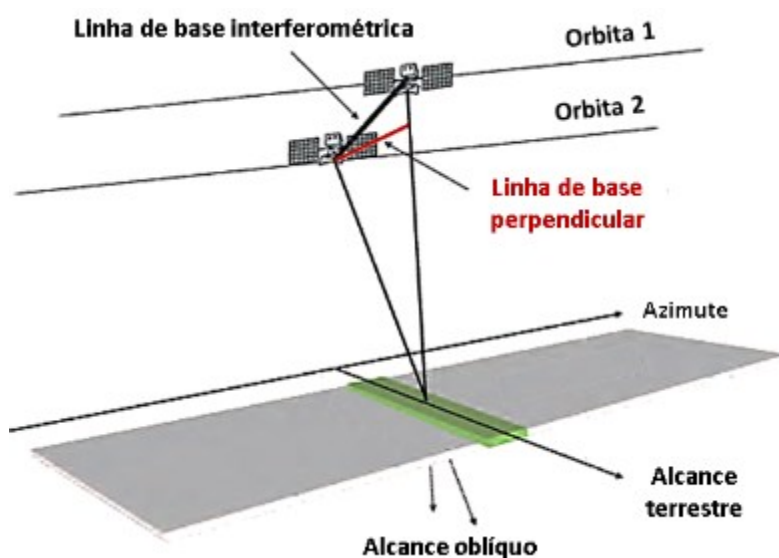


Figura 2.16 - Geometria da separação de orbita em interferometria SAR. Fonte: (Ferretti et al., 2007)

2.2.2. DInSAR

Os interferogramas contêm valores diferenciais de fase com componentes da topografia, deslocamentos, perturbações de órbita e influência da atmosfera, etc. Ao usar Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de interesse dos interferogramas, a componente topográfica pode ser compensada e a diferença entre os produtos resultantes revela os padrões de deformação na superfície que ocorreram entre as duas datas de aquisição. Essa abordagem é conhecida como Interferometria Diferencial (DInSAR) (Copernicus, n.d.-h; Roque et al., 2016).

As principais utilidades dessa técnica incluem a criação de modelos digitais da superfície terrestre (MDS) e a detecção de movimentos na superfície da Terra. No entanto, a aplicação dessa técnica pode ser limitada pela descorrelação temporal e geométrica (ou seja, mudanças na refletividade conforme função do tempo e ângulo de incidência da aquisição), bem como artefactos atmosféricos (devido às diferentes condições troposféricas e ionosféricas no momento das aquisições SAR). Os MDS obtidos através desta técnica tem precisão na ordem das dezenas de metros e deslocamentos da superfície na ordem dos centímetros (Perissin & Rocca, 2006; Roque et al., 2016).

Técnicas multitemporais, *Multi-Temporal satellite-based differential interferometry* (MTInSAR), permitem mitigar os erros provocados pelos termos descorrelacionados com o processamento simultâneo de múltiplas imagens SAR, adquiridas sobre a mesma área por longos períodos de tempo (Nettis et al., 2023). Ao adotar essas técnicas, tais como, Interferometria de Difusores Persistentes (PSI), consegue-se superar as limitações enunciadas, reduzindo as restrições comuns relacionadas à linha de base e ao tempo, maximizando o número de interferogramas utilizáveis. Isso permite calcular tendências médias ao longo do tempo com base num extenso histórico de interferogramas (Copernicus, n.d.-h).

2.2.3. PSI

O primeiro método *Persistent Scatterer Interferometry* (PSI), foi desenvolvido por Ferretti et al. (2001) precedido pela patente do algoritmo PSInSARTM. O método faz uso de grandes conjuntos de imagens SAR, visando possibilitar a detecção dos alvos de difusão mais estáveis ao longo de anos. Isto é, são criados vários interferogramas (pilha

interferométrica), a partir de um grande conjunto de imagens SAR, de onde são apenas selecionados pixels com fase estável durante o período das imagens denominados de Difusores Persistentes (PS - *Persistent Scatterers*) (Ansar et al., 2021; Roque et al., 2016).

Os algoritmos para Difusores Persistentes operam na série temporal dos interferogramas, todos formados a partir de uma única imagem SAR, designada por master, conforme se ilustra na Figura 2.17. Nessa figura a linha azul representa os interferogramas formados e a linha de base perpendicular (*baseline*) refere-se à distância perpendicular à linha de vista entre a *master* (o círculo vermelho central) e cada uma das restantes imagens SAR, as *slaves* (os restantes círculos vermelhos) (A. Hooper et al., 2012).

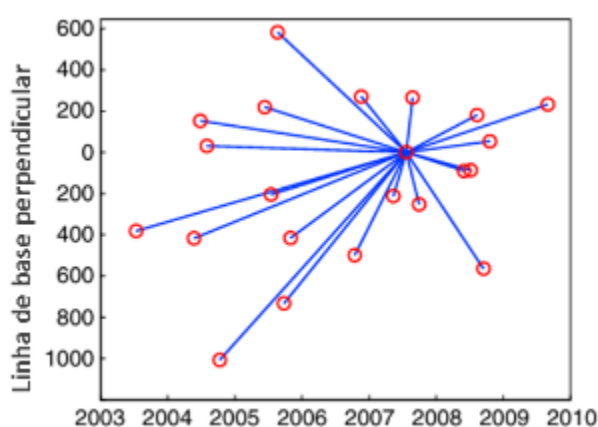


Figura 2.17 - Exemplo de gráfico para método PSI. Fonte: (A. Hooper et al., 2012)

Os Difusores Persistentes são pontos na superfície terrestre que apresentam reflexão estável para o sensor do satélite, onde é assumido que existe um alvo pontual em cada pixel da imagem SAR com comportamento refletor que se sobrepõe ao dos restantes elementos (Roque et al., 2016). São aqueles que permanecem estáveis por maiores períodos de tempo e maiores linhas de base perpendiculares (Du et al., 2016).

O movimento relativo dos difusores e/ou mudança na direção de observação da plataforma do radar causa descorrelação da fase dentro de uma célula de resolução pois as contribuições somam de maneira diferente. Mas se um difusor dentro da célula retornar significativamente mais energia que os outros a descorrelação é reduzida (A. Hooper et al., 2012).

Este princípio PSI é ilustrado na Figura 2.18. Os difusores contribuem para a fase de um único pixel, enquanto os gráficos representam a simulação das fases ao longo de 100 iterações. Nessa figura, a imagem (a) representa um pixel com difusores distribuídos (DS), e a imagem (b) demonstra difusores persistentes (PS) três vezes mais brilhante do

que o número dos difusores menores. Este método é ideal para mapear superfícies de movimento lento, como deslizamentos de terra, movimentos tectônicos e deformações da superfície ao longo do tempo (Ansar et al., 2021).

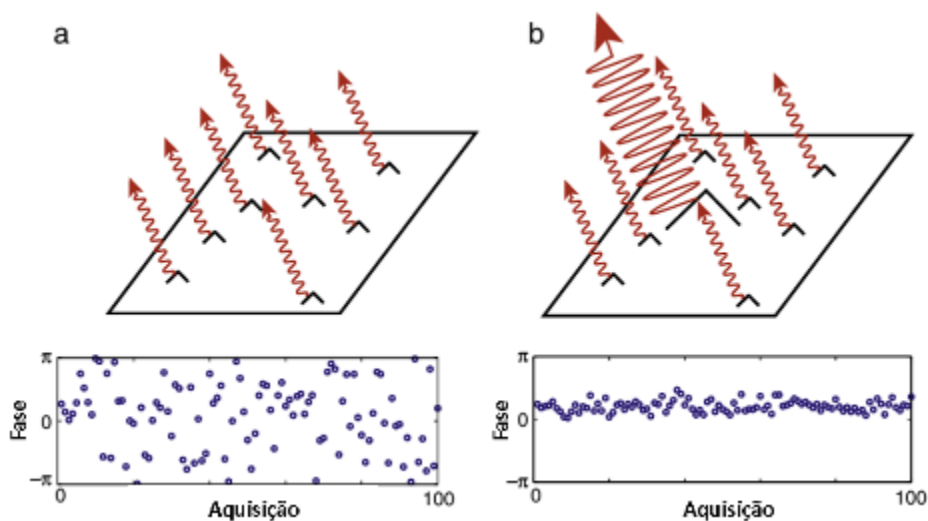


Figura 2.18 - Princípio PSI - a) DS - difusores distribuídos b) PS - difusores persistentes. Fonte: (A. Hooper et al., 2012)

A precisão da técnica depende do sensor, do número de imagens, do período ao longo do qual as imagens são adquiridas, da distância do ponto de referência e da coerência dos difusores persistentes (A. Hooper et al., 2012). No caso em que a deformação é linear ao longo do tempo, a precisão avaliada pode ser melhor do que 1 mm por ano segundo (Adam et al., 2009). A precisão das medições individuais foi avaliada numa experiência com refletores de canto para representar PS ideais em (Marinkovic et al., 2007), e a precisão relativa entre refletores separados por 200 metros foi encontrada como sendo de 1,6 mm, com base em dados adquiridos pelo satélite Envisat. As séries temporais de deslocamento PS são caracterizadas por uma precisão aproximadamente igual a ± 5 mm em termos de deslocamento absoluto e 1-2 mm/ano em termos de velocidade de deformação média (Nettis et al., 2023).

A abordagem PSI enfrenta desafios na detecção de pixels estáveis em áreas de baixa coerência como vegetação, água e zonas não urbanas. (Ansar et al., 2021)

2.2.4. SBAS

Berardino et al. (2002) inventou o método Small Baseline Subset (SBAS). É um método que não considera apenas uma imagem master para a série temporal, mas sim,

interferogramas construídos a partir de pares de imagens com bases perpendiculares pequenas, com o objetivo de diminuir a descorrelação espacial como representado na Figura 2.19 (Ansar et al., 2021; Roque et al., 2016).

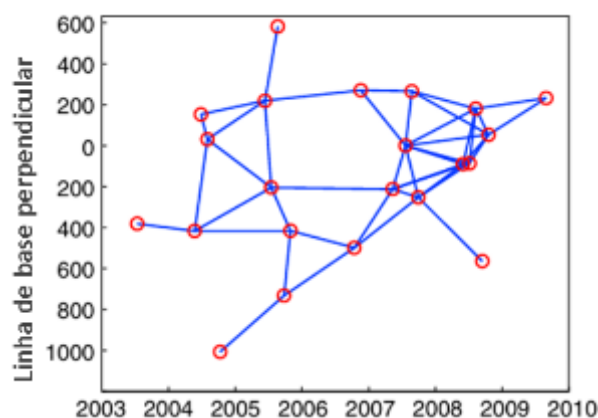


Figura 2.19 - Exemplo gráfico SBAS. Fonte: (A. Hooper et al., 2012)

Os algoritmos SBAS, fazem uso dos Difusores Distribuídos (DS - Distributed Scatterers) para extrair informações de imagens SAR representado na Figura 2.18 (a). Essa abordagem resolve o problema do PSI que não é adequado para áreas não urbanas, como campos, florestas e rochas. São gerados Interferogramas a partir de pares de imagens SAR com baselines perpendiculares menores que um limite específico para minimizar a descorrelação espacial e temporal (Ansar et al., 2021).

No entanto, o SBAS pode resultar numa redução na resolução da imagem, o que leva à perda de detalhes. Isso ocorre devido à divisão frequente dos interferogramas em subconjuntos independentes durante o processamento do SBAS (A. Hooper et al., 2012).

O método de linha de base pequena pode atingir precisões semelhantes à técnica PS, da ordem de aproximadamente 1 mm por ano (Lanari et al., 2007), embora isso dependa novamente do número de imagens, do período durante o qual as imagens são adquiridas e da distância do ponto ou área de referência (A. Hooper et al., 2012).

2.2.5. Técnicas mais comuns de interferometria SAR

Tendo em conta o que foi exposto, existem, atualmente, duas abordagens principais para calcular deslocamentos verticais com base em interferometria SAR, nomeadamente: a PSI que se foca em difusores persistentes (PS); a SBAS que se foca em difusores dispersos (DS), como ilustrado na Figura 2.20. Alguns algoritmos adotam uma dessas abordagens, enquanto outros têm a capacidade de combinar ambas.

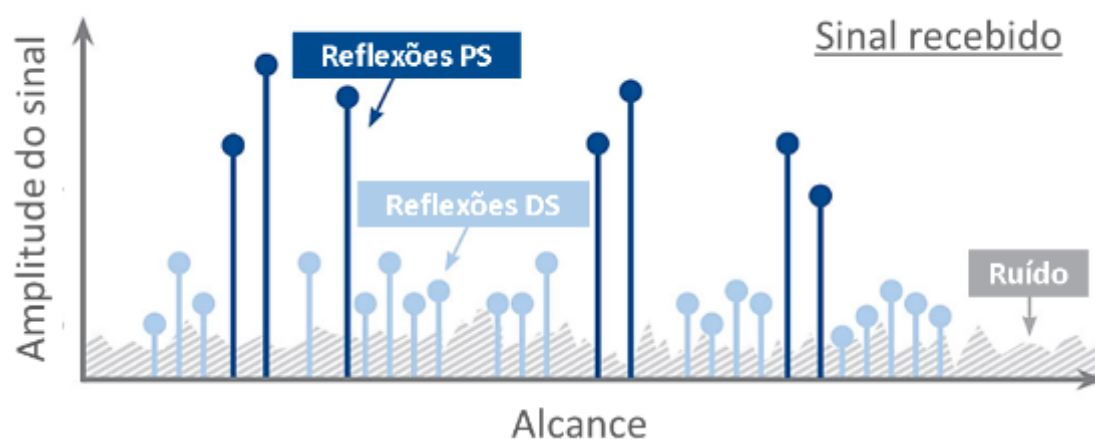


Figura 2.20 - Representação da força do sinal retornado por alvos numa medida em alcance. Fonte: (Tre Altamira, n.d.)

A seguir são apresentadas algumas das técnicas de interferometria SAR mais usadas (Ansar et al., 2021):

- SqueeSAR (Ferreti et al., 2011) - DS e PS
- Método de Difusores Persistentes de Stanford (StaMPS) - PS e opcional DS
- Quasi Persistent Scatterer (QPS) (Perissin e Wang, 2012).
- Small Baseline Subset (SBAS) (Berardino et al., 2002) - DS

2.2.5.1. SqueeSAR

O SqueeSAR é uma técnica patenteada projetada por Ferreti *et al.* (2011) e disponibilizada por Tre Altamira, pertencente ao grupo Collecte Localisation Satellites (CLS), subsidiário de Centre National d'Etudes Spatiales (CCNES). O SqueeSAR fornece medições de alta precisão da deformação da superfície terrestre sobre o mesmo campo e geometria de aquisição. É um avanço nas técnicas PSI onde é possível determinar um número maior de Pontos de Medição (MPs) em áreas não urbanas em comparação com o PSI baseado na abordagem comum de difusores persistentes (Ansar et al., 2021).

É um método que identifica e utiliza sinais de Difusores Distribuídos (DS) em análises de séries temporais de Interferometria SAR (InSAR). Na abordagem é aplicado um filtro que leva em consideração o espaço e o tempo nas imagens e otimiza a detecção dos DS. Em seguida, faz a combinação das informações dos DS otimizados com informações de PS para analisar mudanças ao longo do tempo na superfície terrestre com alta precisão (Shamshiri et al., 2018).

O objetivo é aumentar a densidade de pontos de medição no espaço, especialmente em áreas não urbanas, usando o sinal de PS e DS, o que envolve o estudo estatístico de vários tipos de alvos naturais de radar em diferentes momentos. Zonas com detritos, terras não cultivadas, afloramentos dispersos e áreas abandonadas são exemplos que podem ser definidos como um grupo significativamente homogêneo de pixels em imagens de radar onde os pixels adjacentes têm os mesmos valores de refletividade e por isso definidos como pontos DS (Ansar et al., 2021).

Nesta técnica, os sinais de DS são processados primeiro para reduzir o ruído de fase e estimar a matriz de coerência para cada um, aplicando uma filtragem adaptativa. Em seguida, os valores de fase ótimos de cada DS são estimados pela implementação de um algoritmo de triangulação de fase. Depois, os DS e PS são processados em conjunto usando uma cadeia de processamento convencional PS para produzir séries temporais de deformação (Ansar et al., 2021).

Na Figura 2.21 é possível observar uma imagem da plataforma do software da Tre Altamira para visualização e análise de dados.

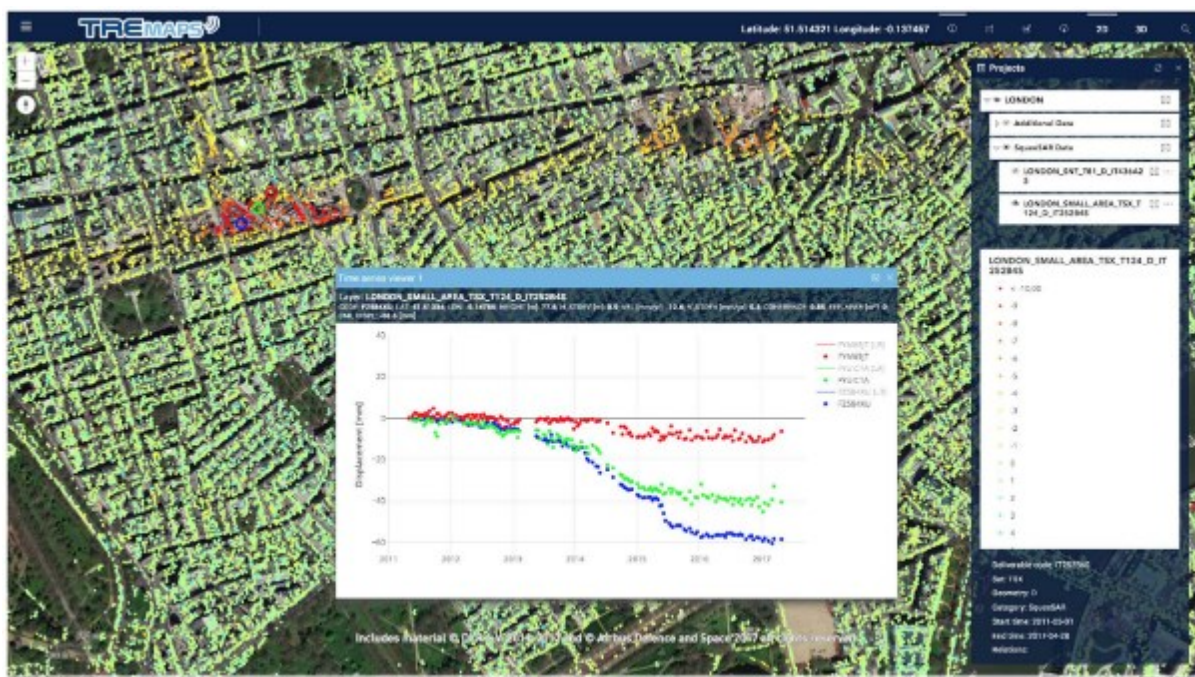


Figura 2.21 - Plataforma TreMaps de TreAltamira para visualização e gestão de dados InSa. Fonte: (Tre Altamira, n.d.)

Quanto à precisão, os valores obtidos a partir de várias análises de dados dos satélites ERS, Envisat e Radarsat-1 para um ponto a menos de 1 km do ponto de referência e considerando um conjunto de dados de radar ao longo de vários anos, apresentam uma taxa de deslocamento é de 1mm/ano e a precisão de valores de deslocamento absoluto é de 5mm (Tre Altamira, n.d.).

2.2.5.2. StaMPS

O Método para Difusores Persistentes (StaMPS - The Stanford Method for Persistent Scatterers) da Universidade de Stanford, à semelhança de SqueeSAR, é uma técnica de processamento multitemporal aperfeiçoada a partir da Interferometria de Difusores Persistentes (PSI) e foi desenvolvida por Hooper *et al.* (2007) (Ansar et al., 2021).

Foi criada inicialmente com intuito de encontrar maior quantidade de pixels estáveis em áreas não urbanas onde o método de Ferretti *et al.* (2001) não era tão adequado. Apesar de originalmente desenvolvido na universidade de Stanford, o StaMPS tem sido aprimorado na Universidade da Islândia, na Universidade Técnica de Delft e na Universidade de Leeds (A. Hooper et al., 2018).

StaMPS é uma ferramenta distribuída gratuitamente para fins de pesquisa, com uma grande comunidade de utilizadores, que incorpora a Interferometria de Difusores Persistentes (PSI) e métodos de Linha de Base Pequena (SBAS). Estes últimos foram introduzidos na versão 3.0, sendo útil para medir deslocamentos do solo a partir de séries temporais de aquisições SAR (Blasco et al., 2019). O StaMPS consegue extrair o sinal de deformação de pixels de Difusores Persistentes mesmo na ausência de difusores brilhantes em todos os terrenos com ou sem infraestruturas. Além disso, o StaMPS é aplicável em áreas sujeitas a deformações não constantes, sem necessidade de conhecimento prévio das variações na taxa de deformação.

Na Figura 2.22 é possível observar o exemplo de utilização do StaMPS na fase em que se encontra pronto a executar uma análise em 8 passos.

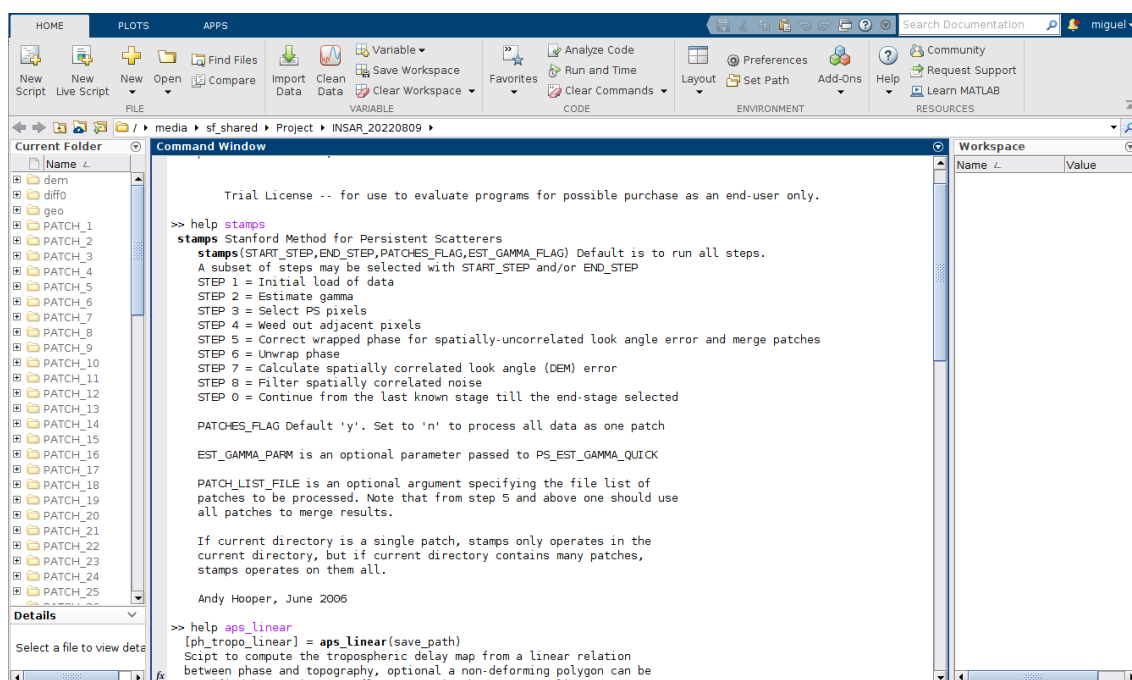


Figura 2.22 - StaMPS instalado e pronto a ser usado no MatLab. Fonte: Autor

Assim que o StaMPS identifica os PS, é capaz de isolar o sinal da deformação separando as componentes das fases relativas à atmosfera e ao ruído, através de filtros aplicados aos candidatos a difusores persistentes. Para isso, o algoritmo assume que: os deslocamentos são correlacionados no tempo e no espaço; que a componente atmosférica é correlacionada no espaço, mas não no tempo; e que o ruído não é correlacionado nem no espaço nem no tempo. Após a remoção destes componentes, a fase residual ainda contém o erro do Modelo Digital de Elevação (MDE) que é posteriormente modelado e removido da fase (A. J. Hooper, 2006). Efetuando o processamento é possível visualizar e analisar

os deslocamentos em linha de vista (*Line of Sight* -LOS), como se pode observar na Figura 2.23.

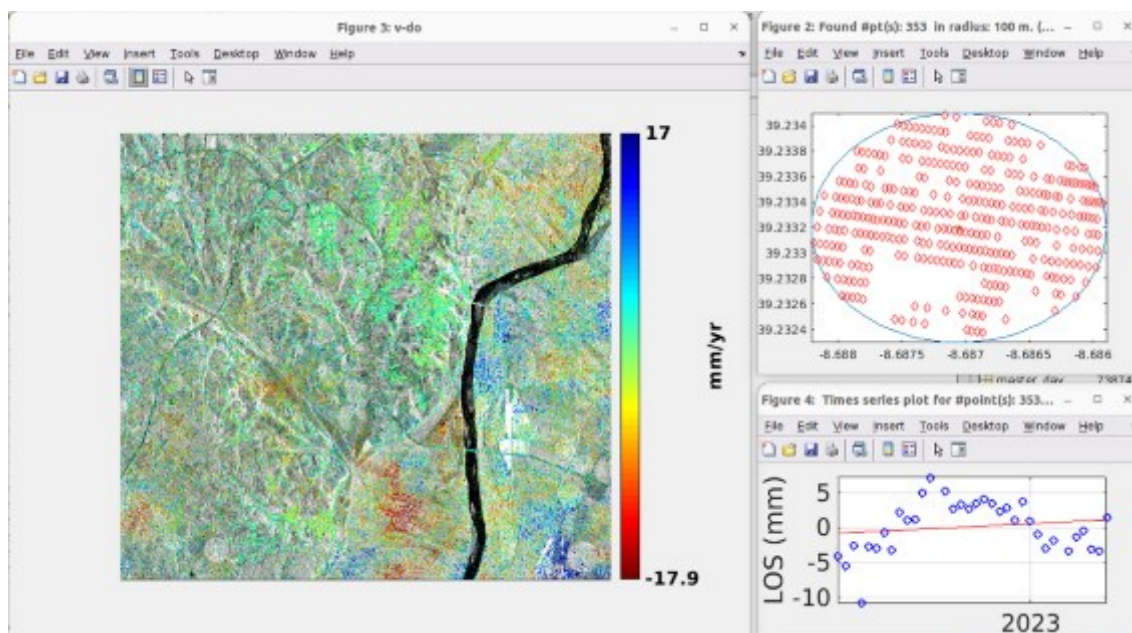


Figura 2.23 – Exemplo de StaMPS a ser usado no MatLab - podem observar-se os deslocamentos para uma área de interesse (Santarém) e respetiva série temporal para um conjunto de pontos exemplo. Fonte: Autor.

O StaMPS permite a deteção de deslocamentos num nível semelhante de precisão (mm/ano) conseguido pela PSInSAR (Grassi & Mancini, 2019), como por exemplo, valores inferiores a 2mm/ano com uso de Sentinel 1 (Mancini et al., 2021) ou 0.9mm de erro médio absoluto entre a análise e o efetivamente medido com o uso de imagens Sentinel 1 com refletores artificiais (Abo et al., 2023). Contudo, independentemente da técnica utilizada, os resultados vão depender muito da área de estudo e das imagens usadas.

2.2.5.3. SARPROZ

O SARPROZ é um pacote de ferramentas interferométricas desenvolvido em MATLAB por Perissin (2006) que fornece variadas opções para combinações de series de dados longas. Os parâmetros podem ser estimados através de diferentes algoritmos, tanto por PSI comum, como por Difusores Quasi-Persistentes (QPS, Quasi-Persistent Scatterer) (Perissin et al., 2011).

Perissin e Wang (2012) propuseram a QPS para melhorar a capacidade da interferometria de dispersão de pontos persistentes, que, por sua vez, tinha limitações em áreas não urbanas devido à baixa densidade de pontos persistentes (PS) (Ansar et al., 2021).

A ideia central por trás da metodologia QPS consiste em flexibilizar as restrições rigorosas estabelecidas pela análise de PS desenvolvida por Ferreti et al. (2001), que requer que o ponto seja coerente em todas as imagens. No QPS é suficiente que o ponto apresente coerência apenas num subconjunto de imagens (Ansar et al., 2021; Roque et al., 2016).

O SARPROZ, ilustrado na Figura 2.24, é um software não gratuito que está sujeito a obtenção de licença, embora seja possível na página Web dedicada solicitar por uma versão demo. Na imagem seguinte é apresentada a interface, onde se pode observar as várias funcionalidades da seleção de “site processing” a partir da janela principal.

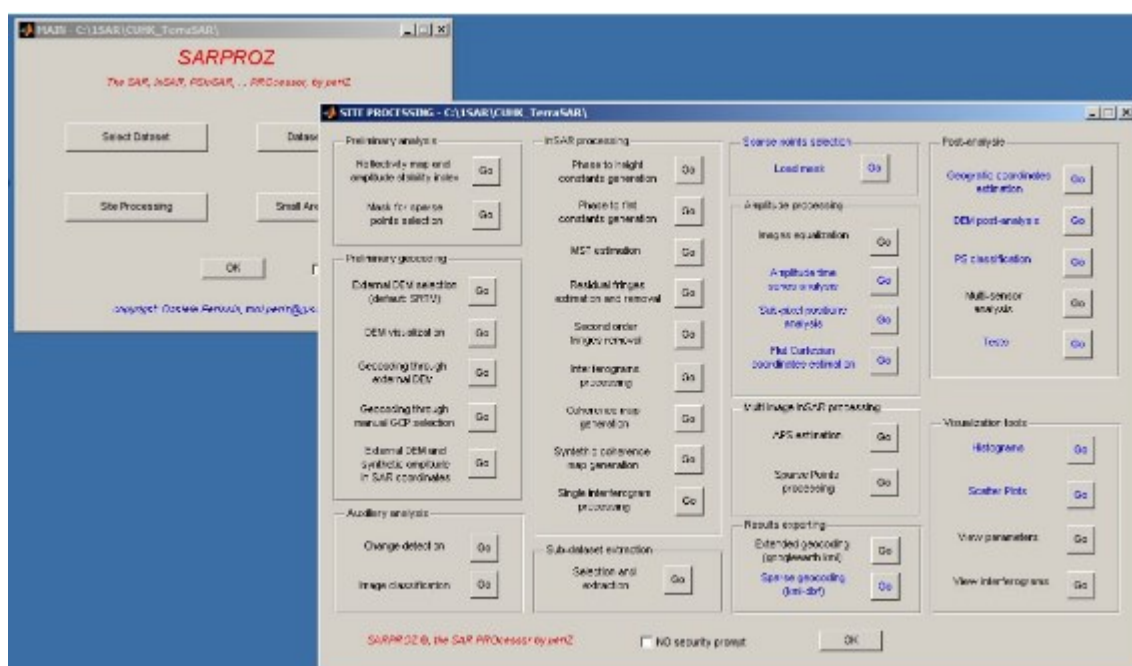


Figura 2.24 - Interface SARPROZ. Fonte:(Perissin et al., 2011)

2.2.5.4. P-SBAS

A P-SBAS é uma ferramenta web incorporada no ambiente *Grid Processing on Demand* (G-POD), desenhado pela Agência Espacial Europeia (ESA), fazendo parte da Geohazards Thematic Exploitation Platform (GEP), que usa repositórios de dados de imagens óticas e de satélites *Copernicus Sentinels-1/2/3*.

O acesso à ferramenta web *Parallel Small Baseline Subset* (P-SBAS) requer um registo no portal da ESA (ESA Earth Observation, n.d.), criando uma conta *ESA Earth Observation Single Sign-On* (EO-SSO). O acesso à ferramenta web P-SBAS, ilustrada na Figura 2.25, é possível depois do referido registo e ativação (Luca et al., 2015).

A ferramenta web P-SBAS no ambiente do G-POD apresentada na Figura 2.25, é uma abordagem completamente automatizada que permite executar todo o processo do P-SBAS e exige apenas a escolha dos dados SAR nos arquivos da ESA a serem usados, juntamente com a definição de alguns parâmetros necessários para o processamento de MT-InSAR. Este serviço do G-POD incorpora o algoritmo multitemporal e DInSAR desenvolvido pelo - Institute for Electromagnetic Sensing of the Environment, Itália (CNR-IREA), otimizado para processamento paralelo (Ruiz-Armenteros et al., 2016).

De salientar que a Geohazards disponibiliza, à data de 2023, um serviço completo SNAPPING PSI no GEP oferecendo assim medições interferométricas de difusores persistentes. O SNAPPING é baseado nas ferramentas do SNAP open source e StaMPS (Pacini, n.d.).



Figura 2.25 - Porta Web da ferramenta P-SBAS. Em (a) Parâmetros gerais de processamento (b) Mapa com seleção de AoI(Area of interest). Fonte:(Luca et al., 2015)

2.3. Algoritmos InSAR

Neste subponto serão apresentados os principais algoritmos na literatura para o tratamento de dados SAR na procura por deslocamentos superficiais.

2.3.1. Evolução dos algoritmos InSAR

Embora a teoria de interferometria de Radar de Abertura Sintética (SAR) estivesse a ser estudada antes do virar do século, um dos maiores pontos de viragem nos estudos de deformações por tecnologias radar satélite remonta ao ano de 2001 por Ferretti *et al.*(2021). À data os fatores como decorrelação geométrica e temporais assim como distúrbios atmosféricos eram os principais entraves à criação de ferramentas operacionais que permitissem monitorizar deformações na superfície e construção dos perfis topográficos. Então foi apresentado o primeiro procedimento que identificasse e explorasse pontos, chamados de refletores ou difusores permanentes naturais a partir de uma pilha interferométrica com series temporais longas e consequente remoção de fase atmosférica.

Estava assim criado o PSInSARTM, uma forma de conseguir precisão na ordem dos decímetros nos *Digital Elevation Model* (DEM) e de milímetros nas deteções de movimentações do terreno em áreas urbanas e terrenos rochosos, que demonstrava a possibilidade de extrair informação útil da fase que permitisse detetar precursores de colapso e ascensão em zonas vulcânicas (Ferretti et al., 2001).

Em 2002 é criada a abordagem *Small Baseline Subset* (SBAS) que utiliza interferogramas produzidos a partir de pares SAR com linhas de base espaciais e temporais curtas. O objetivo era reduzir os fenómenos de decorrelação que afetam a fase das imagens, mas mitigar esses efeitos provocou uma diminuição de resolução do pixel. Os resultados do processamento SBAS são pixels estáveis, caracterizados por alta coerência temporal (Berardino et al., 2002).

Até essa altura era possível usar InSAR efetivamente para medir deformações em regiões com boa coerência na fase usando algoritmos que identificam um primeiro conjunto de pixels PS por análise da variabilidade da amplitude. Essa análise faz sentido quando a razão sinal-ruído é alta, o que significa uma relação entre a dispersão da amplitude e

estabilidade da fase. Quando a razão sinal-ruído é baixa essa relação deixa de ser viável e o método deixa de ser efetivo (A. Hooper et al., 2004).

Precisamente com estudos em zonas vulcânicas foi criado então um algoritmo StaMPS para identificar pixels PS numa pilha interferométrica, baseado principalmente em características de fase e que encontra pixels de baixa amplitude com estabilidade de fase que não são identificados pelos algoritmos existentes à data. É característico deste método a formação de interferogramas com a remoção de fase topográfica com o uso de um DEM, a remoção da fase atmosférica e a remoção da fase relacionada com imprecisões de órbita. Uma das particularidades do StaMPS é a produção de séries temporais sem necessidade de suposições prévias sobre a natureza temporal da deformação (A. J. Hooper, 2006).

Nessa altura, por volta do ano de 2006, o algoritmo que mais tarde incorpora o software SARPROZ dá os seus primeiros passos com foco em problemas específicos sobre a combinação de dados de ERS e Envisat (Perissin & Rocca, 2006). Mais tarde, esse algoritmo é equipado com um módulo de caracterização e reconhecimento de alvos, assim como com técnicas de estimativa de alturas por processos de geocoding e algoritmos de extração de DEM e Digital Surface Model (DSM) (Perissin & Ferretti, 2007). Já em 2010, é incluído um algoritmo Quasi Persistent Scatterer (QPS) para responder a problemas nas áreas extraurbanas (Perissin et al., 2011), que mais tarde vem a ser responsável por muitos estudos importantes na área em Portugal (Roque et al., 2014), (J. J. M. Sousa et al., 2015), (Roque et al., 2015), (SARPROZ, n.d.).

Outro avanço importante aconteceu com a inclusão no StaMPS com algoritmos baseados no método *small baseline* (SBAS), tornando este software capaz de combinar ambas as abordagens, para extrair o sinal de deformação em mais pontos do que qualquer uma das abordagens de forma isolada (A. Hooper, 2008).

Em 2011 é apresentado o SQUESAR[®], que é uma extensão ao original PSInSAR[™], e que também combina ambas as abordagens, mas não num processo híbrido como o StaMPS. Assim, PS e DS são processados em conjunto sem a necessidade de alterações significativas na cadeia de processamento tradicional PSInSAR[™] e sem a necessidade de desenrolar centenas de interferogramas novamente para encontrar DS como acontece nos métodos convencionais SBAS (Ferretti et al., 2011).

2.3.2. Terminologia para classificação dos algoritmos

Até ao ano de 2008 existiam duas grandes categorias de algoritmos para processamento de múltiplas aquisições, difusoras persistentes (PS) e métodos de linha de base pequena (SB – *small baseline*). É preciso ter atenção que, apesar destas categorias estarem estabelecidos, a nomenclatura é inconsistente, como apontado em (A. Hooper, 2008), uma vez que “difusores persistente” refere-se ao tipo de pixel identificado, enquanto que “linha de base pequena” refere-se à metodologia de formação de interferograma. Assim, podemos dividir os algoritmos em métodos para obter pixels PS (sinal refletido raramente dominado por ruído) e métodos para obter pixels DS.

A terminologia utilizada nem sempre é coerente e nos artigos existentes na bibliografia, como por exemplo (Alam et al., 2022), usam a terminologia PSI sinonima de todo o tipo de abordagens InSAR definida em (Crosetto et al., 2016), enquanto que, para (Giorgini et al., 2023) ou (Fornaro et al., 2014), a divisão é entre PSI e SBAS como sendo dois tipos de abordagens em InSAR.

As principais abordagens InSAR e a evolução das suas funcionalidades ao longo dos anos pode ser percebida com base na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Principais abordagens InSAR ao longo dos anos (Crosetto et al., 2016) e (Alam et al., 2022)

Autores	Título do Artigo	Citações
(Ferretti et al., 2001)	Permanent scatterers in SAR interferometry	6111
(Berardino et al., 2002)	A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms	5062
(Mora et al., 2003)	Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images	916
(Schmidt & Bürgmann, 2003)	Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set	654
(Werner et al., 2003)	Interferometric point target analysis with JERS-1 L-band SAR data	65
(Duro et al., 2004)	High resolution differential interferometry using time series of ERS and ENVISAT SAR data	87
(A. Hooper et al., 2004)	A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers	1965
(Crosetto et al., 2005)	Early detection and in-depth analysis of deformation phenomena by radar interferometry	151
(Kampes, 2006)	Radar interferometry	738

(Perissin & Ferretti, 2007)	Urban-target recognition by means of repeated spaceborne SAR images	149
(Costantini et al., 2008)	A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of SAR images	209
(López-Quiroz et al., 2009)	Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry	295
(Ferretti et al., 2011)	A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR	1775
(Perissin & Wang, 2012)	Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers	205
(Hetland et al., 2012)	Multiscale InSAR time series (MInTS) analysis of surface deformation	163
(Lv et al., 2014)	Joint-scatterer processing for time-series InSAR	62
(Goel & Adam, 2013)	A distributed scatterer interferometry approach for precision monitoring of known surface deformation phenomena	109
(Devanathéry et al., 2014)	An approach to persistent scatterer interferometry	129
(Fornaro et al., 2014)	CAESAR: An approach based on covariance matrix decomposition to improve multibaseline–multitemporal interferometric SAR processing	265
(Ge et al., 2014)	Land subsidence characteristics of Bandung Basin as revealed by ENVISAT ASAR and ALOS PALSAR interferometry	101
(Cao et al., 2015)	A phase-decomposition-based PSInSAR processing method	119
(Ng et al., 2015)	Assessments of land subsidence in the Gippsland Basin of Australia using ALOS PALSAR data	79
(Du et al., 2016)	Subsidence monitoring over the Southern Coalfield, Australia using both L-Band and C-Band SAR time series analysis	54
(Lien, 2016)	Partially correlated persistent scatterer theory and techniques for radar interferometry	10
(Dong et al., 2018)	Mapping landslide surface displacements with time series SAR interferometry by combining persistent and distributed scatterers: A case study of Jiaju landslide in Danba, China	177
(Narayan et al., 2018)	A novel measure for categorization and optimal phase history retrieval of distributed scatterers for InSAR applications	15
(Shamshiri et al., 2018)	Efficient Ground Surface Displacement Monitoring Using Sentinel-1 Data: Integrating Distributed Scatterers (DS) Identified Using Two-Sample t-Test with Persistent Scatterers (PS)	35

Contagem de citações: scholar.google março 2024

2.4. Agência Espacial Europeia

A Agência Espacial Europeia (ESA) é uma organização internacional, atualmente composta por 22 Estados Membros, com a missão de prover e promover as capacidades da indústria espacial da Europa no espaço, no sentido de alcançar sistemas de aplicações operacionais espaciais (ESA, n.d.-d). Tem propósitos pacíficos e intenções de garantir investimentos no espaço que resultem em benefícios para os cidadãos europeus através da coordenação dos recursos financeiros, da cooperação intelectual e tecnológica entre os Estados membros (ESA, n.d.-d).

A ESA emprega cerca de 2200 funcionários de todos os Estados membros, incluindo cientistas, engenheiros, especialistas em tecnologias de informação e administrativos. A ESA investe em cada Estado membro, através de contratos industriais para programas espaciais, uma quantia aproximadamente equivalente à contribuição de cada país. Para 2023 o orçamento foi de 7080 milhões de euros.(ESA, n.d.-b).

A sede da ESA situa-se em Paris onde se decidem as suas políticas e programas, contudo é uma organização com vários centros destinados a diferentes atividades. Os mais importantes estão representados no mapa da Figura 2.26 (ESA, n.d.-b).

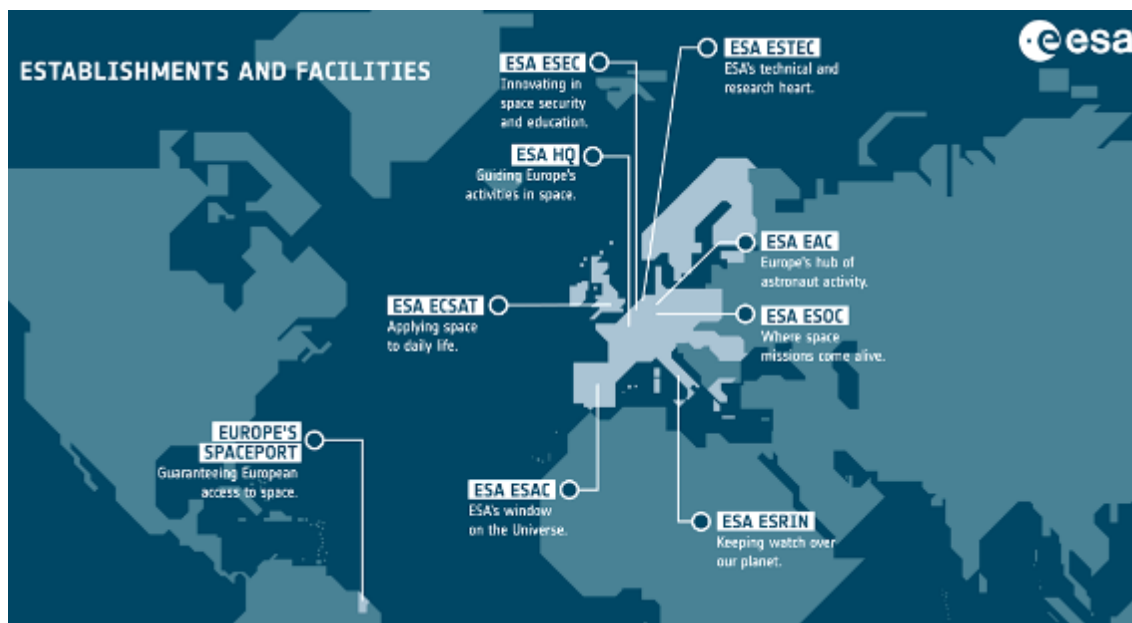


Figura 2.26 - Infraestruturas ESA, fonte:(ESA, n.d.-c)

2.5. Programa Copernicus

Copernicus, denominação em homenagem ao cientista Nicolaus Copernicus, é um programa de observação da Terra ambicioso que fornece informações precisas, oportunas e facilmente acessíveis para que resultem sobretudo numa melhor gestão do meio ambiente e na possibilidade de compreender e mitigar os efeitos das mudanças climáticas e garantir a segurança civil. Esta iniciativa é coordenada e gerida pela Comissão Europeia (CE) que estabelece requisitos e gestão de serviços em parceria com a Agência Espacial Europeia (ESA), responsável pela execução do programa (ESA, n.d.-e).

O programa oferece serviços de informação, acessíveis aos utilizadores de forma gratuita e aberta, baseados na observação da Terra com grandes quantidades de dados globais provenientes de satélites e de sistemas de medição terrestres, aéreos e marítimos. Essas informações são destinadas a ajudar os prestadores de serviços, autoridades públicas e outras organizações internacionais a melhoram a qualidade de vida dos cidadãos europeus e não só (Copernicus, n.d.-c).

O Copernicus é sobretudo servido por um conjunto de satélites das missões Sentinel, para além de contribuições das missões de outros satélites públicos e comerciais. Como se pode observar na imagem da Figura 2.27, além dos satélites já lançados, a União Europeia tem em processo a colocação de 20 outros em órbita até 2030 (Copernicus, n.d.-c).



Figura 2.27 - Missões de observação da Terra desenvolvidas e a desenvolver pela ESA para o programa Copernicus.

Fonte:(ESA, 2023a)

2.5.1. A família dos Sentinel

Os satélites de observação da Terra que fornecem os dados para os serviços Copernicus são constituídos por dois grupos de missões, sendo uma delas composta pelas seguintes missões Sentinel:

- Sentinel-1: opera de dia e noite, realizando imagens de radar de abertura sintética da banda C. Os Sentinel-1 são capazes de adquirir imagens independentemente das condições climáticas. Com os objetivos de efetuar a monitorização terrestre e oceânico, o Sentinel-1 é atualmente composto por dois satélites em órbita polar, sendo que o Sentinel-1B está agora inoperacional devido a uma avaria irreversível. O terceiro previsto, Sentinel-1C, está planeado para ser lançado em 2024, após alguns adiamentos (Copernicus, n.d.-a).
- Sentinel-2: carrega um instrumento ótico para aquisição de alta resolução, facultando imagens multiespectrais aliadas a uma alta frequência de revisitação. O objetivo do Sentinel-2 é a monitorização terrestre e a missão é composta por dois satélites (Sentinel-2A e Sentinel-2B) em órbita polar (Copernicus, n.d.-b).
- Sentinel-3: o objetivo principal desta missão é a observação marinha. São satélites capazes de medir a topografia da superfície do mar, assim como temperatura e cor da superfície do mar e terra. É composto atualmente por 2 satélites em órbita polar (Sentinel-3A e Sentinel-3B), estando o terceiro planeado para ser colocado em órbita a partir de 2026.(Copernicus, n.d.-b).
- Missões Sentinel-4, -5 e -5Precursor (S4, S5, S5P, respetivamente): são concebidas para monitorizar rastros de gases e aerossóis chave para a qualidade do ar, em apoio ao Serviços de Monitorização Atmosférico do Copernicus (CAMS).
- Sentinel-6: é a missão de referência em altimetria por radar para estender o legado da missão TOPEX/Poseidon. Faz medições de altura da superfície do mar e permite dar continuidade à série temporal estável das medições feitas por essa missão anterior. Atualmente está em órbita o satélite Sentinel-6A (Copernicus, n.d.-b).

2.5.2. Sentinel 1

Neste ponto apresenta-se com mais detalhe a missão Sentinel 1 por ser a origem das imagens de satélite utilizadas no trabalho que se apresenta nos próximos capítulos. A missão Sentinel-1 consegue um mapeamento radar contínuo global com frequências de repassagens de 6 dias nas rotas de coberturas prioritárias. Este facto, aliado à pontualidade e confiabilidade para serviços operacionais e aplicações, torna esta missão de grande interesse para a comunidade, especialmente nos casos de haver necessidade de séries temporais longas (ESA, n.d.-f).

Os satélites desta missão (Figura 2.28) carregam um radar de banda C (C-SAR) com 12.3m por 0.82m e tem uma vida útil operacional de sete anos, embora com consumíveis para 12 anos. O Sentinel-1A foi lançado em 3 de abril de 2014 e o Sentinel-1B foi lançado em 25 de abril de 2016. Atualmente, dois outros satélites (Sentinel-1C e Sentinel-1D) estão planeados para substituir os dois primeiros satélites. O objetivo inicial era que a sua substituição tivesse sido feita no final da vida útil operacional, o que não foi concretizado devido à avaria no Sentinel-1B e a problemas relacionados com os foguetões de lançamento (ESA, n.d.-f).



Figura 2.28 - Representação de um satélite da família Sentinel-1. fonte:(ESA, n.d.-f)

O Sentinel-1 é uma nave com 3 eixos, yaw(vertical), pitch(transversal), roll(longitudinal) com sensores solares, de estrelas, giroscópio e campo magnético, com controlo de órbita, atitude e manobra em todos os eixos. Outras características deste satélite são o peso na altura do lançamento de 2300kg, a capacidade de armazenamento de dados de 1410Gb, a propulsão com 130kg de combustível, o controlo térmico, a comunicação com as bases terrestres por dois canais de banda X a 520Mbit/s, para além de capacidade de autonomia

e detecção, identificação e resolução de falhas. O satélite tem ainda duas asas com painéis solares capazes de produzir 5900W em fim de vida com uma capacidade da bateria de 324Ah (Copernicus, n.d.-e).

O sensor ativo C-SAR da banda C do SENTINEL-1, ilustrado na Figura 2.29, pode observar a superfície da Terra a qualquer hora do dia ou da noite, independentemente das condições meteorológicas e ambientais. O SAR tem a vantagem de operar em comprimentos de onda não impedidos por cobertura de nuvens ou falta de iluminação (Copernicus, n.d.-k).



Figura 2.29 - Sentinel-1C em testes de radiofrequências na camara anecoica nas instalações da Thales Alenia Space em Cannes, França. Fonte:(ESA, 2023b)

Orbita do Sentinel-1

O Sentinel-1 está numa órbita baixa quase polar, síncrona ao sol, com um ciclo de repetição de 12 dias e 175 órbitas por ciclo para um único satélite. O Sentinel-1A e o Sentinel-1B compartilham o mesmo plano orbital com uma diferença de fase orbital de 180° (Figura 2.30). Cada satélite Sentinel-1 é mantido dentro de uma margem de órbita de ± 50 m de raio a uma altitude de 693 km, com uma duração de 98.6 minutos por órbita, correspondente a uma velocidade de cerca de 27000km/h (Copernicus, n.d.-d).

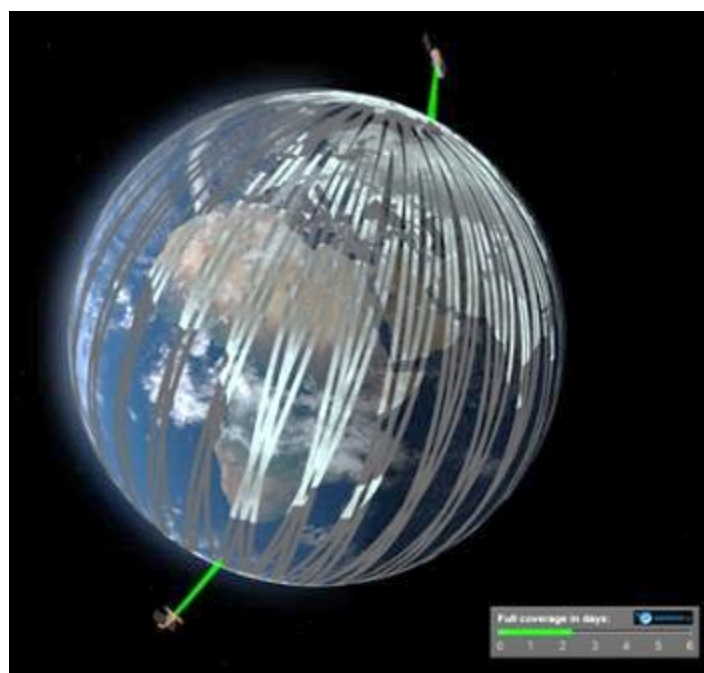


Figura 2.30 - Representação das órbitas pela constelação Sentinel 1. Fonte:(Copernicus, n.d.-d)

Cobertura

Um único satélite da missão Sentinel-1 é capaz de mapear o mundo a cada 12 dias. Com uma constelação de 2 satélites, podemos observar na Figura 2.31 que é possível uma repetição de ciclo a cada 6 dias com frequência de coberturas de 1 dia para a Europa, isto é, com passagem ascendente e descendente sobre mesmo ponto (Copernicus, n.d.-e). Devido à variação do espaçamento das trajetórias de órbita com a latitude, o tempo de repassagem ascendente e descendente é significativamente maior em latitudes mais altas quando comparado ao equador (Copernicus, n.d.-a).

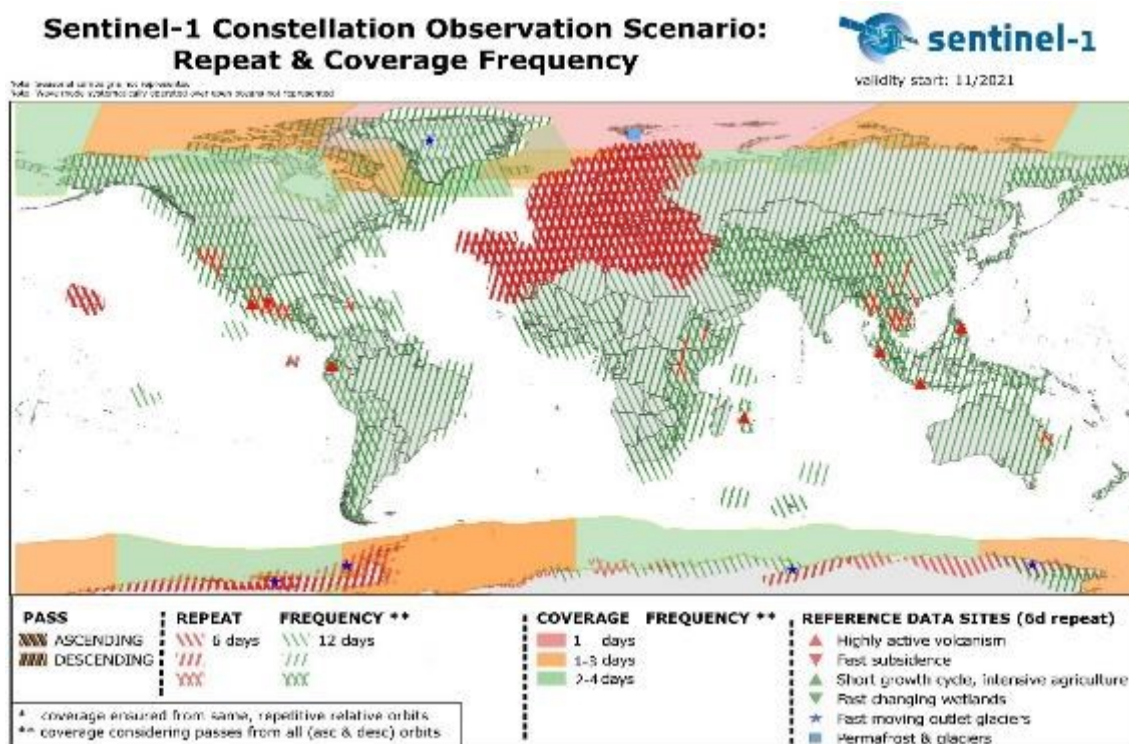


Figura 2.31 - Cenário de observação pela constelação, repetição e frequência. Fonte: (Copernicus, n.d.-e)

Os satélites de órbita polar apresentam duas trajetórias para uma mesma área geográfica, sendo uma correspondente a uma passagem ascendente e a outra a uma passagem descendente. A título de exemplo, apresenta-se na Figura 2.32 um exemplo da passagem do Sentinel-1A em território de Portugal continental. A imagem do lado esquerdo (a) representa a passagem ascendente no dia 18 de janeiro de 2023 pelas 19 horas, enquanto a da direita (b) mostra a passagem descendente no dia 19 de janeiro de 2023 pelas 7 horas e o seu posicionamento relativamente à passagem ascendente (ESA, n.d.-a). Esta informação é particularmente importante para fazer conjugações entre os valores obtidos das duas trajetórias, como será apresentado no Capítulo 3.

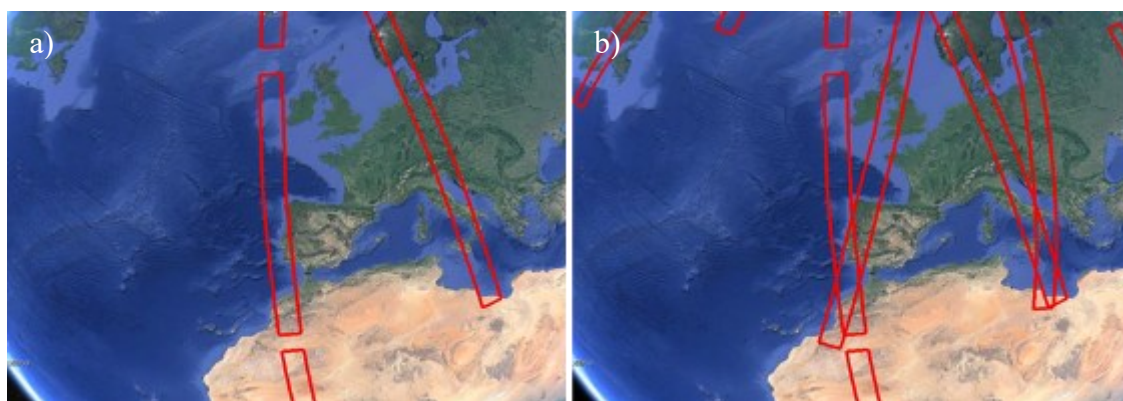


Figura 2.32 - Extrato de parte do plano de aquisição pelo Sentinel-1A em passagem ascendente e descendente. Fonte: (ESA, n.d.-a)

Modos de aquisição

Os satélites desta missão Sentinel 1 transportam um instrumento C-SAR que suporta a operação em dupla polarização (HH+HV, VV+VH), implementada através de uma cadeia de transmissão (comutável para H ou V) e duas cadeias de receção paralelas para polarização H e V. Estes satélites operam em 4 modos exclusivos de aquisição: Stripmap (SM), Interferometric Wide swath (IW), Extra-Wide swath (EW) e Wave mode (WV), conforme referido no ponto 2.1.11 e representado na Figura 2.14 onde se pode observar as geometrias para cada modo (Copernicus, n.d.-i).

Os modos SM, IW e EW suportam operação em polarização única seleccionável (HH ou VV) e dupla polarização (HH+HV, VV+VH). O modo WV suporta apenas polarização única seleccionável (HH ou VV) (Copernicus, n.d.-i).

O modo Stripmap (SM) adquire dados numa faixa de 80 km com resolução espacial ligeiramente superior a 5 m por 5 m. É um modo mais usado em pequenas ilhas e casos excepcionais como suporte à gestão de emergências (Copernicus, n.d.-o).

No modo EW os Sentinel adquirem dados numa faixa de 400 km com resolução espacial de 20 m por 40 m, usado sobretudo para cobrir zonas polares e certas zonas marinhas para monitorização de gelo, derrames e segurança marítima (Copernicus, n.d.-j).

O modo Wave adquire dados em áreas de 20 km por 20 km (vinhetas), com resolução espacial de 5 m por 5 m, a cada 100 km ao longo da órbita, adquiridos alternadamente em dois ângulos de incidência diferentes. É o modo padrão para cobertura sobre os oceanos (Copernicus, n.d.-p).

Por último, o modo Interferometric Wide swath (IW) é o principal modo de aquisição sobre a terra. Os dados são adquiridos numa faixa de 250 km com resolução espacial de 5 m por 20 m. Através do TOPSAR (ponto 2.1.10) a resolução azimutal é reduzida em comparação com SM devido ao menor tempo de iluminação do *burst*. (Copernicus, n.d.-l).

Tipos de produtos

Os produtos de dados do Sentinel são disponibilizados de forma sistemática e gratuita para todos o tipo de utilizadores, de forma a permitir a sua utilização para fins científicos, comerciais e outros pretendidos pelo público em geral. Todos os produtos de dados são distribuídos no formato Sentinel Standard Archive Format for Europe (SAFE). Os dados são disponibilizados no prazo de 1 hora para casos de emergência, de 3 horas para áreas prioritárias e de 24 horas para arquivos armazenados sistematicamente.

Cada modo pode potencialmente produzir produtos em SAR Level-0, Level-1 SLC, Level-1 GRD, and Level-2 OCN, conforme se ilustra na Figura 2.33 (Copernicus, n.d.-f).

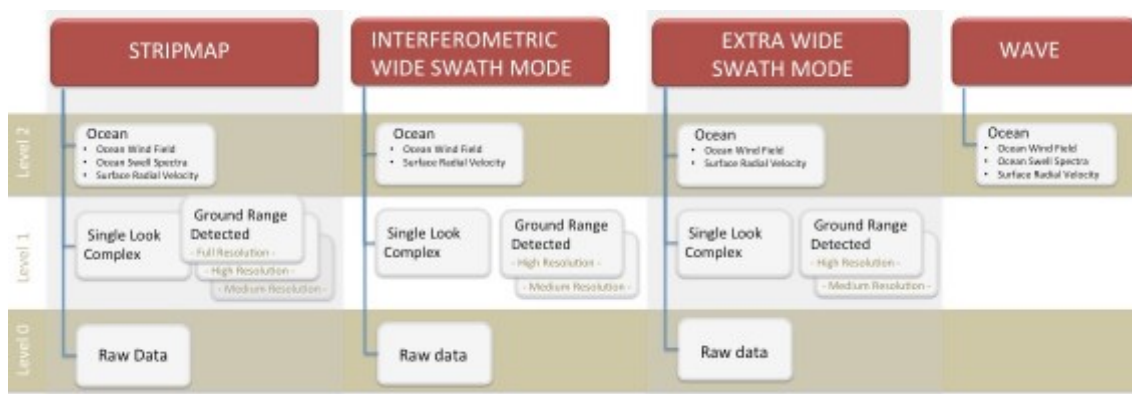


Figura 2.33 - Representação gráfica dos produtos do Sentinel-1. Fonte: (Copernicus, n.d.-f)

Os produtos *Level-1 Ground Range Detected* (GRD) consistem em dados SAR, *multi-looked*⁸ e projetados no alcance terrestre usando o modelo de elipsoide da Terra WGS84. A projeção do elipsoide dos produtos GRD é corrigida usando a altura do terreno especificada nos metadados do produto. A altura do terreno usada varia no azimute, mas é constante no alcance. Os valores dos pixels representam a amplitude detetada e a informação de fase é perdida. O produto resultante tem pixels com resolução aproximadamente quadrada e espaçamento de pixel quadrado com *speckle* reduzido a custo de resolução espacial reduzida (Copernicus, n.d.-m).

Os produtos *Level-1 Single Look Complex* (SLC) consistem em dados SAR focados, geo-referenciados usando dados de órbita e altitude do satélite, fornecidos na geometria de alcance oblíquo. O alcance oblíquo é a coordenada natural de observação de alcance de

⁸ Processo para produzir imagens com tamanho de pixel nominal, fazendo médias sobre resolução em alcance e/ou azimute. Fazer média de diferentes vistas de uma imagem resulta em perda de resolução.

radar, definida como a linha de visão do radar para cada objeto refletor. O processamento para todos os produtos SLC resulta num *single look* em cada dimensão, usando toda a largura de banda de sinal disponível. Cada pixel de imagem contém informações tanto de amplitude quanto de fase (Copernicus, n.d.-m).

O Nível 2 consiste em produtos geofísicos geo-localizados derivados do Nível 1. Existe apenas um produto padrão de Nível 2 destinado a aplicações na área do vento, ondas e correntes - o produto Nível 2 Ocean (OCN). Este produto pode conter os seguintes componentes geofísicos derivados dos dados SAR(Copernicus, n.d.-n):

- Ocean Wind field (OWI)
- *Ocean Swell spectral* (OSW)
- *Surface Radial Velocity* (RVL).

2.6. Softwares para processar imagens satélites

O lançamento do conjunto de satélites, nomeadamente da família Sentinel (descritos em 2.5.1), tem sido um catalisador para um interesse cada vez maior entre governos e diferentes sectores de mercado a criar programas de monitorização, cada um com necessidades de utilizador diferentes. Há dois softwares importantes no que toca ao estudo de dados provenientes de satélites, o GAMMA e o SNAP - *Sentinel Application Platform* (Truckenbrodt et al., 2019).

O Software GAMMA é um software comercial desenvolvido e mantido pela GAMMA. É um software que suporta toda a cadeia de processamento, desde dados brutos SAR até produtos como modelos digitais de elevação, mapas de deslocamento e mapas de uso do solo (GAMMA, 2023).

O SNAP é um programa de código aberto que contém ferramentas da Agência Espacial Europeia (ESA) para exploração de dados de observação da terra, disponibilizando uma interface de usuário amigável e sem necessidade de programação. O uso deste software tem crescido desde o seu lançamento e veio reduzir barreiras de acesso/uso dos dados SAR, pelo facto de ter sido projetado para garantir o melhor desempenho ao lidar com imagens muito grandes, como as fornecidas pelo Sentinel (Truckenbrodt et al., 2019).

Uma das ferramentas do SNAP é o StaMPS Export que faz a ponte entre a preparação das imagens SAR e as análises interferométricas mais avançadas, ou seja, os dados ficam preparados para serem utilizados no StaMPS (A. Hooper et al., 2018).

O SNAP é gratuito e mais amigável na utilização e na criação de fluxos de trabalhos, enquanto que o GAMMA usa uma linha de comandos mais básica e requer mais experiência para criar fluxos de trabalho, embora seja depois mais rápido e robusto, quando comparado SNAP6 (Truckenbrodt et al., 2019).

2.7. Aplicações InSAR

Na primeira década do século XXI as principais aplicações de PSI são na subsidência e elevação, deslizamentos de terras e geofísica. Como exemplo de subsidência e elevação temos estudos na mineração, captação e recarga de águas subterrâneas e no risco de cheias. Na área da geofísica, por exemplo, os estudos estavam concentrados nas placas tectónicas e na vulcanologia. Como exemplo de deslizamentos de terras há alguns estudos sobre a sua monitorização (Crosetto et al., 2016).

Já na segunda década do século XXI, além de mais aplicações em deslizamentos de terras, nomeadamente na inventariação, análise e modelação, verifica-se também um aumento significativo de aplicações em áreas urbanas. Nessa altura aparecem mais estudos InSAR aplicados a infraestruturas, prédios, barragens, áreas de construções e reclamações de terras (Crosetto et al., 2016).

Um desses estudos compara as velocidades de deslocamento calculadas com o SARPROZ para uma área da baixa de Lisboa com as obtidas a partir de operações de nivelamento (Roque et al., 2014). Nessa análise, foram usadas 19 imagens SAR de uma passagem ascendente do satélite Envisat adquiridas a cada 35 dias entre agosto de 2008 e maio de 2010. A qualidade dos resultados obtidos foi avaliada pela comparação com os dados de levantamentos topográficos da ala ocidental da Praça do Comércio, como se pode observar na imagem da Figura 2.34, tendo-se concluído que diferenças registadas na velocidade de deformação são da ordem de 1mm/ano.

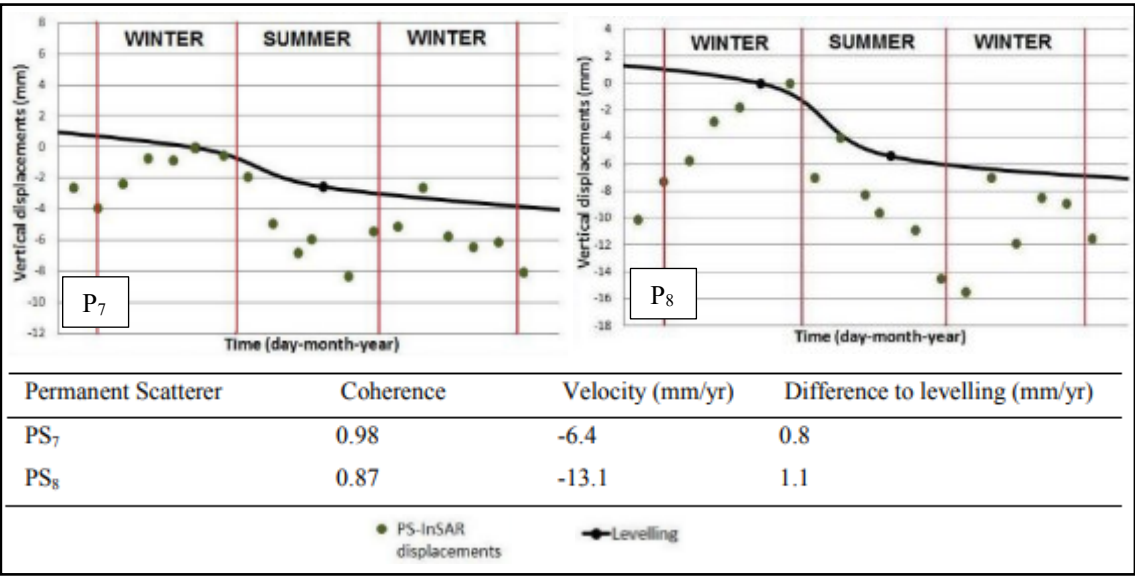


Figura 2.34 - Deslocamentos verticais PS7 e PS8, velocidades e coerência dos mesmos. Fonte:(Roque et al., 2014).

2.7.1. Aplicações InSAR em Pontes

A maioria dos estudos *Multi-Temporal satellite-based differential interferometry* (MTInSAR) para monitorização estrutural de pontes analisa casos únicos pré-definidos onde as pontes são usadas como alvos para processar conjuntos de dados SAR e há uma elaboração manual da estrutura dos PS em ambiente SIG. Esta abordagem refinada específica para a estrutura requer conhecimento prévio das características estruturais das pontes, o que pode não ser adequado para aplicações de monitorização em grande escala (Nettis et al., 2023). Para ultrapassar essa dificuldade, o trabalho de Nettis *et al.* (2023) apresenta uma metodologia com o nome *SATellite-based BRidge monitoring via Interferometry* (SABRI), com as seguintes características:

- Inclui uma análise preliminar de interferometria baseada num algoritmo de interferometria de PS que utiliza a técnica *Stable Point INterferometry even over Un-urbanised Areas* (SPINUA) para gerar um conjunto de PS para uma determinada área de interesse;
- Explora os resultados dessa análise de interferometria com uma cadeia de geoprocessamento para gerir a distribuição espacial de dados PS e identificar automaticamente cenários de deformação de pontes;
- Define classes de deformação específicas para pontes, medindo as possíveis consequências em termos de danos estruturais do cenário de deformação, bem como classes prioritárias definidas tendo em conta a "urgência" de uma avaliação / monitorização mais detalhada;
- Disponibiliza um guia para a implementação do algoritmo e considerações adicionais.

SABRI foi desenvolvido para as redes rodoviárias de Roma, na região central da Itália, e para a área metropolitana de Bari, no sul da Itália, utilizando dados de satélite Sentinel-1 e COSMO-SkyMed. Os resultados são descritos em termos de densidade espacial de PSs, classe de deformação e classe de prioridade para as pontes investigadas. Com referência às áreas de estudo investigadas e ao conjunto de dados SAR adotado, Nettis *et al.* (2023) observaram uma cobertura espacial apropriada de PSs em pontes de autoestradas, enquanto a densidade de PSs é insatisfatória em partes de pontes de estradas de nível mais baixo quando a análise é limitada a Sentinel-1. A metodologia permitiu a identificação de 47 e 19 pontes com classe de prioridade média-alta nas redes rodoviárias de Roma e Bari, respetivamente.

Essa metodologia também foi avaliada com base em duas pontes italianas – uma em Albiano-Magra previamente afetada por um colapso global, e outra em Fossano, previamente afetadas por um colapso parcial. Para ambos os casos, foi identificada uma classe de deformação média-alta.

Em Albiano Magra, a análise interferométrica confirmou os resultados de outros estudos anteriores que relataram deslocamentos diferenciais possivelmente relacionados à ativação de um deslizamento de terra nas imediações (Figura 2.35).

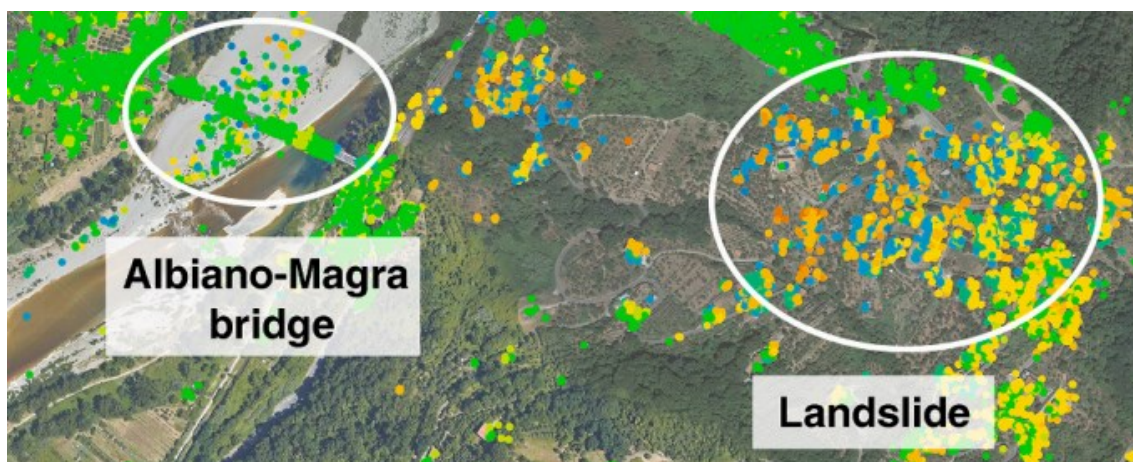


Figura 2.35 - Análise MTInSAR da ponte Albiano-Magra colapsada. Fonte:(Nettis et al., 2023)

Para a ponte em Fossano, a análise de interferometria com dados Sentinel-1 de banda C produziu PSs com uma velocidade de deslocamento superior a 7,5 mm/ano de 2015 a 2020, localizados sobre o vão da ponte colapsada, como se pode observar na Figura 2.36.

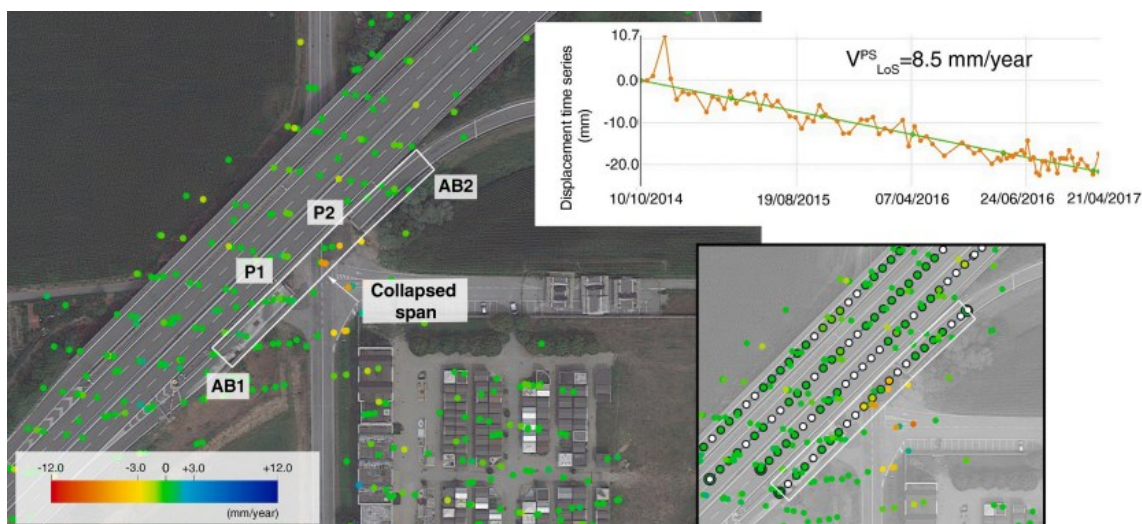


Figura 2.36 - Análise MTInSAR para a ponte em Fossano. Fonte:(Nettis et al., 2023)

Outro estudo interessante como sistema de gestão com aplicação InSAR em pontes é a *Monitorização automática de portefólio de pontes por meio da integração de catálogos InSAR e SIG* de (Bianchini Ciampoli et al., 2019). Numa primeira etapa são localizadas as estruturas numa área de interesse, consultando dados disponíveis provenientes de OpenStreetMap e extraíndo esses dados usando OverpassTurbo. Numa segunda fase, é realizada uma análise InSAR nomeadamente uma abordagem PSI - *Persistent Scatterer Interferometry* das zonas que contem as pontes identificadas (Figura 2.37). Depois, o conjunto de dados PS - *Persistent Scatterers* (Difusores Persistentes) é combinado tendo em conta uma distância de 30m com a posição das pontes dentro da rede inspecionada, o que torna possível seleccionar apenas os PS úteis (Figura 2.38). É dado um exemplo de resultados obtidos onde foram encontradas velocidade deslocamentos entre -8mm/ano e -4mm/ano num viaduto da linha férrea sobre a estrada Via Appia Nuova em Roma, Itália.



Figura 2.37 - Resultado da análise InSAR



Figura 2.38 - Resultado da aplicação da metodologia

Em paralelo com as aplicações anteriormente referidas, aparecem também vários trabalhos sobre aplicações pontuais a pontes, como os que se referenciam na tabela Tabela 2.5, que validam a utilização da técnica InSAR para monitorização dos seus deslocamentos.

Tabela 2.5 - Principais casos de estudo sobre uso de SAR em pontes. Adaptado de (Nettis et al., 2023)

Autores	Caso de estudo	Dados SAR
(Fornaro et al., 2013)	Musmeci bridge in Potenza (Italy)	TSX A (2010-11)
(J. J. Sousa & Bastos, 2013)	Historic 336 m-long steel truss bridge in Oporto (Portugal) collapsed in 2001	ERS-1/2 A/D (1995-2001)
(Bakon et al., 2014)	Bridge in Bratislava (Slovakia) affected by crash of a tug	ENV A/D (2002-10)
(Lazecky et al., 2015)	Three bridges in Bratislava (Slovakia), Ostrava (Czech Republic) and Hong Kong	ERS (1996-2001), ENV (2002-10), TSX (2013-14)
Crosetto et al. (2015)	Multi-span girder bridge in Barcelona (Spain)	TSX (2007-09)

(Del Soldato et al., 2016)	Multi-span girder bridge in Valencia (Spain)	ALOS A (2007-10) CSK (2010-12)
(Lazecky et al., 2017)	Two ordinary bridges (Czech Republic)	TSX A/D (2013-15)
(Zhao et al., 2017)	750 m-long steel arch bridge in Shanghai (China)	CSK A (2008-10)
(Peduto et al., 2018)	Ordinary bridge portfolio in Amsterdam (The Netherlands)	TSX A (2009-16)
(Qin et al., 2017)	Steel arch bridge in Shanghai (China)	TSX D (2009-10)
(Q. Huang et al., 2017)	Nanjing Dashengguan railway bridge across the Yangtze river (China)	SNT A (2015-16)
(Qin et al., 2018)	Two case-study arch bridges (China)	TSX D, CSK A/D (2009-10)
(Cusson et al., 2018)	Four-span steel box girder roadway bridge in Ontario (Canada)	RAD A (2014-16)
(Selvakumaran et al., 2018)	Historic nine-arch masonry bridge in Tadcaster (UK)	TSX (2014-15)
(H. Huang et al., 2018)	Two long-span steel truss bridges in China	SNT A (2015-18)
(Karimzadeh et al., 2018)	Multi-span arch bridges (1.8 kms- long) on Lake Urmia Causeway (Iran)	ENV (2004-08), ALOS-1 (2006-10) TSX (2012-13) SNT (2015-17)
(Qin et al., 2019)	Three arch and cable-stayed bridge (China)	CSK A (2009-10, 2015-17) TSX D (2007-08, 2009-10)
(Jung et al., 2019)	Long extradosed prestressed concrete box girder bridges (Korea)	SNT A/D (2014-18) CSK D (2013-17)
(Hoppe et al., 2019)	Two posttensioned bridges in Virginia (United States)	TSX A/D (2016-18)
(Liu et al., 2019)	Continuous-girder prestressed urban bridge in Beijing (China)	CSK D (2011-17)
(Ma et al., 2019)	High-speed railway bridge (China)	CSK A (2014-17)
(Milillo et al., 2019)	Polcevera bridge in Genoa (Italy) collapsed in 2018	SNT A/D (2015-18) CSK A/D (2009-18) ENV A/D (2003-2010)
(Alani et al., 2020)	Multi-span historical masonry arch bridge (UK)	SNT A (2015-17)
(Lanari et al., 2020)	Polcevera bridge in Genoa (Italy) collapsed in 2018	CSK A/D (2009-18)
(Vadivel et al., 2020)	Kimdaejung bridge and Deokyang bridge	CSK A/D (2013-19)
(Xiong et al., 2021)	Hong Kong–Zhuhai–Macao Bridge (HZMB)	SNT A (2018-20)
(Cusson et al., 2021)	Historic (3 km-long) steel truss bridges in Montreal (Canada)	RAD A/D (2016-18)
(Schlögl et al., 2021)	Integral concrete bridge in Vienna (Austria)	SNT A/D (2016-19)

(Markogiannaki et al., 2022)	Polyfytos bridge (long curve prestressed reinforced concrete structure, Greece)	SNT A/D (2014-20)
(Macchiarulo et al., 2022)	Himera viaduct in Sicily (partial collapse in 2014 caused by landslides)	SNT A/D (2014-20) ENV A/D (1992-2010) CSK A/D (2008-14)
(Giordano et al., 2022)	Palatino bridge (steel truss bridge) in Roma (Italy)	CSK A/D (2011-2019)

Um dos mais importantes, especialmente em Portugal, é um estudo sobre o colapso da ponte Entre-os-Rios em 2001 (J. J. Sousa & Bastos, 2013). O estudo não teve intenção de confirmar ou contradizer a versão oficial das causas do acidente, mas sim demonstrar as potencialidades das técnicas interferométricas multitemporais para deteção e monitorização de deformações em estruturas como pontes.

O estudo usou 52 imagens da missão *European Remote Sensing* (ERS)1/2 (resolução: 26m alcance; 6 a 30m em azimuth) num período de 1995 até à data do colapso em 2001. Foram testadas algumas abordagens, mas sobretudo foi usada a ferramenta StaMPS, nomeadamente a capacidade de combinação de métodos PSI e SB, ou seja, identificação de pixels PS e pixels DS. O trabalho refere que, com SAR de alta resolução (como o TerraSAR-X e o COSMO-SkyMed), mesmo as pequenas pontes são cobertas por um grande número de pixels.

A área à volta dessa ponte demonstrou uma estabilidade alta na deformação, tendo sido apenas detetadas deformações significativas na estrutura na secção que colapsou, embora não tenha sido possível identificar se a componente da ponte responsável pela reflexão foi o pilar ou o tabuleiro.

Como se pode verificar na Figura 2.39, foi percecionada uma tendência de movimento significativa na zona da ponte, com uma velocidade aproximadamente constante ao longo dos três períodos de tempo estudados (1995–1996, 1997–1998 e 1999–2000). A taxa de velocidade máxima detetada foi de 20mm/ano em LOS, precisamente sobre a secção colapsada, correspondentes a cerca de 10 cm de deslocamento vertical e a cerca de 21 cm de deslocamento horizontal entre 1995 e 2001.

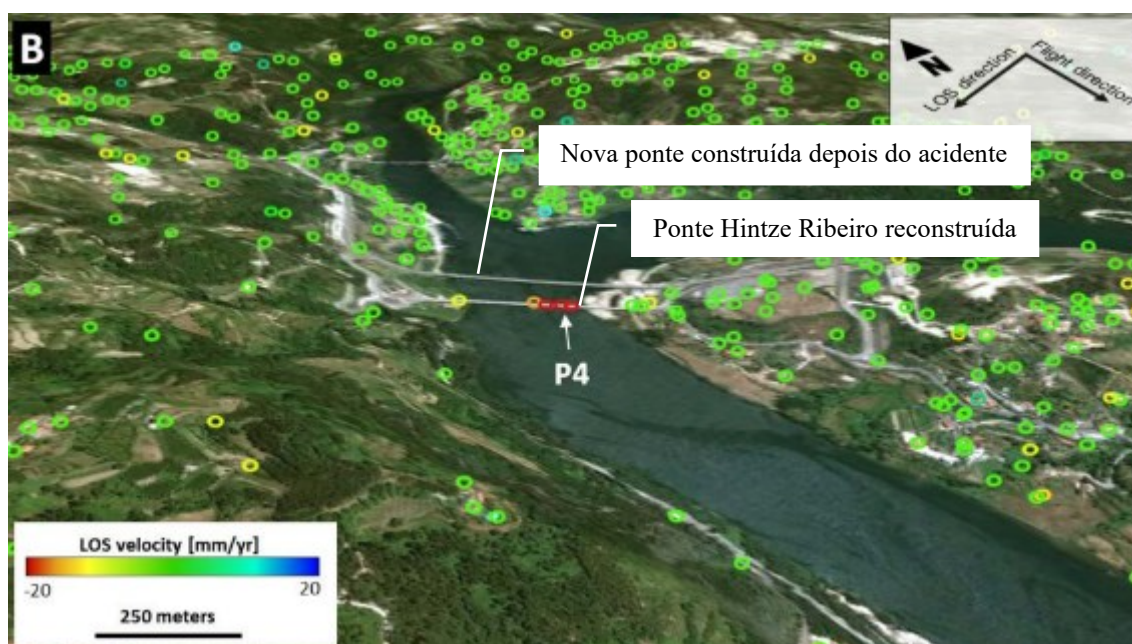


Figura 2.39 - Pontos PS e respetiva velocidade em LOS sobre mapa atualizado da zona. (J. J. Sousa & Bastos, 2013)

Em (Schlögl et al., 2021) é apresentada uma framework para monitorizar a deformação de infraestruturas críticas, neste caso sobre uma ponte de betão armado no porto de Vienna, aplicando PSI, mais especificamente StaMPS sobre imagens Single Look Complex (SLC) da missão Sentinel 1.

A análise da série temporal é refinada no pós-processamento, que inclui procedimentos para limpar (uso de interpolação linear com a ferramenta *Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise* (TRAIN) incorporada com StaMPS), suavizar (recorrendo a 4 métodos: *namely locally weighted scatterplot smoothing* LOESS; *generalised additive models* GAM; *Friedman's Super Smoother*; *Whittaker smoother*) e correção da temperatura da serie temporal para ambas as órbitas (ascendente e descendente). Os dados são comparados com medições de deformação *in situ* e foi concluído que, apesar de restrições quanto à resolução espacial e uma sub-ótima razão ruído-sinal, as análises MT-InSAR com recurso a imagens Sentinel 1 podem levar a resultados promissores se um pós-processamento apropriado for aplicado. Assim os resultados foram tidos como consistentes, com melhor desempenho na estimativa da deformação vertical quando comparado com medições *in situ* (Schlögl et al., 2021).

Vadivel *et al.* (2020) apresenta outro estudo PSI que faz uso do StaMPS para produzir uma Série temporal com base em imagens da missão Cosmo-Skymed sobre a região Mokpo e Yeosu na Coreia do Sul, mais especificamente para as pontes Kimdaejung e Deokyang. A velocidade de deslocamento para a ponte Deokyang não foi significativa, enquanto que

a velocidade de deslocamento para a ponte Kimdaejung foi estimada em -8.8mm/ano correspondentes a um intervalo de 25 a -35mm durante os 7 anos avaliados.

Com o objetivo de monitorizar deformação a longo prazo em pontes, Jung et al. (2019) apresenta um estudo que demonstra uma metodologia de pós processamento para obter deslocamentos verticais e longitudinais e consequente deflexão a longo prazo e dilatação térmica a partir de uma análise PSI. O estudo fez uso do StaMPS com imagens das missões Sentinel 1 e COSMO-SkyMed sobre as pontes Kimdaejung e Muiyoung na Coreia do Sul. Foram detetados deslocamentos de longo prazo em ambas as pontes. Para a ponte Muiyoung foi identificando com clareza o aumento progressivo da deformação do tabuleiro da ponte entre pilares, de 8, 12, 17 e 22 mm no final dos anos de 2013, 2014, 2016 e 2017. Para a ponte Kimdaejung, no vão central, foi detetado um deslocamento de -47mm no final do período de observação. Em ambas as pontes, foi verificado similaridade no nível de deslocamento entre Sentinel 1 e COSMO-SkyMed.

Outra aplicação do StaMPS PSI com imagens da missão Sentinel 1 de janeiro de 2018 a novembro de 2020, foi realizada na ponte Hong Kong–Zhuhai–Macao por Xiong et al. (2021), tendo sido estimado uma subsidência de 10 mm/ano no Terminal de Passageiros Zhuhai-Macau, 17mm/ano na ilha artificial oriental e 17mm/ano nos edifícios do Terminal de Passageiros de Hong Kong, sendo menos expressivos os deslocamentos associados à ponte principal como demonstrado em a) na Figura 2.40.

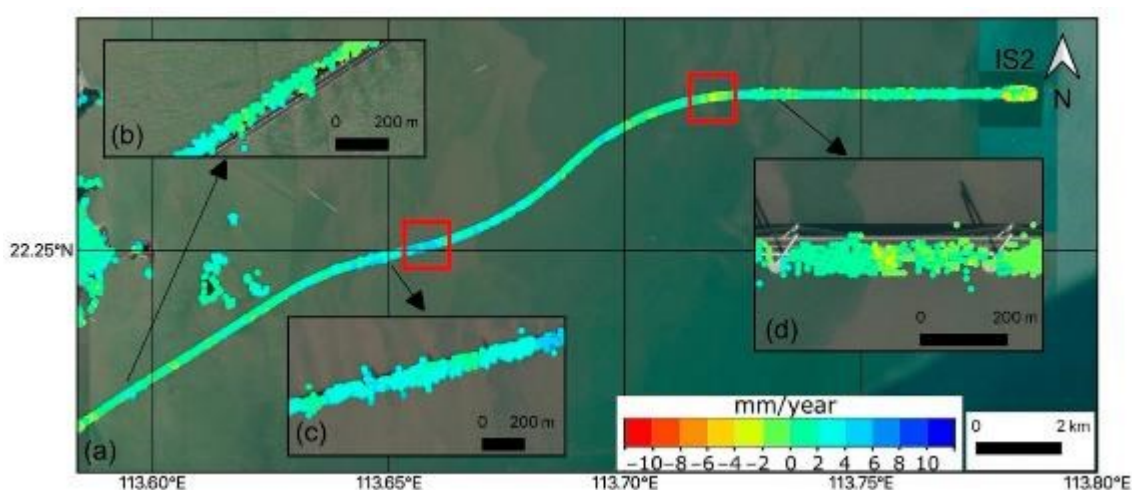


Figura 2.40 – Deslocamento em (a) principal ponte HZMB e três outras pontes: (b) JZB, (c) JHB e (d) QZB. Fonte: (Xiong et al., 2021)

Com a aplicação de MT DInSAR a pontes é possível observar um padrão simétrico progressivo de deformação superficial com uma subsidência que aumenta com o

afastamento aos pilares e atine um pico nos vãos centrais (Qin et al., 2018). Nesse trabalho, os autores validam a utilidade da metodologia para a monitorização de pontes e acreditam que será uma das principais técnicas associada à próxima geração de gestão de pontes. Para além disso, o estudo reforça que poderá vir a haver ainda mais melhorias com a integração futura de vários sensores SAR em pontes.

Há estudos que referem que com MTInSAR e com refletos artificiais se pode conseguir precisão sub-centimétrica (Nettis et al., 2023). Para além disso, em termos de precisão, os resultados serão melhores se em vez de usar dados de imagens de satélites como o Sentinel, de acesso gratuito, se passar a usar imagens de satélites com melhor resolução (Lasri et al., 2023).

Selvakumaran *et al.*, (2018) também estudou o colapso parcial por infraescavação da ponte de Tadcaster, em Inglaterra, tendo conseguido detetar alterações relevantes nos dados mais de um mês antes do colapso efetivo. No entanto, é de realçar que pode haver dificuldade em prever colapsos por movimentos rápidos, como o da ponte Morandi (Gagliardi et al., 2023).

A derivação da resposta térmica pode ajudar a isolar os componentes reversíveis associados a variações térmicas dos componentes irreversíveis associados à acumulação de deslocamento, auxiliando na estimativa das taxas reais de velocidade deslocamento (Markogiannaki et al., 2022).

Ma *et al.*, (2019) procura usar dados da missão COSMO-SkyMed para monitorização de deformações submilimétricas sem pontos de controle terrestres numa ponte ferroviária de alta velocidade. No entanto, a validação do nivelamento mostra que é difícil alcançar uma precisão submilimétrica na deformação em séries temporais devido às incertezas decorrentes de dados terrestres incorretos, diferença de localização e tempo entre os dados InSAR e dados *in situ*, presença de deformação lateral, remoção inadequada da fase atmosférica e inconsistência entre temperatura do ar e da ponte. Por outro lado, o estudo referido consegue demonstrar a capacidade de monitorização de alta precisão(submilimétrica) das tecnologias InSAR na velocidade de deformação linear.

2.7.2. InSAR com Inteligência Artificial

Atualmente os estudos que se centram sobre o tema InSAR estão ainda a produzir novos procedimentos com incorporação de algoritmos ditos de inteligência artificial (AI - *Artificial Intelligence*). Uma pesquisa na biblioteca b-on mostra um aumento considerável de publicações que envolvem InSAR com recurso a AI nos últimos anos, conforme se pode verificar na Figura 2.41.



Figura 2.41 - Contagem de artigos na biblioteca b-on sobre InSAR e AI

Em alguns casos as ferramentas AI são incorporadas na análise dos resultados das abordagens InSAR (Novellino et al., 2021), (Hakim et al., 2020), (Hussain et al., 2022), (Chen et al., 2021), (Ranjgar et al., 2021) e noutros casos são mesmo aplicadas nas próprias abordagens (Anantrasirichai et al., 2018, 2019, 2020), (Rouet-Leduc et al., 2021), (Bregman & Barnhart, 2021), (van Natijne et al., 2022). A incorporação da AI nestes trabalhos foi mais concentrada na generalidade sendo espectável a aplicabilidade mais tardia a estruturas mais específicas como as pontes.

Como exemplo do recurso a AI para análise dos resultados, pode referir-se a avaliação da suscetibilidade recorrendo ao uso do algoritmo de aprendizagem de máquina, denominado de adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS), para subsidência da superfície, em Shahryar County, na provincia de Tehran no Irão (Ranjgar et al., 2021). Para esse efeito, o resultado da abordagem PSI foi dividido em duas partes, 70% para treinar e 30% para testar o modelo. Foram usados 11 fatores condicionantes como

altitude, uso do solo e distancia a linhas de água. A Figura 2.42 apresenta um diagrama da metodologia adotada nesse estudo.

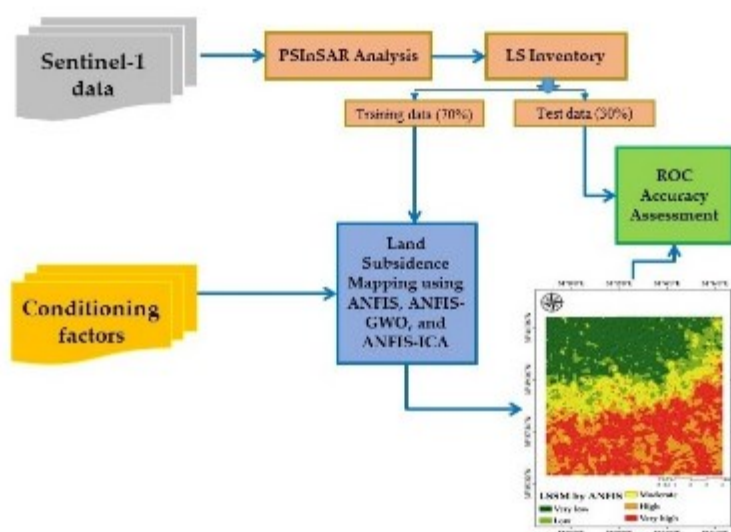


Figura 2.42 - Diagrama geral da metodologia (Ranjgar et al., 2021)

Esta metodologia resultou numa raiz quadrada da média das diferenças quadradas (RMSE - *Root Mean Square Error*) superior a 0.90 que demonstrou a efetividade e a aplicabilidade noutras regiões com diferentes parâmetros ambientais.

A descompactação da fase é um dos processos mais importantes em InSAR e tem sido objeto de abordagens com base em AI ao longo das últimas décadas. A Figura 2.43, relativa aos anos de 1995 a 2020, ilustra o crescimento do número de publicações relacionadas com desenrolar de fase baseado em AI, sobretudo a partir do ano de 2018. (Zhou et al., 2021).

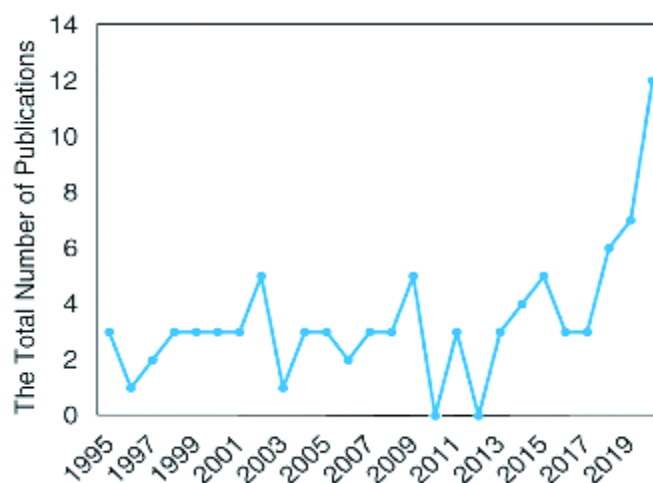


Figura 2.43 - N° de publicações sobre desenrolar de fase com base em AI. Fonte: (Zhou et al., 2021)

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO REMOTA DE DESLOCAMENTOS EM ESTRUTURAS

Neste capítulo é feita a apresentação da metodologia estudada e desenvolvida para determinação remota de deslocamentos em estruturas no âmbito de um sistema de gestão de pontes.

3.1. Metodologia

Este estudo recorre essencialmente ao uso de imagens SAR fornecidas pelo programa Copernicus, ao uso do software SNAP igualmente fornecido pelo Copernicus e ESA, ao software StaMPS e respetivas dependências e ainda ao QGIS.

A cadeia de processos usada neste trabalho está conforme os kits de treino haza09 e haza12 criados pela antiga RUS (*Research and User Support for Sentinel Core Products*) a partir do caso de estudo em (Serco Italia S.p.A., 2021), também de acordo com (Blasco et al., 2019), (Foumelis et al., 2018) e pelo manual StaMPS (A. Hooper et al., 2018). A abordagem adotada vai ao encontro de outros estudos já mencionados em 2.7.1. Os estudos considerados como referência para a elaboração e aplicação da metodologia que se apresenta estão indicados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Fontes de referência para abordagem PSI adotada com uso de imagens SLC Sentinel 1.

Autores	Publicações / tutoriais
(Serco Italia S.p.A., 2021)	SNAP2StaMPS: Data preparation for StaMPS PSI processing with SNAP - Mexico City 2020 (HAZA9 & HAZA12)
(A. Hooper et al., 2018)	StaMPS/MTI Manual Version 4.1b
(Foumelis et al., 2018)	Esa Snap - Stamps Integrated Processing for Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry
(Blasco et al., 2019)	Measuring Urban Subsidence in the Rome Metropolitan Area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS Persistent Scatterer Interferometry
(Jung et al., 2019)	Long-Term Deflection Monitoring for Bridges Using X and C-Band Time-Series SAR Interferometry
(Haghighi & Motagh, 2017)	Sentinel-1 InSAR over Germany: Large-scale interferometry, atmospheric effects, and ground deformation mapping

A cadeia de processos da metodologia está esquematizada na Figura 3.1, com quatro etapas: a escolha dos dados, a formação da pilha interferométrica, a análise StaMPS, e a pós análise, neste caso, estimativa de deslocamentos além de LOS.

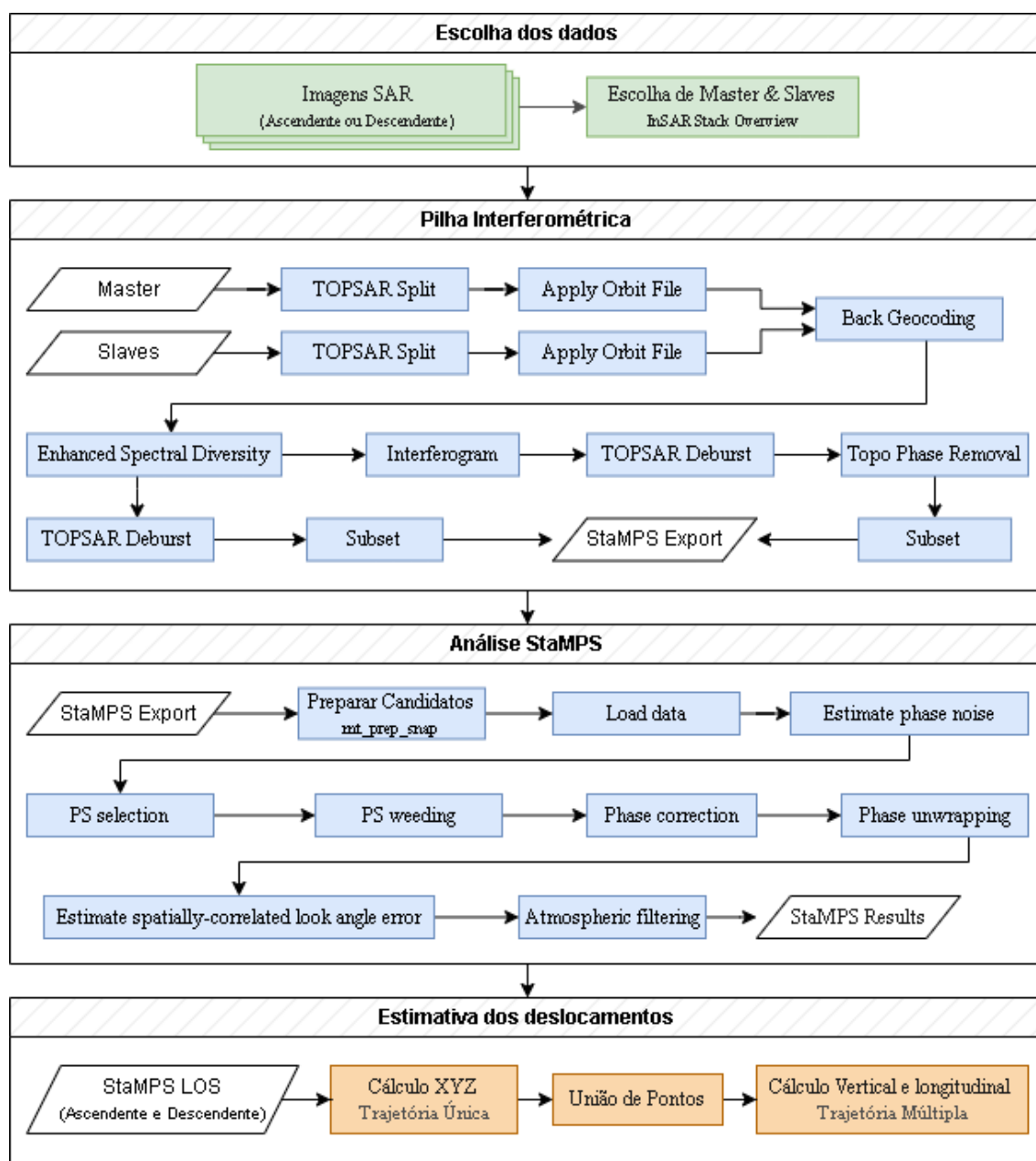


Figura 3.1 - Esquemas dos processos, a abordagem PSI e pós processamento. Adaptado de (Foumelis et al., 2018), (Blasco et al., 2019), (Serco Italia S.p.A., 2021) (A. Hooper et al., 2018) e (Jung et al., 2019)

O algoritmo StaMPS em si não tem como input imagens SAR, por isso há uma necessidade de preparação da pilha interferométrica. Essa preparação envolve processos como escolha de *master*, preparação de *slaves*, divisão das imagens SAR, co-registo e interferogramas, assim como a exportação desse tipo de informação em ficheiros para StaMPS.

Para a formação da pilha interferométrica foi utilizado o conjunto de scripts “*snap2stamps*” (Blasco et al., 2019) baseado em grafos do SNAP. Estes scripts em *python* automatizam a formação da pilha interferométrica com base na gestão entre os grafos e os operados do SNAP a fim de obter um output compatível para introdução no StaMPS.

O seguinte passo é identificar e preparar os candidatos a PS através de um índice de dispersão da amplitude usando o script *mt_prep_snap* incluído no StaMPS. Posteriormente, a cadeia de processamento StaMPS PSI é executada do passo 1 ao 8 no MatLab (Figura 2.22), conforme descrito no Manual do Usuário do StaMPS em (A. Hooper et al., 2018).

Os parâmetros mais específicos da análise StaMPS estão conforme os padrões recomendados em (A. Hooper et al., 2018) e (Serco Italia S.p.A., 2021). As exceções estão na preparação dos dados para introduzir no StaMPS pelo script *mt_prep_snap* onde a dispersão da amplitude escolhida foi superior (0.6), de forma a aumentar o número de pixels PS candidatos à análise.

Na análise StaMPS também foram considerados alguns ajustes nos parâmetros, com os propósitos que se passam a referir:

- *max_topo_err* para 5. É o erro máximo aceitável do MDE. O valor padrão é de 20 m, valores típicos é 10m. Quanto maior, mais pixels com fase aleatória.
- *filter_grid_size* para 20. É o tamanho de grade de filtro para correlação da fase no espaço. Os candidatos a PS são re-amostrados para esta grade para aplicar um filtro que determina a fase espacialmente correlacionada. A procura de correlação em grades mais pequenas resultam num maior numero de PS escolhidos.
- *weed_standard_dev* para 1.2. É o desvio padrão na depuração de PS. Descarta pixels com desvio padrão acima deste limite. Aumentar este parâmetro aumenta o número de pixels PS selecionados, mas também o nível de ruído, 1 a 1.2 é o padrão.

No final da análise é possível isolar uma área de referência, uma vez que os resultados são relativos à velocidade média de toda a imagem. O ideal é ter um ponto onde o deslocamento nulo é conhecido (ex: medição GPS) e usá-lo como referência para converter os resultados. Se não houver medições, é importante conhecer a área em estudo e selecionar uma área onde não são esperadas alterações, como exemplo, zonas montanhosas (A. Hooper et al., 2018; Serco Italia S.p.A., 2021).

A formação da pilha interferométrica e a análise StaMPS foram feitas para cada uma das trajetórias como descrito em (Jung et al., 2019) e (Blasco et al., 2019).

Os resultados da análise StaMPS, são exportados e sujeitos a um pós-processamento, principalmente com o objetivo de combinar dados de trajetórias diferentes e/ou calcular a componente vertical dos deslocamentos (Blasco et al., 2019).

Após obter os resultados, estes podem ser visualizados na ferramenta *StaMPS Visualizer* (Hoeser, 2018). Todavia, para melhorar a adaptabilidade e evitar falhas ao abrir grandes quantidades de dados, no âmbito do presente trabalho foram criados scripts em *python* no ambiente QGIS que facilitassem a visualização e utilização das séries temporais, dando origem à criação da ferramenta com o nome *Assistente de Análise*.

Para a estimativa dos deslocamentos além de LOS foram criados vários scripts incorporados no *Assistente de Análise* para decompor os valores em LOS para o espaço XYZ para ambas as trajetórias (Haghighi & Motagh, 2017) e para vertical e longitudinal com ambas as trajetórias (Jung et al., 2019). Desta forma, os pontos criados nas estruturas de interesse para reamostragem dos pixels PS contêm deslocamentos em várias geometrias a partir de LOS.

Os dados desses pontos podem depois ser copiados para o Excel onde pode, por exemplo, ser feita a comparação com dados medidos in situ, tendo em consideração a resolução temporal, espacial e a estimativa em geometria disponível.

3.2. Escolha dos dados

Na elaboração deste trabalho recorreu-se ao Copernicus Open Access Hub (Figura 3.2), atualmente Copernicus Browser integrado no novo Ecosistema Copernicus, para obter as imagens radar do Sentinel 1A, apresentado no capítulo anterior. As razões para a escolha das imagens desta plataforma prenderam-se essencialmente com o seu acesso fácil e gratuito, mas também tiveram em consideração a grande quantidade e interesse das publicações estudadas que as usam, conforme apresentado anteriormente. Para além disso, o Copernicus permite ainda fazer a transferência de dados livre de restrições de uso, com possibilidade de seleccionar a região de interesse, escolher diferentes plataformas Sentinel, diferentes produtos e intervalos de tempo.

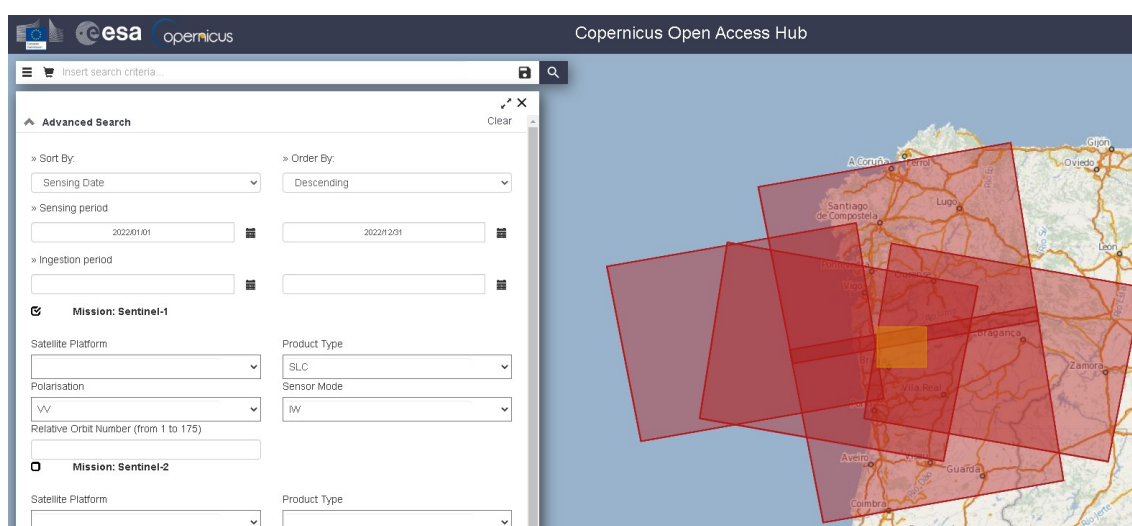


Figura 3.2 - Plataforma Copernicus Open Access Hub usada para transferir as imagens SLC necessárias. Terminada em dezembro 2023

O tipo de produtos a processar antes de fazer a análise PSI podem ser sobretudo *raw data* (onde é necessário criar *single-look complex* (SLC) através de softwares como por exemplo *Repeat Orbit Interferometry PAC* (ROI_PAC) ou criar interferogramas a partir de imagens já em SLC como as fornecidas pela plataforma Copernicus (A. Hooper et al., 2018).

Para este estudo apenas foi usada a polarização VV, ou seja, transmissão de microondas verticais e consequente receção das verticais, tal como adotado por vários outros trabalhos como (Serco Italia S.p.A., 2021), (Blasco et al., 2019) e também adotado em estudos sobre pontes como (Jung et al., 2019), (J. J. Sousa & Bastos, 2013), (Xiong et al., 2021). A polarização VV tende a captar sobretudo as características em altura/verticais, enquanto os modos VH tendem a ser mais sensíveis às texturas da superfície (Capella Space, n.d.).

A escolha da polarização VV permitirá assim detetar, sobretudo, os eventuais assentamentos verticais nas estruturas.

Dos quatro modos de aquisição que o Sentinel 1 consegue operar, o modo Interferometric Wide Swath (IW) é o modo de aquisição padrão sobre a superfície terrestre que é apropriado para processos de interferometria (Haghighi & Motagh, 2017), pelo que será o escolhido.

O modo IW captura 3 *sub-swath* com o uso de *Progressive Scans SAR* (TOPSAR). Na Figura 3.3 está esquematizada a obtenção de imagens IW pelo Sentinel 1, onde 3 *sub-swaths* (IW1, IW2, IW3) estão sobrepostos e cada *sub-swath* contém vários *bursts* também eles sobrepostos. Os *sub-swath* não são obtidos continuamente, mas sim primeiro obtém um *burst* de um *sub-swath* enquanto a plataforma se move ao longo da órbita, depois a antena é movida para obter outro *burst* do seguinte *sub-swath* (Haghighi & Motagh, 2017).

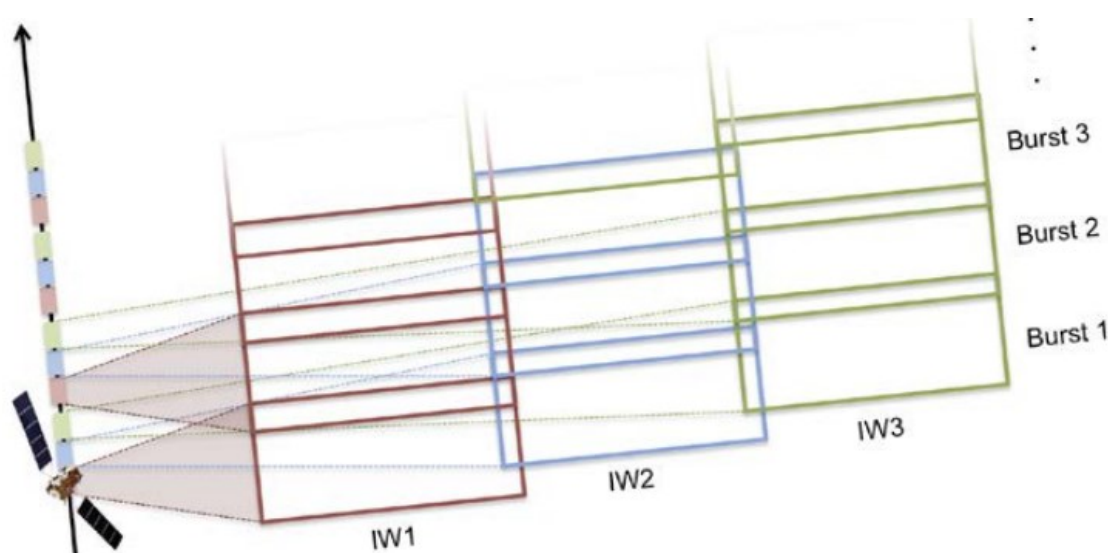


Figura 3.3 - Esquema do modo TOPS do Sentinel 1.

Na Figura 3.4, apresenta-se um exemplo de uma imagem em trajetória ascendente, no qual a antena está sempre a “olhar” para a direita, por isso as imagens aparentam ter um efeito de “espelho”, porque são mostrados os pixels em ordem de aquisição.

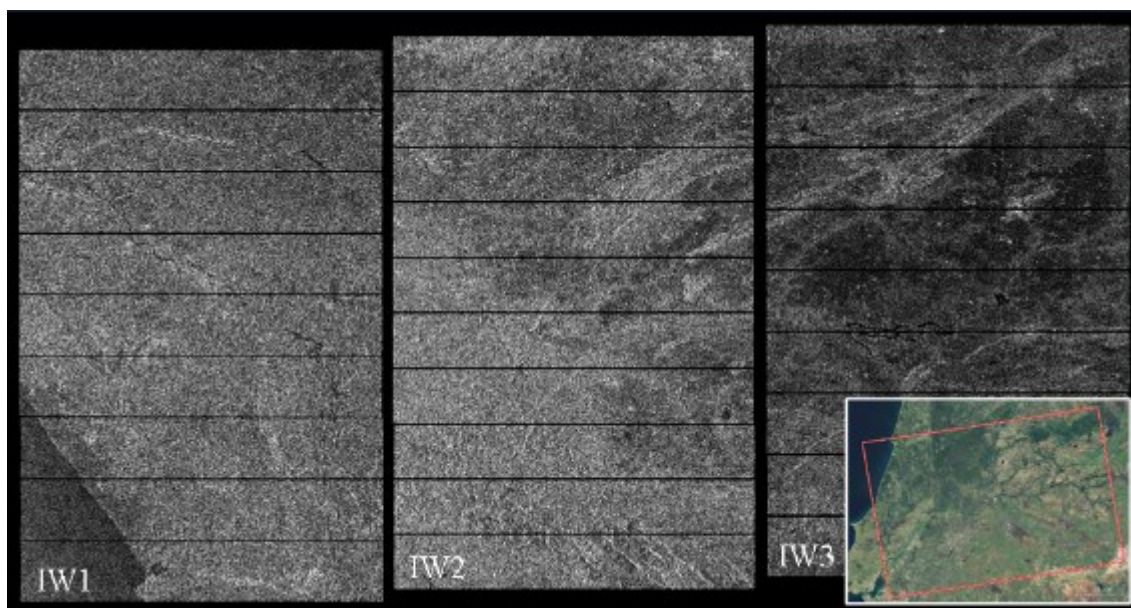


Figura 3.4 – Exemplo imagem SLC pelo Sentinel 1na órbita 147 ascendente

Outra das escolhas necessária é referente ao MDE a usar no *Back Geocoding* e *Topo Phase Removal* (Figura 3.1). A maioria das estruturas, não estão presentes nos MDE usuais públicos disponíveis, especialmente as estruturas recentes ou de dimensões mais pequenas. Assim, surge a necessidade de optar por um modelo que inclua as estruturas em estudo, como forma de evitar inconsistências:

- na geolocalização dos difusores persistentes;
- na estimativa do erro MDE usado na coerência temporal (passo 2 do StaMPS);
- consequente estimativa e uso do erro de ângulo de vista no passo 5, e passo 7;
- na correção troposférica linear calculada com base na fase e informação topográfica.

3.3. Construção da pilha interferométrica

Para construir a pilha interferométrica para uma abordagem PSI é necessário escolher a imagem de referência (*master*) entre todas as imagens. Essa escolha é feita pelo operador *InSAR Stack Overview* no *SNAP*. Este operador seleciona a *master* de forma a que a dispersão da linha de base perpendicular seja a menor possível, maximizando a (esperada) coerência interferométrica da pilha, o que implica uma melhor interpretação visual dos interferogramas e auxilia na avaliação da qualidade (SNAP Online Help – STEP, n.d.-b).

O processo da formação da pilha interferométrica de forma automática recorre ao uso de *snap2stamps* (Blasco et al., 2019). Para executar esse processo é necessário escolher uma área de interesse (*Area Of Interest* - AOI) que englobe a zona onde as estruturas a estudar se encontram. Para definir essa área são necessárias as longitudes e latitudes máximas e mínimas. Na configuração do projeto, a master já tem que estar processada e para isso pode-se usar o grafo fornecido e executá-lo no SNAP.

Assim, é necessário alterar o ficheiro da configuração do projeto na ferramenta *snap2stamps*, como se mostra na Figura 3.5. Aqui deve-se escolher os caminhos das pastas no sistema onde se encontra o projeto e os grafos, a master processada com o *subswath* correspondente e o caminho para a instalação do SNAP. Também a definir os recursos computacionais a usar no processo, neste caso 75% dos atribuídos à Virtual Machine (VM)

```

##### CONFIGURATION FILE #####
#####
# PROJECT DEFINITION
PROJECTFOLDER=/media/sf_shared/Project
GRAPHSFOLDER=/media/sf_shared/Project/graphs
#####
# PROCESSING PARAMETERS
IW1=IW1
MASTER=/media/sf_shared/Project/master/S1A_IW_SLC__1SDV_20200104T064224_20200104T064224_000000_000000_000000
#nome do dim
#####
# AOI BBOX DEFINITION
LONMIN=-8.45614242553711
LATMIN=41.76238250732422
LONMAX=-8.362916946411133
LATMAX=41.87485122680664
#####
# SNAP GPT
GPTBIN_PATH=/opt/snap/bin/gpt
#####
# COMPUTING RESOURCES TO EMPLOY
CPU=8
CACHE=8G
#####

```

Figura 3.5 - Configurações necessárias para executar snap2stamps.

Com o projeto configurado é necessário executar 4 comandos:

- `python3 splitting_slaves.py project.conf` - divide as *slaves* em pastas onde o nome é a data de aquisição correspondente .

- `python3 splitting_slaves.py project.conf` - aplica o grafo apresentado na Figura 3.6 sobre todas as slaves.
- `python3 coreg_ifg_topsar.py project.conf` - aplica o grafo da Figura 3.7 para fazer o co-registo e os interferogramas.
- `python3 stamps_export.py project.conf` - prepara os dados para injetar no StaMPS, conforme se ilustra também em parte do grafo da Figura 3.7.

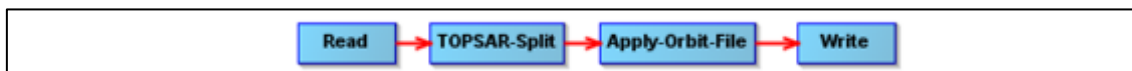


Figura 3.6 - Operadores para processar as imagens slaves.

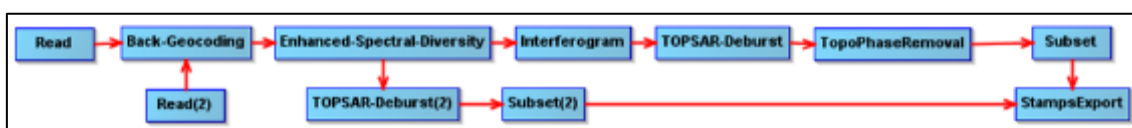


Figura 3.7 - Operadores para usar uma slave com a master para fazer co-registo e criação de interferogramas e por fim exportar para o formato usado no StaMPS

Por fim, já com o StaMPS instalado, é necessário identificar os candidatos a PS. Esta identificação é conseguida através de um índice de dispersão da amplitude que é um valor que descreve a estabilidade da amplitude e é usado para pré-selecionar pixels reduzindo o número total para a análise de fase no StaMPS (Serco Italia S.p.A., 2021). Para o efeito deve-se executar o comando `mt_prep_snap` e especificar os detalhes do processo de acordo com a Figura 3.8.

```

miguel@Ubuntu3: /media/sf_shared/Project/prep
miguel@Ubuntu3:/media/sf_shared/Project/bin$ cd ..
miguel@Ubuntu3:/media/sf_shared/Project$ mkdir prep
mkdir: cannot create directory 'prep': File exists
miguel@Ubuntu3:/media/sf_shared/Project$ cd prep
miguel@Ubuntu3:/media/sf_shared/Project/prep$ mt_prep_snap
mt_prep_snap Andy Hooper, August 2017

usage: mt_prep_snap yyyyymmdd datadir da_thresh [rg_patches az_patches rg_overlap
az_overlap maskfile]
  yyyyymmdd           = master date
  datadir              = data directory (with expected structure)
  da_thresh            = (delta) amplitude dispersion threshold
                       typical values: 0.4 for PS, 0.6 for SB
  rg_patches (default 1) = number of patches in range
  az_patches (default 1) = number of patches in azimuth
  rg_overlap (default 50) = overlapping pixels between patches in range
  az_overlap (default 50) = overlapping pixels between patches in azimuth
  maskfile (optional) char file, same dimensions as slcs, 0 to include, 1 othe
rwise
  
```

Figura 3.8 - Configuração do `mt_prep_snap`

3.3.1. Operadores usados

Para construir a pilha interferométrica é necessário usar um conjunto de operadores que se passam a apresentar, pela ordem sequencial com que devem ser aplicados. Estes são os operadores incluídos nos grafos executados pelo *snap2stamps*.

TOPSAR Split

TOPSAR Split é um operador para separar cada *subswaths* com os *bursts* selecionados para um novo produto que englobe a AOI. É o primeiro passo na cadeia de processos e como se pode observar na figura seguinte (Figura 3.9), pode-se escolher qual o *subswath*, quais os *bursts* e a polarização desejada (SNAP Online Help – STEP, n.d.-b)

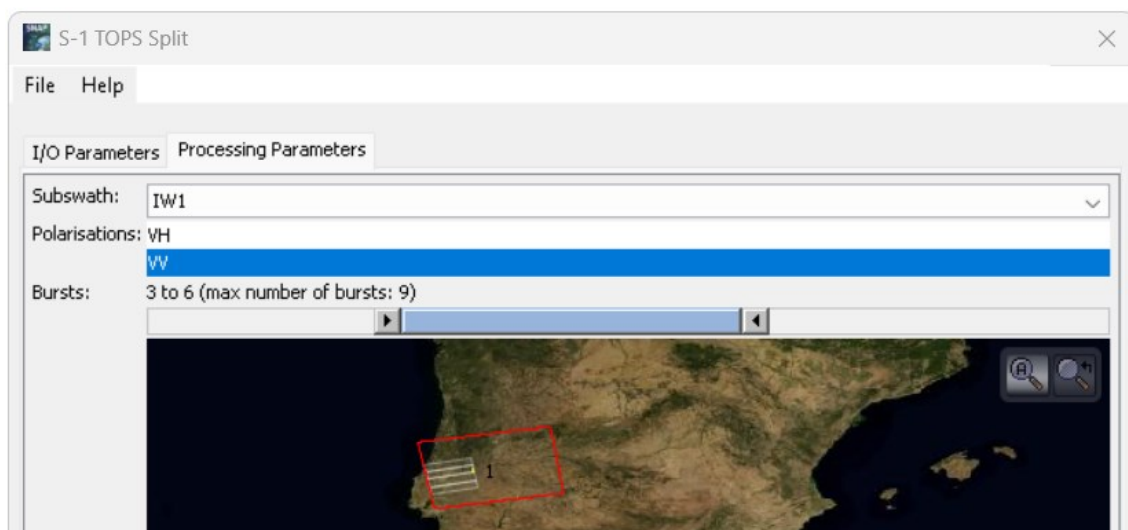


Figura 3.9 - Operador TOPSAR Split no SNAP e respetivas especificações

Apply Orbit File

Os vetores de órbita fornecidos nos metadados dos produtos SAR geralmente não são exatos e para isso é necessário um ficheiro de órbita com informação auxiliar sobre a posição e velocidade precisas do satélite no momento da aquisição. Essas informações são disponibilizadas nos dias que seguem a publicação dos produtos SAR (SNAP Online Help – STEP, n.d.-b).

No SNAP há a vantagem dos ficheiros de órbita serem transferidos automaticamente da ESA GNSS Hub, como se pode observar na Figura 3.10. Para o Sentinel-1 existe a opção entre Orbitas Restituídas, fornecidas alguns dias após a aquisição, e Orbitas Precisas, fornecidas cerca de 20 dias após a aquisição (SNAP Online Help – STEP, n.d.-b), (Alaska Satellite Facility, n.d.-b).

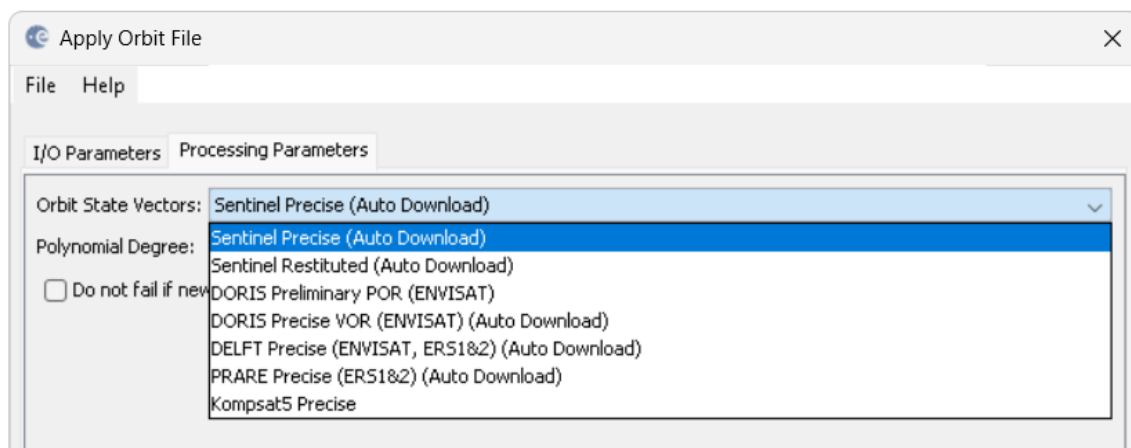


Figura 3.10 - Operador Apply Orbit File no SNAP e respetivas especificações

O próximo passo na cadeia de processos é o Co-registo (*Coregistration*) que certifica cada alvo na superfície a contribuir para o mesmo pixel, tanto na imagem *master* como nas imagens *slaves*. Os pixels nas imagens *slaves* são movidos de forma a alinhar com os da imagem *master* (Alaska Satellite Facility, n.d.-b).

Back Geocoding

Back Geocoding é o operador demonstrado na Figura 3.11 que efetua o co-registo entre os S1 SLC do mesmo *sub-swath* da *master* com cada uma das referências, usando as órbitas e um modelo de elevação digital (MDE) (SNAP Online Help – STEP, n.d.-b).

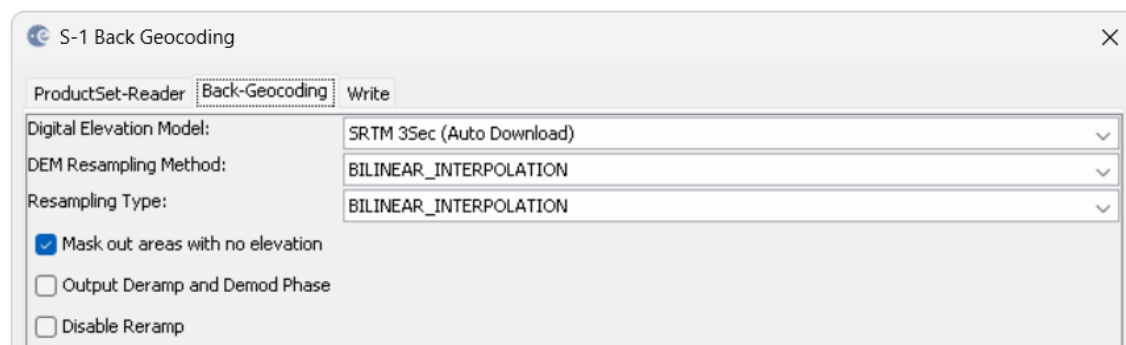


Figura 3.11 - Operador Back Geocoding no SNAP e respetivas especificações

Enhanced Spectral Diversity (ESD)

É um operador de melhoria do co-registo e implementa Network Enhanced Spectral Diversity (NESD). O erro (*misregistration*) entre duas imagens já co-registadas pode ser estimado através de relação cruzada (*cross correlation*) ou diversidade espectral (Alaska Satellite Facility, n.d.-b). Esta abordagem calcula offsets em alcance através da relação cruzada e em azimuth através de ESD. Por fim, o operador faz alterações ao alcance e azimuth a cada *burst* usando os *offsets* estimados. As especificações deste operador podem ser observadas na Figura 3.12 (SNAP Online Help – STEP, n.d.-b).

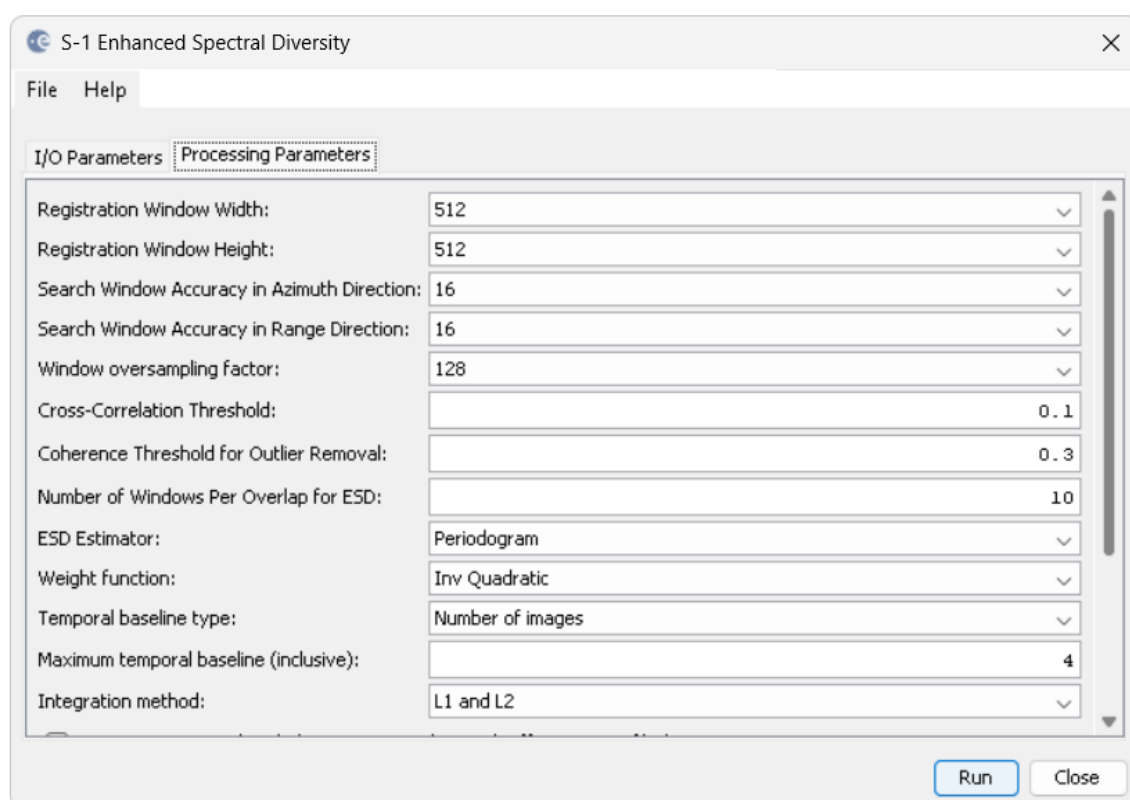


Figura 3.12 - Operador Enhanced Spectral Diversity no SNAP e respetivas especificações.

Interferogram formation

Ao produto do co-registo é aplicado o operador Interferogram formation (Figura 3.13). Como o nome indica, este operador cria os interferogramas necessários (entre a *master* e cada uma das *slaves*). A amplitude entre as duas imagens é multiplicada e a fase é subtraída, ou seja, a diferença entre ambas as fases (fase interferométrica de cada pixel) (Alaska Satellite Facility, n.d.-b).

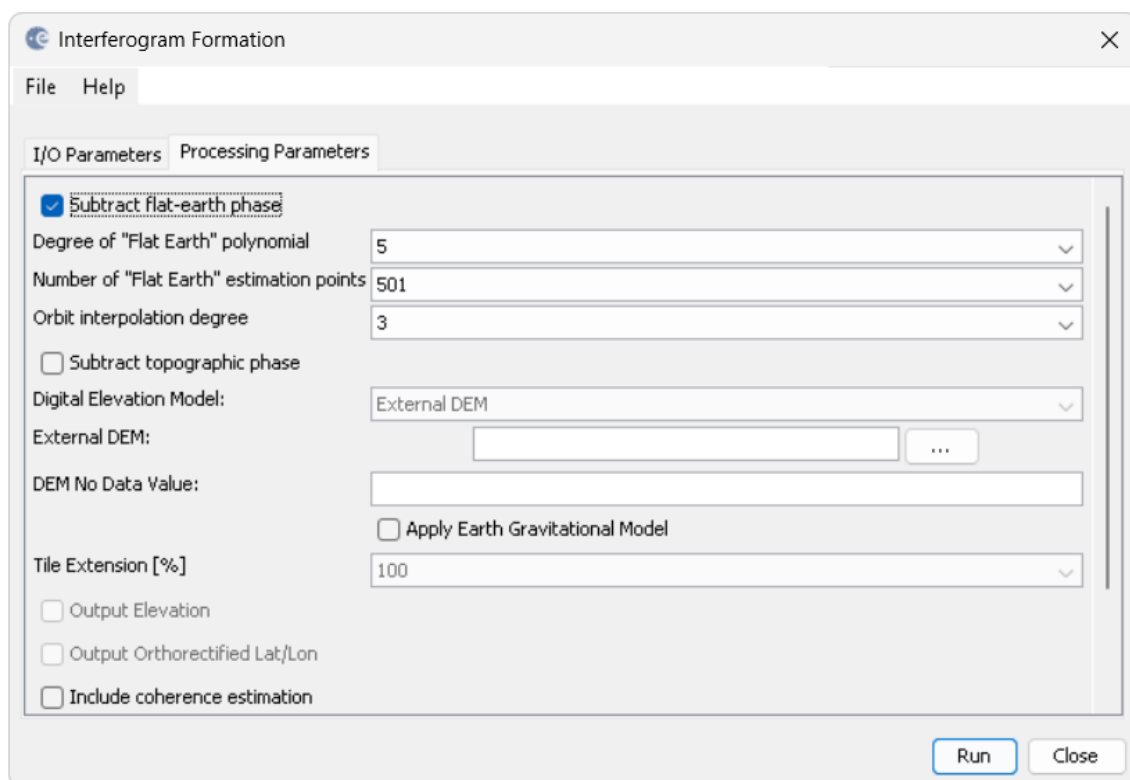


Figura 3.13 - Operador Interferogram Formation no SNAP e respectivas especificações

Nesta etapa é feita a remoção da *flat-earth phase* que é a fase presente no sinal interferométrico resultante da curvatura da superfície e é estimada e removida recorrendo a informações de órbita e metadados demonstrado na Figura 3.14 (SNAP Online Help – STEP, n.d.-b). Com a remoção desta fase o interferograma fica com *fringes*⁹ apenas relacionadas com diferenças na elevação assim como ruído, efeitos atmosféricos e deslocamento superficial a serem estimados nos seguintes processos (GAMMA Remote Sensing AG, n.d.).

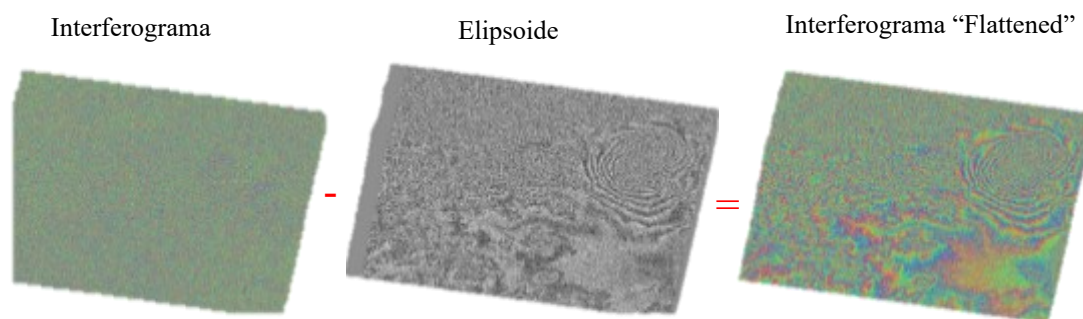


Figura 3.14 - Exemplo de remoção flat earth. Fonte: (Valentino, 2021)

⁹ São franjas que aparecem nos interferogramas como ciclos de cores representativos de um ciclo de 2π de mudança de fase.

TOPSAR-Deburst

Após recortar os dados, unir a master com todas as slaves, tendo em conta a topografia do terreno, e melhorar a geometria dessa união e formação de interferograma, segue-se a aplicação do operador TOPSAR-Deburst ao produto do co-registo e aos interferogramas formados (Figura 3.15). Cada burst tem sido processado como uma imagem SLC sendo que há suficiente sobreposição entre bursts e entre sub-swaths por diferentes polarizações para uma total cobertura da superfície. O objetivo deste operador é a reamostragem desses bursts (em todos os sub-swaths escolhidos por polarização escolhida), numa rede espacial única e comum em alcance e azimuth (imagem única) (SNAP Online Help – STEP, n.d.-b).

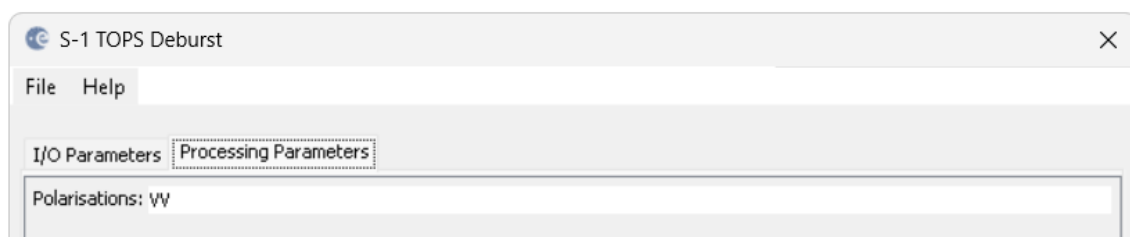


Figura 3.15 - Operador TOPSAR Deburst no SNAP e respetivas especificações

Remoção da fase topográfica

Na remoção da fase topográfica pelo operador TopoPhaseRemoval (Figura 3.16), aplicada sobre o deburst de cada interferograma, é simulado um interferograma baseado no MDE e depois subtraído do interferograma. Isto é essencial para enfatizar fases relacionadas com deformações (SNAP Online Help – STEP, n.d.-b).

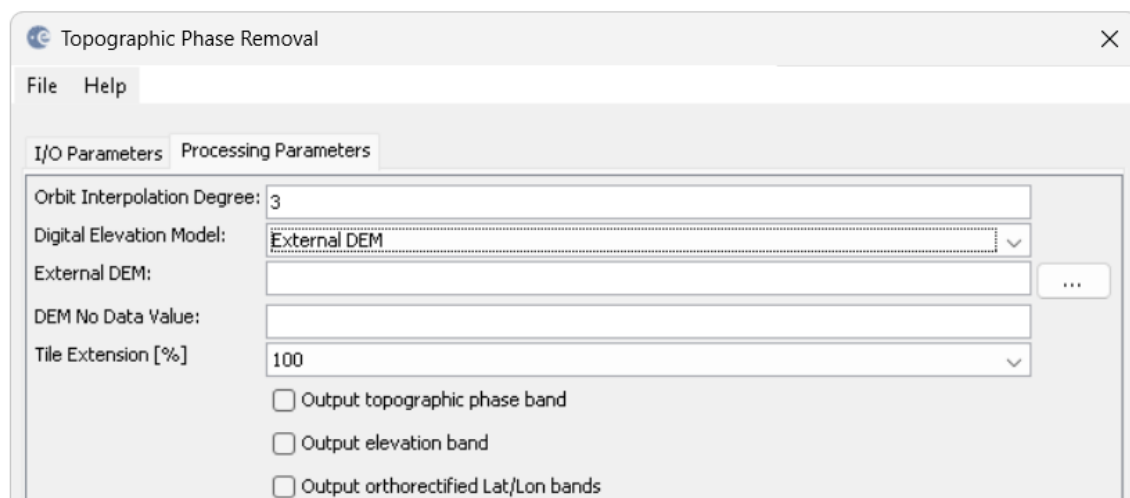


Figura 3.16 - Operador Topographic Phase Removal no SNAP e respetivas características

Se o alvo fosse observado a partir da mesma posição, não se incluiria o termo corresponde à fase topográfica e a linha de base perpendicular seria zero. Na prática o sensor não consegue estar exatamente na mesma posição em duas passagens, por isso o alvo é observado a partir de diferentes posições e, para isso, é preciso ligar as fases a uma elevação z do alvo (Brook, n.d.). Um exemplo pode ser observado na Figura 3.17.

A contribuição da fase topográfica é proporcional à linha de base perpendicular, isto é, menores linhas de base perpendiculares favorecem a monitorização da deformação (Haghighi & Motagh, 2017).

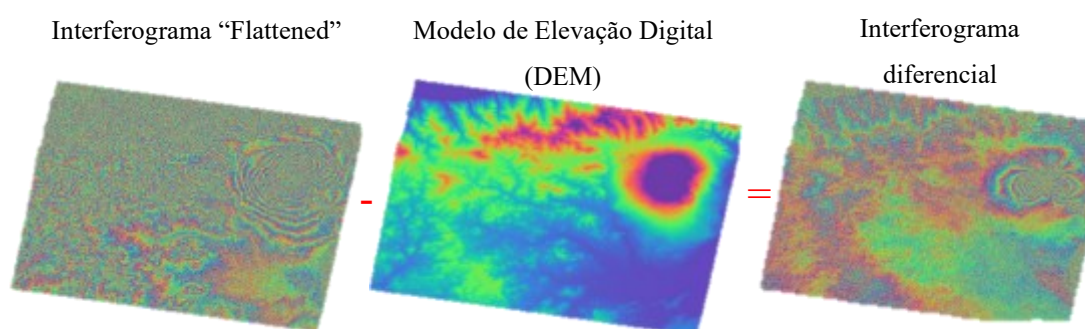


Figura 3.17 - Exemplo de formação de interferograma diferencial (Valentino, 2021)

Subset

O operador subset (Figura 3.18) é aplicado sobre os Debrusts para apenas continuar o processamento com dados da AOI escolhida, isto é, reduz a extensão dos dados à AOI.

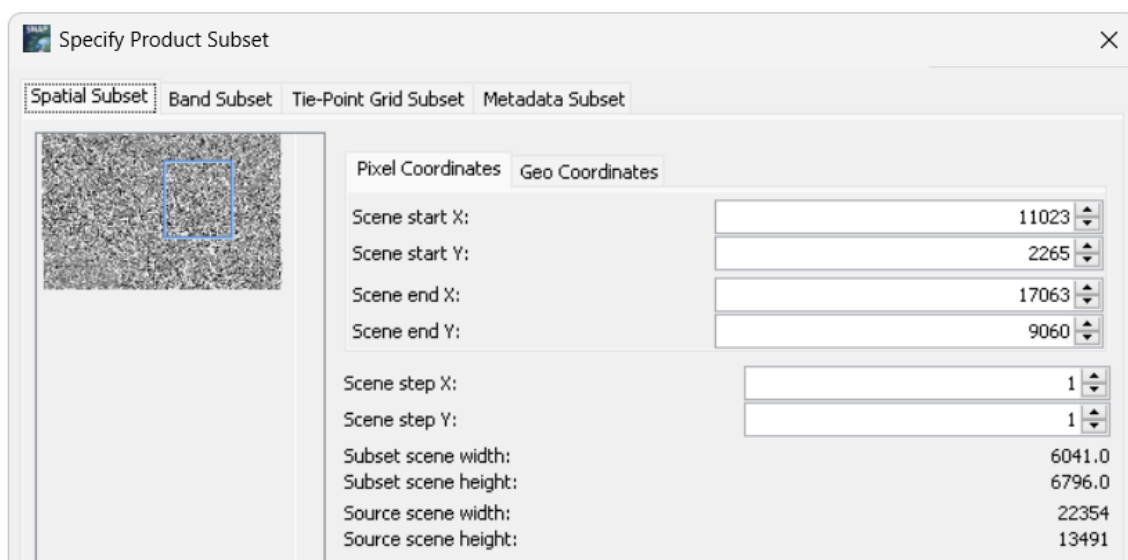


Figura 3.18 - Operador Subset no SNAP e respetivas especificações.

StaMPS Export

É o operador (Figura 3.19) que usa as imagens co-registadas e os interferogramas com a banda de elevação e as transforma num output em formato Gamma para ser inserido no StaMPS no matlab.

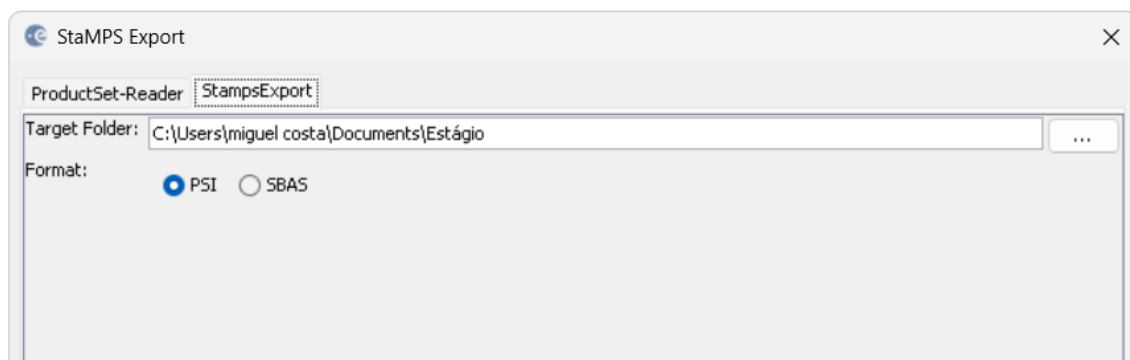


Figura 3.19 - Operador StaMPS Export no SNAP e respetivas especificações.

3.4. Análise StaMPS

O StaMPS usa a relação estatística entre a estabilidade da amplitude e estabilidade da fase. O processo começa pelo uso da dispersão da amplitude, de forma a reduzir o número de candidatos a seguirem para a análise de fase. É assim estimado o valor do ruído da fase para cada pixel candidato, por ser o indicador que permite determinar se um pixel é PS ou não. Os pixels são depois selecionados com base na probabilidade de serem pixels PS, tendo em consideração a dispersão da amplitude e ruído da fase. Depois a fase é corrigida removendo a estimativa do erro do MDE e posteriormente desenrolada. Outros filtros podem ser aplicados para remover erros correlacionados no espaço como o erro atmosférico e o erro de órbita (J. J. Sousa et al., 2011).

No software StaMPS os processos estão organizados em 8 passos gerais que se seguem, sendo que a análise da amplitude em 0 é feita antes de carregar os dados (passo 1)

3.4.1. Análise da amplitude

Embora um pixel PS seja definido pela estabilidade da fase, existe uma relação estatística entre a amplitude e a estabilidade da fase. Posto isto, pode-se pré-selecionar pixels e reduzir o número inicial a ser processado para análise de fase. O algoritmo efetua uma seleção de pixels, realizando o desenrolar da fase apenas sobre pontos com coerência espacial acima de um determinado limiar. Esta pré-seleção é feita com recurso a um índice que descreve a estabilidade da amplitude apresentado na Equação 3.1 (A. J. Hooper, 2006).

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A}$$

Equação 3.1(Ferretti et al., 2001)

Onde:

D_A é Valor que descreve a estabilidade da amplitude

σ_A é Desvio padrão de uma série de valores de amplitude

μ_A é a média de uma série de valores de amplitude

3.4.2. Análise da fase (Passo 2)

A coerência temporal pode ser calculada através da estimativa de ruído da fase. Para obter a coerência temporal, a fase correlacionada espacialmente é estimada e subtraída. A partir da fase restante, o erro do MDE (Modelo Digital de Elevação) não correlacionado espacialmente também é estimado e subtraído. Após isso, a coerência temporal é estimada a partir da fase residual. Este é um passo iterativo que estima o valor do ruído de fase para cada pixel candidato em todos os interferogramas (A. J. Hooper, 2006).

A fase enrolada de cada pixel em cada interferograma, topograficamente corrigido e “nivelado”, pode ser escrita como a soma dos termos na seguinte Equação 3.2.).

$$\Psi_{x,i} = W\{\emptyset_{D,x,i} + \emptyset_{A,x,i} + \Delta\emptyset_{S,x,i} + \Delta\emptyset_{\theta,x,i} + \emptyset_{N,x,i}\}$$

Equação 3.2 (A. Hooper et al., 2007)

$\Psi_{x,i}$ = Fase enrolada

W = Operador de enrolamento

$\emptyset_{D,x,i}$ = mudança de fase devido ao movimento do pixel na direção da linha de vista

$\emptyset_{A,x,i}$ = fase devido à diferença no atraso atmosférico entre as passagens.

$\Delta\emptyset_{S,x,i}$ = fase residual devido a imprecisões na órbita do satélite.

$\Delta\emptyset_{\theta,x,i}$ = fase residual devido ao erro no ângulo de vista.

$\emptyset_{N,x,i}$ = termo de ruído devido à variabilidade na dispersão, ruído térmico, erros de co-registo e incerteza na posição do centro de fase na direção azimutal.

A variação dos primeiros 4 termos da Equação 3.2. domina o termo ruído e isso torna mais difícil identificar PS diretamente a partir da fase enrolada.

Hooper assume que $\emptyset_{D,x,i}$, $\emptyset_{A,x,i}$ e $\Delta\emptyset_{S,x,i}$ estão correlacionados espacialmente em distâncias de uma escala especificada, L , e que $\Delta\emptyset_{\theta,x,i}$ e $\emptyset_{N,x,i}$ não estão correlacionados na mesma distância (A. Hooper et al., 2004).

Estimar a parte espacialmente correlacionada de $\Psi_{x,i}$ fornece uma estimativa para os três primeiros termos e parte do quarto termo, isto porque, o erro no Modelo Digital de Elevação (MDE) tende a ser apenas parcialmente correlacionado espacialmente, o que se reflete no erro do ângulo de vista (A. Hooper et al., 2007). Os pixels procurados como PS são aqueles em que $\emptyset_{N,x,i}$ é pequeno o suficiente que não ofusque completamente o sinal.

Para uma estimativa mais refinada de $\phi_{N,x,i}$ o seguinte ciclo é iterativo até convergência: Os primeiros 4 termos são estimados e subtraídos possibilitando um acesso estatístico a uma estimativa do termo $\phi_{N,x,i}$. Em seguida são reestimados os primeiros 4 termos usando essa estimativa do $\phi_{N,x,i}$ para ponderar a contribuição de cada pixel para a reestimativa e assim subtrair esses valores da equação e dar uma nova estimativa de $\phi_{N,x,i}$. Normalmente converge ao fim de algumas iterações (A. J. Hooper, 2006).

Por fim, é definida uma medida de variação da fase residual baseada na coerência temporal em detrimento da espacial do pixel, como demonstrado na Equação 3.3.

Esta é uma medida em que a amplitude é considerada constante dando peso igual a todas as imagens. Então, um pixel brilhante numa imagem e escuro com fase aleatória em todas as outras imagens não apresenta alta coerência e por isso pode ser excluído por não ser um bom PS (A. Hooper et al., 2007).

$$\gamma_x = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \exp\{\sqrt{-1}(\psi_{x,i} - \tilde{\psi}_{x,i} - \Delta\hat{\phi}_{\theta,x,i}^{nc})\} \right|$$

Equação 3.3 (A. Hooper et al., 2007)

γ_x = Nível do ruído de fase. É uma medida da estabilidade de fase do pixel e, portanto, um indicador de pixel difusor persistente.

N = O número de interferogramas

$\psi_{x,i}$ = Fase enrolada

$\tilde{\psi}_{x,i}$ = Fase enrolada filtrada,

$\Delta\hat{\phi}_{\theta,x,i}^{nc}$ = Fase residual não correlacionada espacialmente devido ao erro do ângulo de vista.

3.4.3. Seleção dos Difusores Persistentes (Passo 3)

Após convergir as estimativas da estabilidade de fase, são selecionados os pixels que tem maior probabilidade de serem PS, com base num limite determinado pela fração de falsos positivos que se considere aceitável, de acordo com a Equação 3.4 (A. Hooper et al., 2007).

Com o uso do nível do ruído de fase γ_x é possível estimar a densidade da probabilidade $p(\gamma_x)$. É feita a união de duas populações de pixels, uma contendo apenas pixels PS e outra pixels não PS. Como há uma correlação entre a variação da amplitude e a estabilidade da

fase, a probabilidade pode então ser calculada com mais precisão considerando a dispersão de amplitude dos pixels D_A (A. Hooper et al., 2007). Assim para um dado pixel x , a probabilidade P de ser PS é:

$$P(x \in PS) = 1 - \frac{(1 - \alpha(\widehat{D}_{A,x})) \int_{\gamma^{thresh}}^1 P_B(\gamma_x) d\gamma_x}{\int_{\gamma^{thresh}}^1 P(\gamma_x, \widehat{D}_{A,x}) d\gamma_x} - q$$

Equação 3.4 (A. Hooper et al., 2007)

$\widehat{D}_{A,x}$ = Dispersão da amplitude dos pixels

γ^{thresh} = Pixels com γ_x acima de um determinado valor limite.

$P_B(\gamma_x)$ = Probabilidade de distribuição dos pixels com fase aleatória

3.4.4. Depuração dos Difusores Persistentes (Passo 4)

Os pixels selecionados no passo anterior são depurados, sendo descartados aqueles cujo sinal tem contribuição por elementos vizinhos e os que forem considerados com muito ruído. Dessa forma, procura-se excluir os pixels que apenas são persistentes em alguns interferogramas e os que são dominados por difusores em PS adjacentes (A. Hooper et al., 2018). Um difusor mais brilhante pode influenciar pixels além do pixel correspondente à sua localização física. Um erro no ângulo de vista e no ângulo de direção da antena (*squint angle*), devido ao deslocamento do pixel da localização física, resulta na sua não seleção como difusores.

O *squint angle* é o ângulo entre o eixo do centro de fase da antena e a projeção vertical do vetor do alcance oblíquo (*slant range*) (MathWorks, 2021).

No entanto, para os pixels adjacentes ao pixel PS, esses erros podem ser pequenos o suficiente para que esses pixels apareçam estáveis. Para evitar a seleção desses pixels, Hooper *et al.* assume que pixels adjacentes selecionados como PS ocorrem devido ao mesmo difusor dominante. É esperado que o pixel que corresponde à localização física tenha a maior razão Sinal-Ruído, já para grupos de pixels adjacentes estáveis são selecionados como PS os pixels com maior valor de γ_x (A. Hooper et al., 2007).

3.4.5. Correção da fase (Passo 5)

A fase enrolada (*Wrapped phase*) dos pixels selecionados é corrigida para o erro do ângulo de vista espacialmente não correlacionado (A. Hooper et al., 2018).

Duas contribuições são corrigidas neste passo, a contribuição do erro do ângulo de vista (MDE) e a contribuição da *master*, ambas para a parte do sinal espacialmente não correlacionado e já estimadas anteriormente. Estas duas contribuições são subtraídas antes do desenrolar (A. Hooper et al., 2007). A remoção da contribuição do ângulo de vista não é significativa no desenrolar, embora o efeito cumulativo sobre grandes áreas possa ser mais significativa, e por isso o passo 7 (step 7 – Estimar o erro do ângulo de vista) (A. Hooper et al., 2007).

3.4.6. Desenrolar de fase (Passo 6)

Ao medir a fase interferométrica, só é possível medir de 0 a 2π (Figura 3.20). Ao considerar a relação entre fase e comprimento de onda, pode-se imaginar que haverá muitos ciclos de 2π antes que o sinal chegue ao solo, uma vez que o comprimento de onda a usar é de 5,5 cm para o Sentinel-1. Portanto, a diferença ou fase interferométrica em qualquer ponto é o valor entre 0 a 2π mais algum número desconhecido k de ciclos (Serco Italia S.p.A., 2021).

Essa ambiguidade da fase é resolvida durante o chamado cálculo de desenrolar da fase, que é o processo de reconstrução do deslocamento original de fase a partir dessa representação "enrolada". Consiste em adicionar ou subtrair múltiplos de 2π (Figura 3.20) nos lugares apropriados para tornar a imagem de fase o mais suave possível (Serco Italia S.p.A., 2021).

O StaMPS, no entanto, tem 3 dimensões de dados de fase, por isso o problema de desenrolar é tridimensional, duas dimensões no espaço, tal como InSAR convencional, e uma no tempo (A. Hooper et al., 2007). Resultados são obtidos com o uso de um algoritmo 3D de desenrolar de fase, geralmente com mais sucesso em vez de desenrolar a fase em cada interferograma independente em 2D. As rotinas de otimização do *snapphu* são usadas pelo código de desenrolar 3D do StaMPS (A. Hooper, 2009).

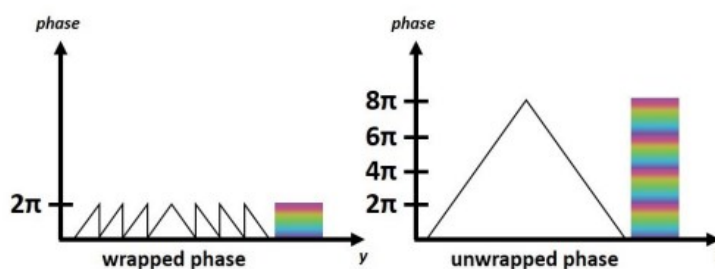


Figura 3.20 - Princípio de desenrolar da fase. (Braun, 2021)

Erros do desenrolar são mais propensos a ocorrer em interferogramas com linhas de base perpendiculares mais longas. Isso ocorre por duas razões: em primeiro lugar, há mais ruído associado a cada pixel do difusor persistente e, em segundo lugar, a fase é maior devido a qualquer erro de ângulo de vista espacialmente correlacionado (SCLA), pois é proporcional à linha de base perpendicular (A. Hooper et al., 2018).

3.4.7. Estimar o erro do ângulo de vista espacialmente correlacionado (Passo 7)

O erro do ângulo de vista espacialmente não correlacionado (SULA) foi calculado no passo 3 e removido no passo 5. Neste passo, é calculado o erro do ângulo de vista espacialmente correlacionado (SCLA), o que se deve quase exclusivamente ao erro MDE espacialmente correlacionado (isso inclui erro no próprio MDE e mapeamento incorreto do MDE em coordenadas de radar). O erro atmosférico e de órbita (AOE) da fase da master é estimado simultaneamente (A. Hooper et al., 2018).

3.4.8. Filtragem atmosférica (Passo 8)

A filtragem atmosférica (atmospheric filtering) é um passo que trata do ruído proveniente de perturbações atmosféricas e aplica um filtro espacial e temporal assim como métodos de correção troposféricos (A. Hooper et al., 2018).

Nos comprimentos de onda de micro-ondas, as contribuições dominantes para as flutuações de atraso ao atravessar a atmosfera são a variação espacial e temporal do conteúdo de vapor de água na troposfera (Onn & Zebker, 2006).

É, no entanto, possível calcular esse atraso do sinal através de uma modelação empírica sem a necessidade de parâmetros atmosféricos. A inclinação da reta da regressão linear entre fase e elevação pode ser expressa como a diferença entre duas inclinações de

fase/elevação, caracterizando o conteúdo de vapor de água na troposfera nas datas de aquisição das imagens *master* e *slave* (Cavalié et al., 2007).

Para fazer a correção troposférica pode ser usada a ferramenta *Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise* (TRAIN). Esta ferramenta foi desenvolvida para incluir métodos de correção troposférica na cadeia de processamento InSAR e faz uso de fase interferométrica, da altura e informação das datas. As correções por parte desta ferramenta podem ser calculadas usando informação auxiliar de modelos meteorológicos, espectrómetros ou baseada na fase interferométrica (assumindo relação linear ou *power-law* entre fase e topografia) (Bekaert et al., 2015).

Na elaboração deste trabalho foi usada a correção troposférica linear baseada na fase, recorrendo ao TRAIN que calcula empiricamente o atraso do sinal ao atravessar a troposfera, diretamente dos interferogramas, usando uma relação espaço temporal entre fase e topografia.

3.5. Estimativa dos deslocamentos em pontos georreferenciados na estrutura

Os deslocamentos obtidos pela análise StaMPS são em LOS e os pixels PS nem sempre estão bem posicionados, principalmente em estruturas como pontes. Por essas razões existe o interesse de fazer a transformação dos valores para um plano que facilite a análise das series temporais, assim como para fazer uma correção da geolocalização dos pixels PS desenquadrados. Para decompor os valores em LOS, é necessário realizar cálculos (sobre a taxa de deslocamento e a série temporal) que se podem dividir em duas abordagens - trajetória única e trajetória múltipla. Isto pode ser feito recorrendo a software de sistemas de informação geográfica (SIG).

Apesar de nem sempre ser possível ter pixels PS sobre o mesmo alvo em aquisições de diferentes trajetórias, é ainda possível decompor os valores LOS de apenas uma trajetória no espaço XYZ. As medições são mais sensíveis a deslocamentos na vertical e na direção este-oeste do que em norte-sul.

Os cálculos efetuados para decompor os valores obtidos em LOS para o espaço XYZ (Equação 3.5) seguem a metodologia proposta em (Haghighi & Motagh, 2017), segundo a fórmula que se segue:

$$\Delta r = [-\cos\alpha \sin\theta \ \sin\alpha \sin\theta \ \cos\theta] [v_x v_y v_z]^T$$

Equação 3.5

Em que:

Δr deslocamento do pixel alvo em LOS

α é o heading do satélite

θ é o angulo de incidência

v_x , v_y e v_z são deslocamentos em este-oeste, sul-norte e vertical, respetivamente.

Na situação de multitrajetória, existem dados de trajetória ascendente e descendente e é possível decompor os deslocamentos das duas direções LOS em vertical e longitudinal. Os cálculos (Equação 3.6) foram baseados numa metodologia proposta especificamente para monitorização de pontes (Jung et al., 2019). É uma metodologia que considera a orientação do objeto e a geometria da aquisição das imagens SAR de ambas trajetórias, assumindo que os deslocamentos laterais da ponte são negligenciáveis. A fórmula proposta para decompor os valores obtidos em LOS para valores verticais e longitudinais, é a que se apresenta em seguida:

$$\begin{bmatrix} d_{asc} \\ d_{des} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\varphi_{asc} - \alpha) \sin \theta_{asc} & \cos \theta_{asc} \\ \sin(\varphi_{des} - \alpha) \sin \theta_{des} & \cos \theta_{des} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{lon} \\ d_{ver} \end{bmatrix}$$

Equação 3.6

Em que:

θ é o angulo de incidência

φ é o angulo azimutal

α é o angulo da orientação da ponte

É de salientar que é necessário ter em consideração que a localização de dois PS em diferentes trajetórias de aquisição pode ser diferente ou até mesmo nem pertencer ao mesmo alvo e isso apresenta dificuldades em obter valores verticais e longitudinais que representem um alvo conhecido. No entanto, pode-se mitigar essa dificuldade dando atenção à resolução temporal e espacial e à correta geolocalização dos PS.

Quanto à resolução temporal e espacial esta metodologia propõe:

- Definir pontos em intervalos constantes ao longo da longitude da ponte;

- Fazer a média dos valores de pixels PS próximos de cada ponto separadamente para cada trajetória;
- Combinar as datas das aquisições ascendentes e descendentes para criar uma nova data de aquisições;
- Interpolar cada pixel no tempo e produzir a matriz de tempo de aquisição comum para que os pixels PS ascendentes e descendentes tenham pontos de dados simultâneos;
- Usar a Equação 3.6 para obter os deslocamentos verticais e longitudinais.

Quanto à correta geolocalização desses pontos, esta pode ser obtida através de um melhor MDE no co-registo, caso não seja possível obter um MDE que contenha a estrutura em estudo. Outra opção é fazer o acerto dos pixels PS em ambiente SIG após a análise StaMPS. Para isso pode-se usar a Equação 3.7 (Jung et al., 2019):

$$\Delta x = \Delta H \cdot \cot \theta \cdot \cos \varphi \quad \text{e} \quad \Delta y = \Delta H \cdot \cot \theta \cdot \sin \varphi$$

Equação 3.7

Em que:

Δx e Δy distancia em x e em y à posição real do pixel PS

ΔH é a altura topográfica.

A metodologia de pós-processamento dos resultados obtidos com o StaMPS adotada para os estudos que se apresentam no presente trabalho, segue procedimentos semelhantes aos explicados nos parágrafos anteriores para determinar os deslocamentos em SIG, conforme se passa a apresentar:

- Se necessário, corrigir a geolocalização com a Equação 3.7 dos pixels PS
- Calcular para cada um dos pixels PS os valores de deslocamento no espaço XYZ
- Definir de pontos ao longo da longitude da estrutura, normalmente em intervalos correspondentes a elementos da estrutura e/ou pontos de medição *in situ*.
- Definir um Buffer para esses pontos e, na área definida, fazer uma média ponderada dos pixels PS por trajetória (poderá não ter pixels PS de ambas) para atribuir a esse ponto.
- Interpolar por tempo acabou por não ser necessário, pois a maioria das aquisições diferenciam menos de 1 dia entre trajetórias.

- Aplicar a Equação 3.6 a todos os pontos com dados de ambas trajetórias e obter os deslocamentos verticais e longitudinais em pontos georreferenciados na estrutura.

No fim há, para cada ponto, a série temporal de deslocamento em LOS, no espaço XYZ e em Vertical e Longitudinal, com valores correspondentes às médias ponderadas das áreas que representam (buffer). Para fazer esse processamento, com uma grande quantidade de dados envolvida, foi criado um assistente de análise em *python*. O seu código foi escrito de forma a permitir também fazer várias procuras por pixels PS que correspondam a certas características de interesse, como tendências acentuadas de variação dos valores ao longo de certo número de meses e correlações entre pixels PS selecionados.

4. ESTUDO DE QUEBRA-MAR NA FOZ DO RIO DOURO

4.1. Enquadramento e descrição da estrutura

Na foz do rio Douro é possível observar um conjunto de estruturas costeiras, com as designações indicadas na Figura 4.1.

O molhe de Luiz Gomes de Carvalho data de 1820, tem 616 metros e teve como objetivo facilitar a navegação no canal de acesso ao mar, mas não chegou a ser concluído. Os molhes de Felgueiras e do Touro foram construídos entre 1790 e 1886, aquando da colocação do farolim(Santos et al., n.d.).



Figura 4.1 - Elementos na foz do rio Douro

Entre abril de 2004 e março de 2009 foram feitas as seguintes obras de melhoria de acessibilidade e segurança da barra do Douro, conforme se ilustra na Figura 4.2 (IRMÃOS CAVACO, n.d.):

- O Molhe Norte, com cerca de 450m de comprimento, constituído por elementos prefabricados de betão armado (caixotões e aduelas) encabeçados por uma superestrutura em betão.
- O Quebra-mar destacado, com cerca de 500m de comprimento, constituído por um núcleo e camadas intermédias de proteção em enrocamento e por um manto de proteção em blocos Antifer em betão de alta densidade
- Obra de reforço do Cabedelo que se desenvolve transversalmente à praia ao longo de 460m.

- Dragagens necessárias ao estabelecimento do canal de navegação, cujas areias foram depositadas no Cabedelo.

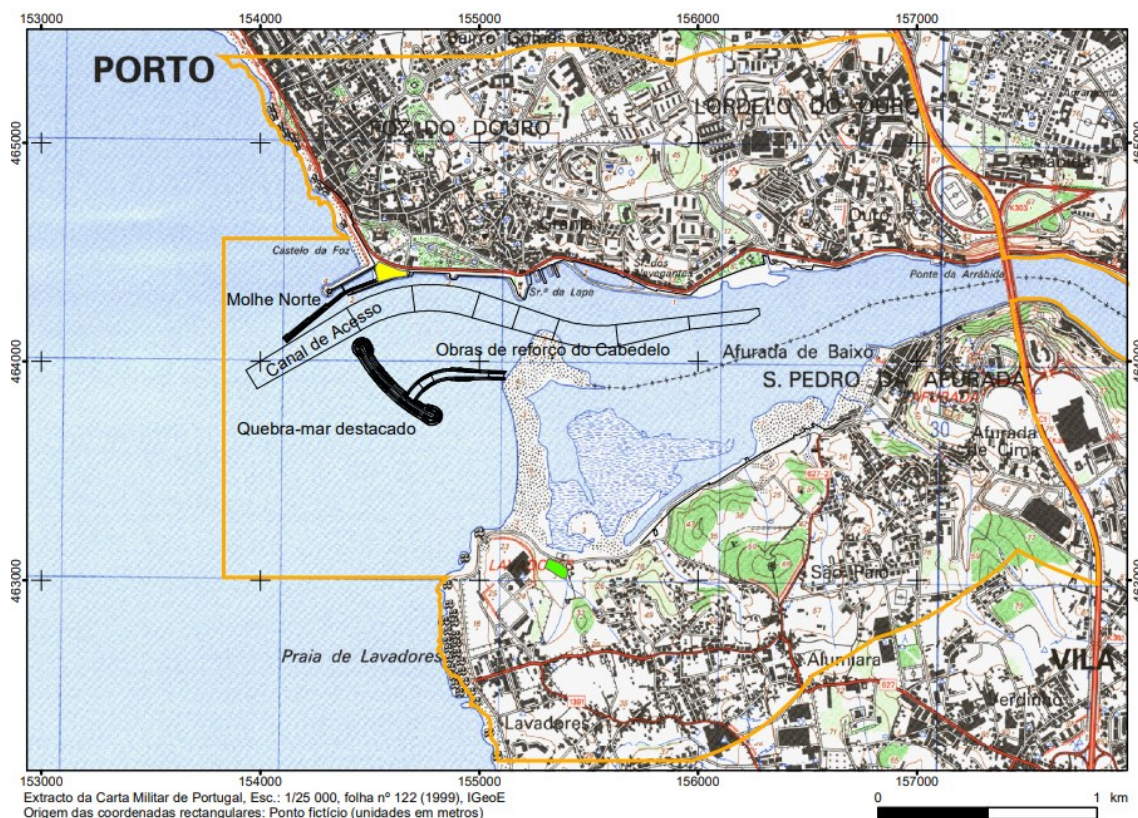


Figura 4.2 - localização das obras de melhoria. Fonte:(APAmbiente et al., 2003)

O quebra-mar destacado, que será considerado como caso de estudo, tem cerca de 450 m de comprimento, uma orientação aproximada SE-NW e uma configuração curva em planta, com a concavidade para terra. O quebra-mar está implantado a cerca de 350 m para o largo da posição atual do Cabedelo(APAmbiente et al., 2003).

Na Figura 4.3 está representado um perfil transversal-tipo de um quebra-mar destacado, constituído pelos elementos que se seguem(Pereira, 2008):

- Manto Resistente – camada exposta dos taludes anterior e posterior, que resiste diretamente à agitação, e que normalmente é composta por duas fiadas de enrocamento;
- Filtros ou Camadas Intermédias – faixas dos taludes anterior e/ou posterior que materializam a transição entre o manto resistente e o núcleo, apresentam uma granulometria menor que a do manto resistente e maior que a do núcleo, para que os finos deste se mantenham;
- Núcleo – região interior do quebra-mar, geralmente constituída por enrocamento “todo o tamanho” (TOT);

- Risberma – prisma de enrocamento localizado na base do manto resistente, desempenha funções como fundação do talude do manto resistente e podendo ainda reduzir ou evitar os fenómenos de infraescavação;
- Coroamento – zona de cota mais elevada da estrutura, que pode determinar o comportamento da estrutura perante ações físicas de agitação.

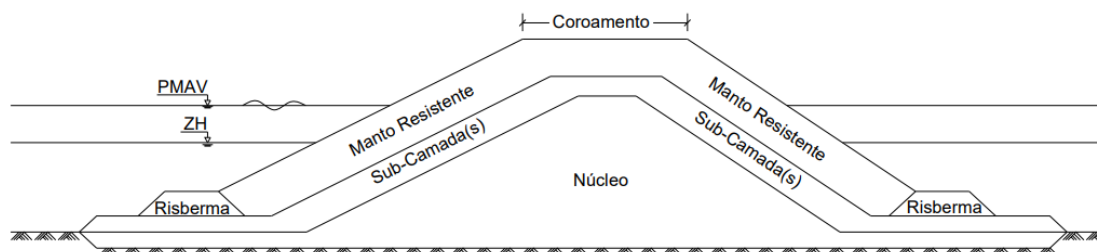


Figura 4.3 - Perfil transversal-tipo de um quebra-mar destacado. Fonte: (Pereira, 2008)

Na altura da construção, optou-se pela utilização de blocos de proteção em betão de alta densidade (blocos “antifer”) com betão escuro com intuito de permitir uma superfície mais regular. Foram propostos blocos de betão de alta densidade de 8 toneladas, em vez de blocos de 25 toneladas equivalentes do ponto de vista hidráulico. Isso permitiu reduzir de 10,4 m³ para 2,5 m³ de tamanho do bloco, enaltecendo a vantagem de uma estrutura muito mais integrada na paisagem (APAmbiente et al., 2003).

Nessa altura também se optou por uma cota de coroamento reduzida, de + 6,00 m ZH (Zero Hidrográfico), que conduziu a uma obra com uma volumetria bastante inferior à das obras típicas nestas situações (APAmbiente et al., 2003).



Figura 4.4 - Colocação do manto resistente no quebra-mar destacado. Fonte: (IRMÃOS CAVACO, n.d.)

4.2. Dados e respectivas linhas de base perpendicular e temporal

Para uma primeira aplicação da metodologia StaMPS foi decidido dividir o estudo do quebra-mar em 4 análises para o ano 2021 com uso de órbita ascendente, com uso de órbita descendente, com órbita ascendente com Modelo Digital de Terreno (MDT) personalizado e ainda com órbita descendente com MDT personalizado.

Para o efeito foram selecionadas 12 imagens de trajetória ascendente e 12 descendente, uma vez que o procedimento StaMPS é executado separadamente atendendo às respectivas trajetórias. Depois numa análise mais completa para comparação a linha temporal foi estendida para 18 imagens.

Na Figura 4.5 observa-se a geometria das imagens radar em incidência sobre a área do quebra-mar em estudo. As imagens ascendentes são de órbita relativa número 147, e as descendentes de órbita relativa 125.

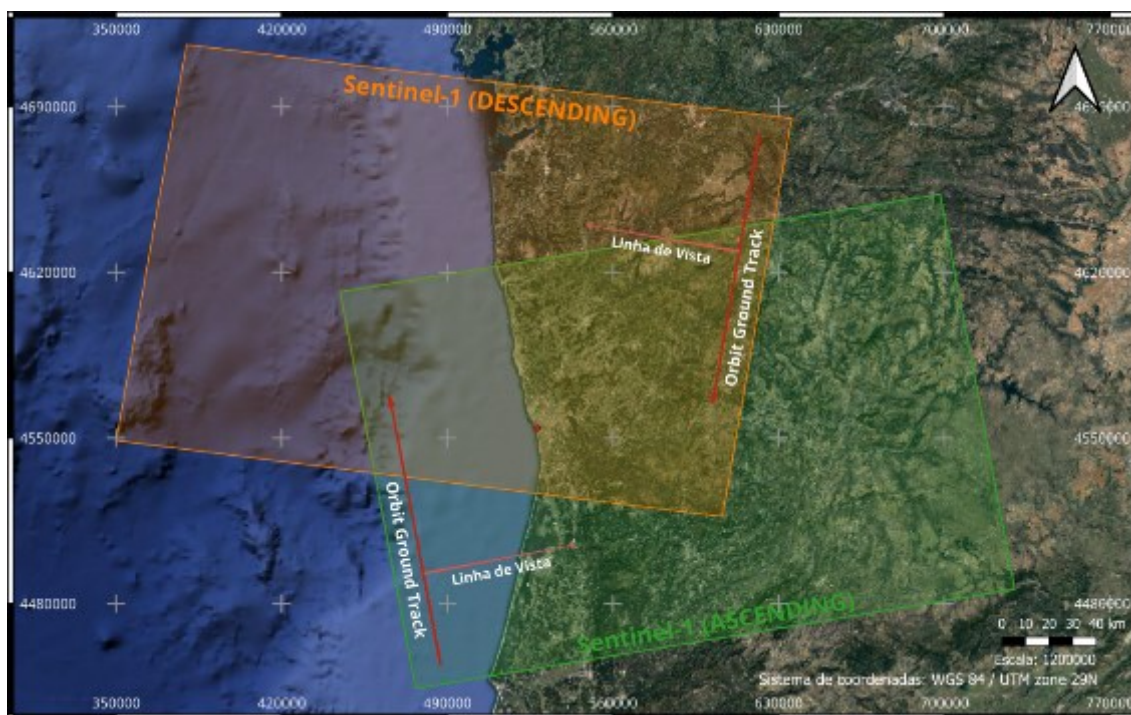


Figura 4.5 - Geometrias das imagens radar para trajetória ascendente e descendente sobre o quebra-mar em estudo

Tanto para a trajetória ascendente, como para a trajetória descendente é necessário selecionar a imagem de referência “ideal” (*master*). Na Figura 4.6 observa-se a escolha da master e respectiva coerência de cada uma das slaves no intervalo de 0,78 a 0,96 para o *stack* ascendente.

File Name	Ref/Sec	Acquisition	Track	Orbit	Bperp [m]	Btemp [days]	Modeled Coherence	Height Ambg [m]	Delta fDC [Hz]
S1A_IW_SLC_1S...	Reference	28Jun2021	147	38544	0.00	0.00	1.00	∞	0.00
20210111_IW1	Secondary	11Jan2021	147	36094	90.99	168.00	0.78	-140.04	-5.95
20210216_IW1	Secondary	16Feb2021	147	36619	-20.90	132.00	0.86	609.68	-8.21
20210324_IW1	Secondary	24Mar2021	147	37144	-14.77	96.00	0.90	862.88	-0.48
20210417_IW1	Secondary	17Apr2021	147	37494	-67.51	72.00	0.88	188.73	-3.00
20210523_IW1	Secondary	23May2021	147	38019	-34.41	36.00	0.94	370.25	-0.70
20210722_IW1	Secondary	22Jul2021	147	38894	17.89	-24.00	0.96	-712.19	-3.15
20210827_IW1	Secondary	27Aug2021	147	39419	-70.79	-60.00	0.89	180.00	-5.40
20210920_IW1	Secondary	20Sep2021	147	39769	35.95	-84.00	0.89	-354.44	-3.51
20211014_IW1	Secondary	14Oct2021	147	40119	-70.81	-108.00	0.84	179.94	-6.28
20211119_IW1	Secondary	19Nov2021	147	40644	36.47	-144.00	0.84	-349.33	-5.40
20211225_IW1	Secondary	25Dec2021	147	41169	-22.87	-180.00	0.82	557.15	-6.54

Figura 4.6 - Resultado da ferramenta InSar Stack Overview, ascendente.

As 12 imagens foram combinadas em 11 interferogramas, com linha de base perpendicular no intervalo de -70 a 90 metros e linha de base temporal de 348 dias. A imagem principal é de 2021-06-28, como se pode observar na Figura 4.7.

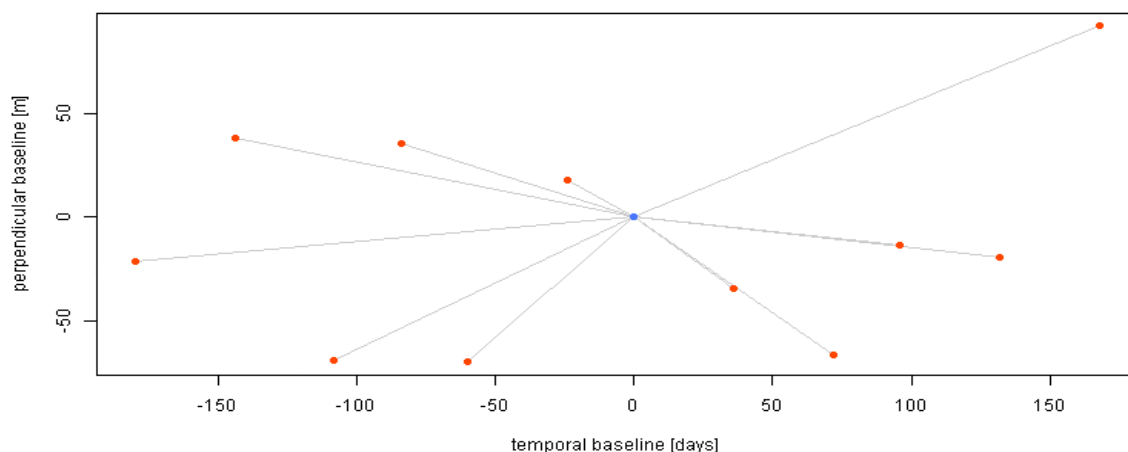


Figura 4.7 - Gráfico da relação da linha de base perpendicular e temporal relativamente à master, ascendente.

Na Figura 4.8 observa-se que a imagem do mês de agosto é selecionada como *master* para a trajetória descendente e que as coerências das *slaves* se situam entre 0,80 e 0,96.

File Name	Ref/Sec	Acquisition	Track	Orbit	Bperp [m]	Btemp [days]	Modeled Coherence	Height Ambg [m]	Delta fDC [Hz]
S1A_IW_SLC_...	Reference	02Aug2021	125	39047	0.00	0.00	1.00	∞	0.00
20210122_IW1	Secondary	22Jan2021	125	36247	-35.17	192.00	0.80	362.40	-1.58
20210203_IW1	Secondary	03Feb2021	125	36422	-15.69	180.00	0.82	812.47	1.80
20210311_IW1	Secondary	11Mar2021	125	36947	55.21	144.00	0.83	-230.84	2.51
20210404_IW1	Secondary	04Apr2021	125	37297	-84.16	120.00	0.83	151.44	2.87
20210510_IW1	Secondary	10May2021	125	37822	80.86	84.00	0.86	-157.62	3.14
20210603_IW1	Secondary	03Jun2021	125	38172	-78.31	60.00	0.88	162.75	1.22
20210709_IW1	Secondary	09Jul2021	125	38697	47.85	24.00	0.93	-266.35	10.58
20210907_IW1	Secondary	07Sep2021	125	39572	-0.48	-36.00	0.96	26585.89	3.08
20211001_IW1	Secondary	01Oct2021	125	39922	25.27	-60.00	0.92	-504.29	5.71
20211106_IW1	Secondary	06Nov2021	125	40447	49.04	-96.00	0.87	-259.90	2.65
20211212_IW1	Secondary	12Dec2021	125	40972	18.93	-132.00	0.86	-673.30	6.24

Figura 4.8 - Resultado da ferramenta InSar Stack Overview, descendente.

Essas 12 imagens foram combinadas em 11 interferogramas, com linha de base perpendicular no intervalo de -78 a 80 metros e linha de base temporal de 324 dias, como se pode observar na Figura 4.9.

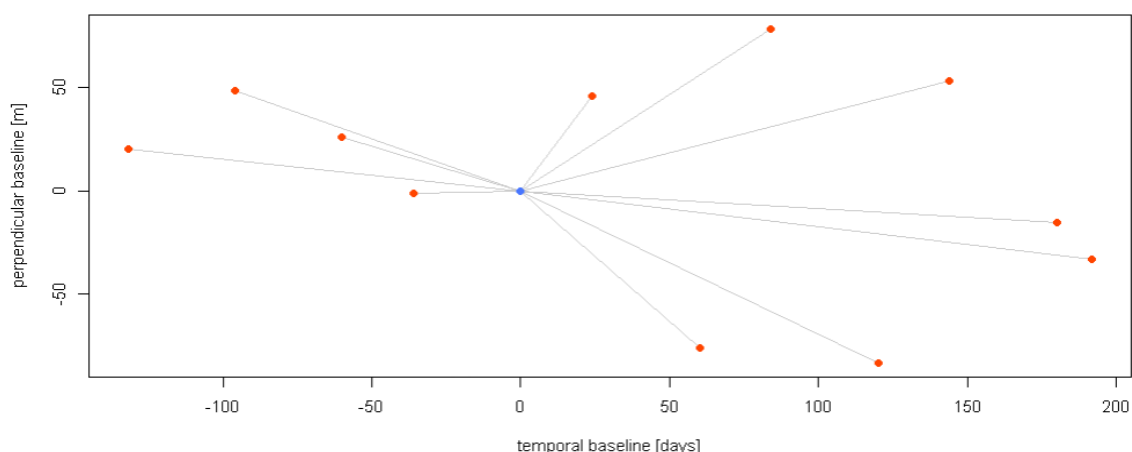


Figura 4.9 - Gráfico da relação da linha de base perpendicular e temporal relativamente à master; descendente.

4.3. Modelo Digital de Terreno

Tanto para o *stack* ascendente como para o descendente foi aplicado um MDT modificado para representação de alguns objetos artificiais de interesse. Usando os s MDE de acesso gratuito mais comuns para a zona em estudo, pode observar-se o seguinte:

- SRTM 90m e 30m (coleta do ano 2000), onde, como se pode ver na Figura 4.10, não se observam os elementos em estudo na foz do Douro.

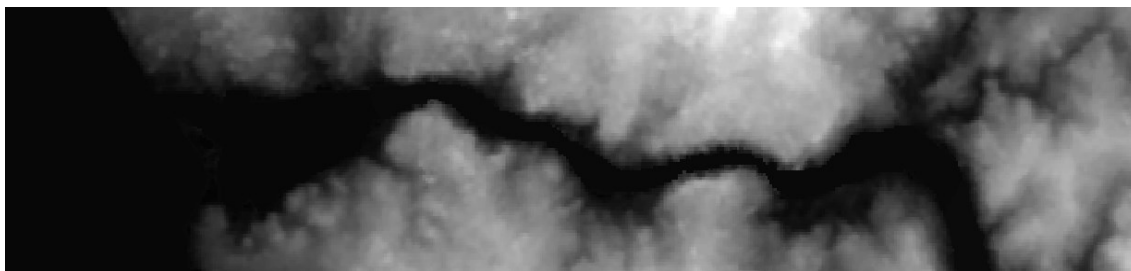


Figura 4.10 - SRTM 30m para cidade do Porto e foz do Douro

- Copernicus Global DSM 90m e 30m coleta de 2014 a 2016), ilustrado na Figura 4.11, onde se observa a restinga mais formada, também a zona urbana mais detalhada, mas a resolução não permitiu identificar a presença do quebra-mar neste Modelo Digital de Superfície (MDS).

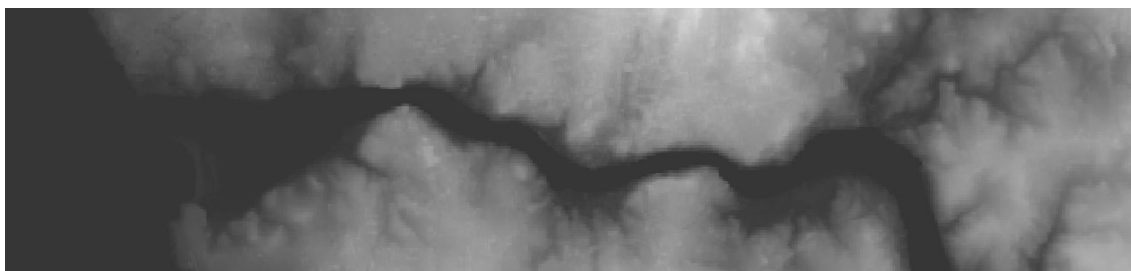


Figura 4.11 - Copernicus Global 30m para a cidade do Porto e foz do Douro

- EU DTM 30m (Baseado em GEDI, Icesat-2, AW3D, GLO-30, EUDEM, MERIT DEM), ilustrado na Figura 4.12, em que se pode verificar que é mais completo que o anterior, embora, com a escala considerada, ainda não esteja presente o quebra-mar em estudo.



Figura 4.12 - EU DTM 30 para a cidade do Porto e foz do Douro

- ALOS World 3D 30m é um MDS (coleta de 2006 a 2011), que apesar de permitir observar maior detalhe a zona urbana, com a existência de algumas pontes, como demonstrado na Figura 4.13, não tem ainda o quebra-mar em estudo.



Figura 4.13 - ALOS World 30m para a cidade do porto e foz do Douro

Dada a dificuldade de perceber a estrutura a estudar nesses modelos, foi então decidido criar um modelo digital com melhor resolução para as áreas de interesse e que incluísse as estruturas a serem estudadas. Criar um modelo digital de superfície, com melhor resolução, para um Split de uma imagem radar conduz a problemas de processamento sobretudo na etapa de *back-geocoding* e remoção da fase topográfica. Para tal, foi criado um *Variable Resolution Raster* (VRD) (Figura 4.16), no qual a resolução final para a zona urbana do porto, quebra-mar e pontes é cerca de 8,4m por 11,1m (Figura 4.15) e para a

restante área total do *split* é de 30m por 30m (Figura 4.14). Resoluções mais elevadas para as áreas de interesse provocaram falhas no processamento, lembrando que a resolução das imagens radar SLC é cerca de 14m em range e 4m em azimuth.

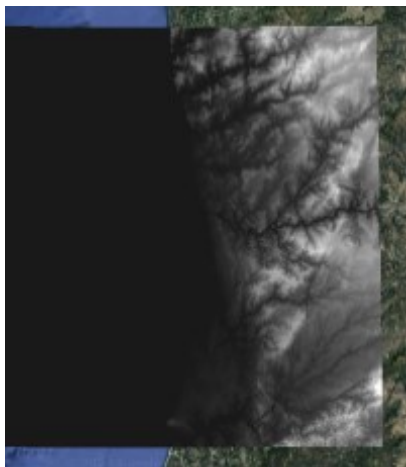


Figura 4.14 - Modelo digital do terreno que abrange os splits usados no estudo. Proveniência: Copernicus 30m

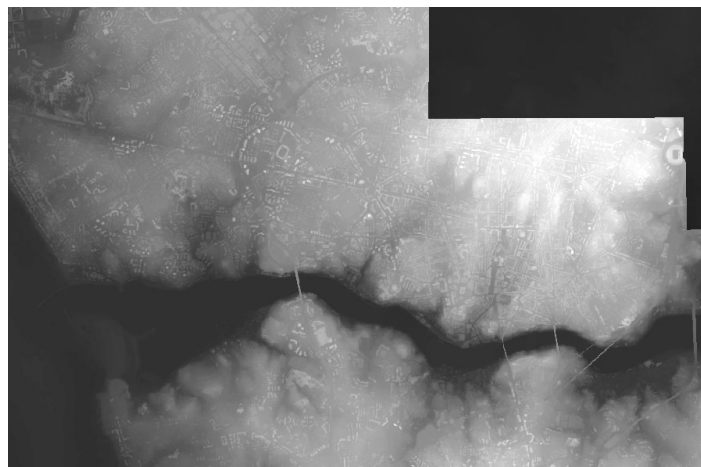


Figura 4.15 - Modelo digital de superfície usado

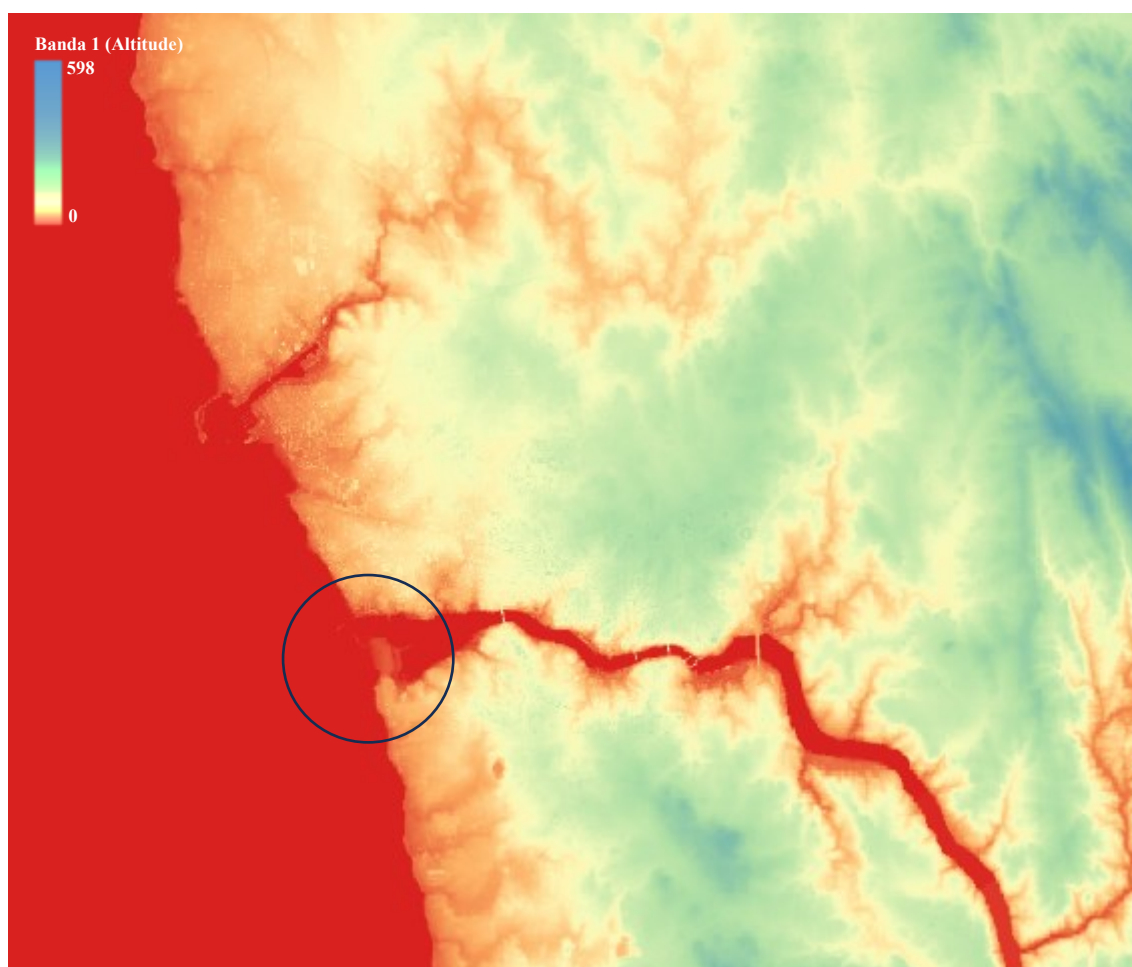


Figura 4.16 - Modelo Digital do terreno/superfície usado nos procedimentos.

4.4. Procedimentos e parâmetros usados na análise

Na Figura 4.17 é apresentado um esquema dos procedimentos para obtenção de PS. Sendo que, a estimativa do deslocamento vertical e longitudinal não é, para já, executada nestas primeiras análises.

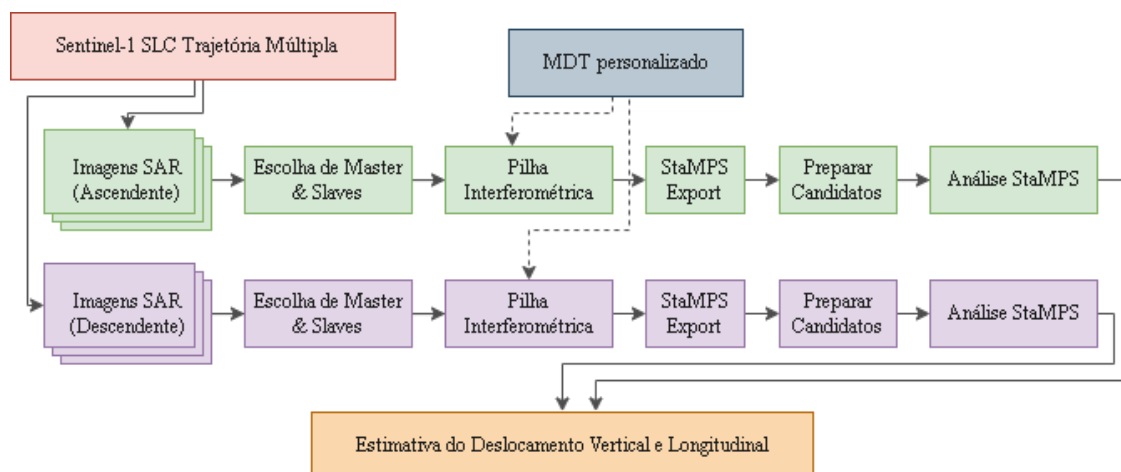


Figura 4.17 - Procedimento executado para trajetória descendente e ascendente na análise preliminar

Para estas quatro análises preliminares, os parâmetros usados para preparar os candidatos a difusores persistentes foram:

- Amplitude: 0.6
- Segmentos do alcance oblíquo: 9
- Segmentos do azimute: 3
- Sobreposição de pixels do alcance oblíquo: 50
- Sobreposição dos pixels do azimute: 200

No processo StaMPS os parâmetros que se diferenciam das configurações padrão são:

- Máximo erro não correlacionado do MDE: 5m
- Tamanho do pixel da grade (em m) usado para procurar correlação espacial: 20m
- Processo de reestimativa de gamma: desativado
- Limiar de desvio padrão; 1.2

4.5. Geometrias de interesse

Para efeitos de correções geométricas e cálculos de deslocamentos verticais e longitudinais, os ângulos de interesse estão representados na Figura 4.18.

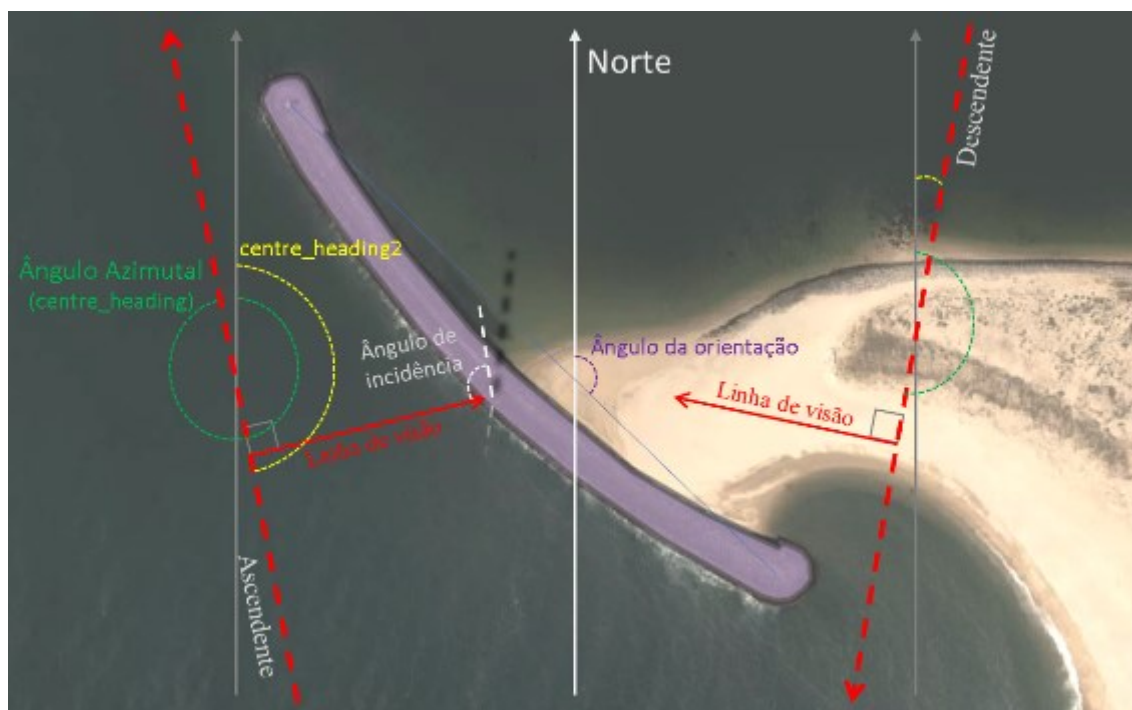


Figura 4.18 - Ângulos de enquadramento do quebra-mar para com trajetórias das imagens radar.

O ângulo de azimuth correspondente a cada trajetória deve ser medido no sentido horário a partir do Norte assim como o ângulo da orientação do Quebra-mar. A cada pixel da imagem radar é atribuído um ângulo de incidência sobre o objeto. Para este estudo foi usada uma média dos ângulos de incidência sobre o quebra-mar. Assim, os valores respectivos a cada ângulo de interesse são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Valores para os parâmetros da monitorização sobre o quebra-mar

Descrição	Símbolo	Ascendente	Descendente
Ângulo de incidência médio	θ	35,23°	36,14°
Ângulo azimutal da trajetória	φ	-10	189,9
Orientação da estrutura	α	134°	
Diferença	$\varphi - \alpha$	-144°	55,9°

4.6. Cálculo de deslocamentos

4.6.1. Trajetória descendente

Como já referido anteriormente, o quebra-mar não está presente nos MDE acessíveis, e consequentemente, a localização dos difusores persistentes, nestes casos, não corresponde à realidade. Segundo Jung *et al.* (2019), para a correção da geolocalização podemos calcular o erro de localização em linha de vista através da elevação topográfica residual e cotangente do ângulo de incidência.

Neste caso, a elevação topográfica calculada no StaMPS para o quebra-mar é muito próximo da realidade, como representado na Figura 4.19 e na Figura 4.20.

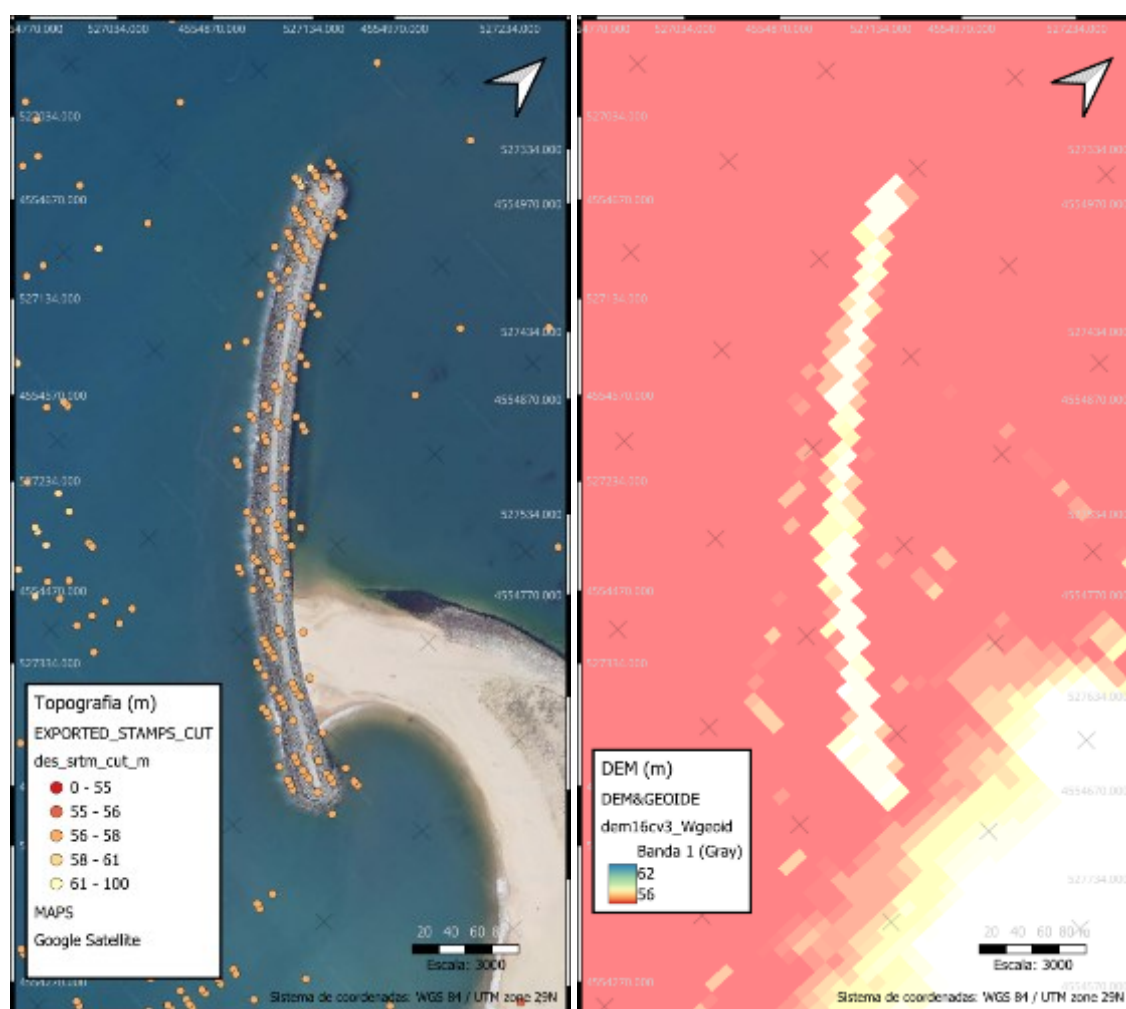


Figura 4.19 - Elevação a partir do elipsoide para cada ponto persistente calculado pelo StaMPS

Figura 4.20 - Elevação a partir do elipsoide para o quebra-mar em estudo

Na Figura 4.21 pode-se observar os difusores persistentes exportados do StaMPS, com a indicação de alguns dos deslocamentos da estrutura em zonas sobre o mar, e depois na Figura 4.22 a localização corrigida desses mesmos difusores. Estes resultados comprovam a possibilidade de correções geométricas para estruturas não presentes em modelos de elevação. A distância a ser corrigida no eixo do X foi de -76.9m e no eixo Y(virado a norte) de 13.4m.

Das várias alternativas existentes para aplicar a correção da localização, o procedimento usado foi realizado no QGIS, da seguinte forma:

- Seleção dos difusores referentes à estrutura (tendo em atenção a elevação assumida para cada ponto);
- Criação de dois campos na tabela de atributos, referentes às novas coordenadas em x e y, onde se soma a atual coordenada com o deslocamento calculado;
- Atualização da geometria dos difusores.

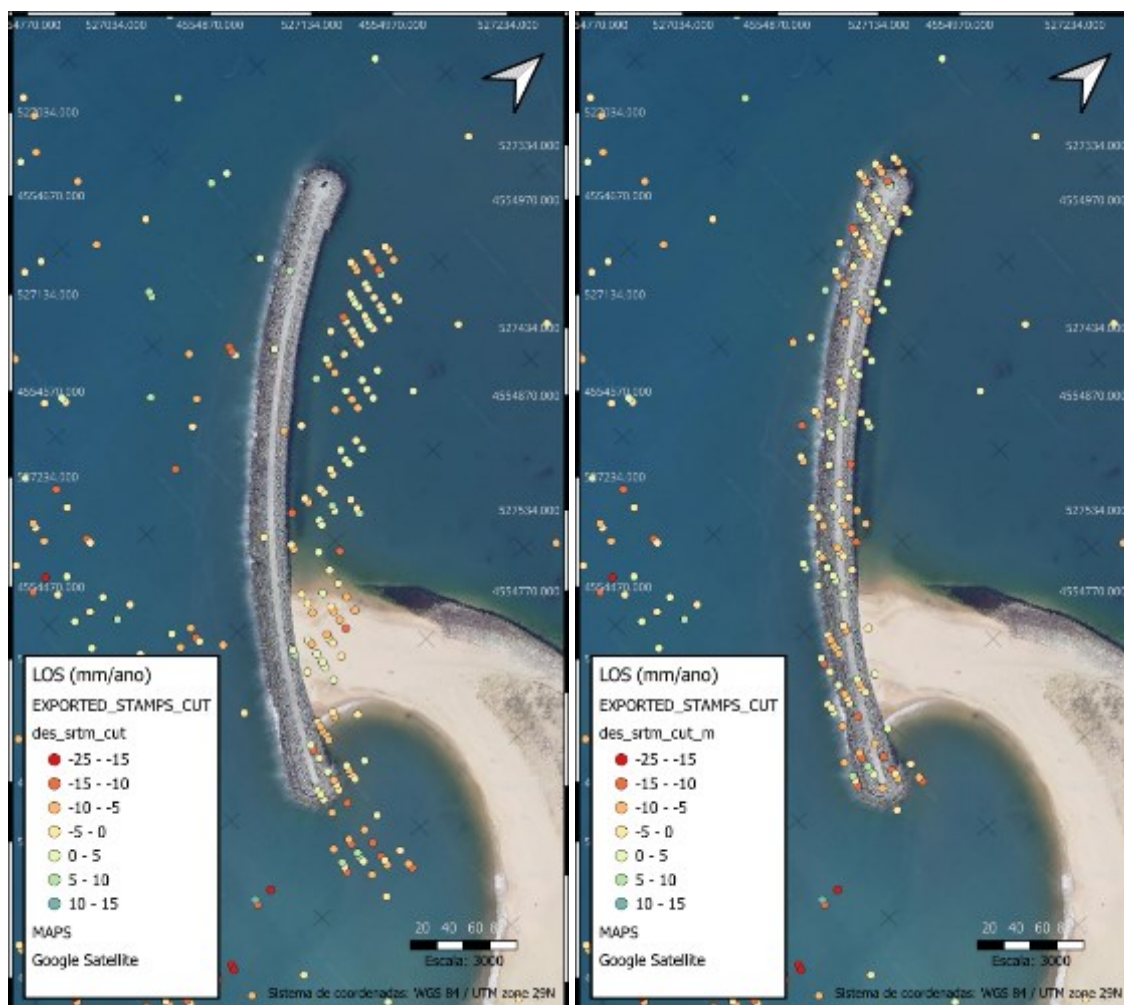


Figura 4.21 - Velocidade do deslocamento em linha de vista. Análise: descendente e SRTM

Figura 4.22 - Localização dos difusores da velocidade de deslocamento em linha de vista corrigida.

Após executar o processo StaMPS com o MDT personalizado (Figura 4.23), é possível notar a semelhança na localização dos difusores referentes ao quebra-mar. Quanto aos valores da velocidade de deslocamento há uma diferença em média de 4 mm/ano quando comparado com o não uso de MDT personalizado para esta estrutura.

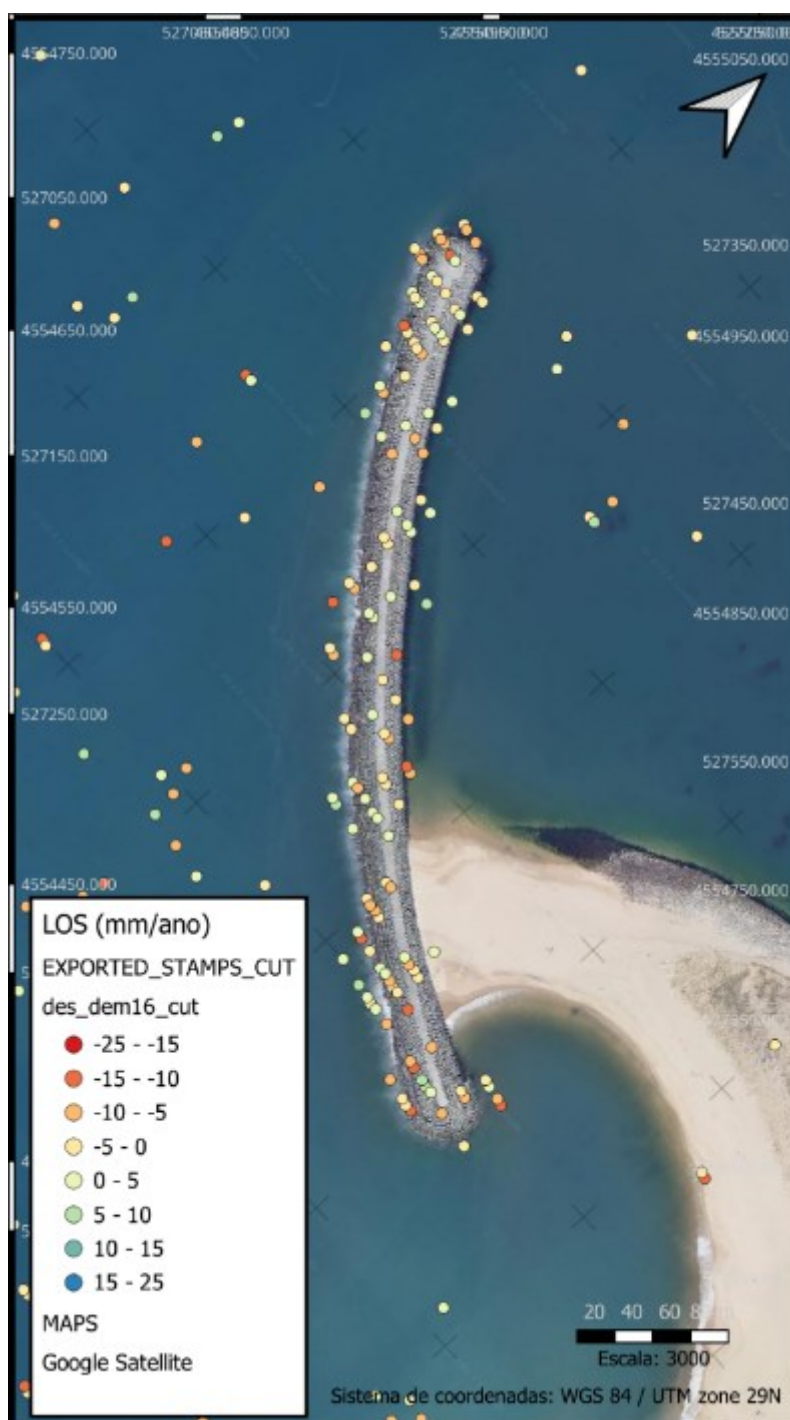


Figura 4.23- Localização e valores dos difusores da velocidade de deslocamento, usando MDT personalizado. Trajetória descendente.

4.6.2. Trajetória ascendente

Da mesma forma, a correção geográfica foi efetuada com sucesso para a trajetória ascendente como se pode verificar nas alterações da Figura 4.24 para a Figura 4.25. A correção efetuada no eixo X foi de 79.5m e no eixo Y de 14m.

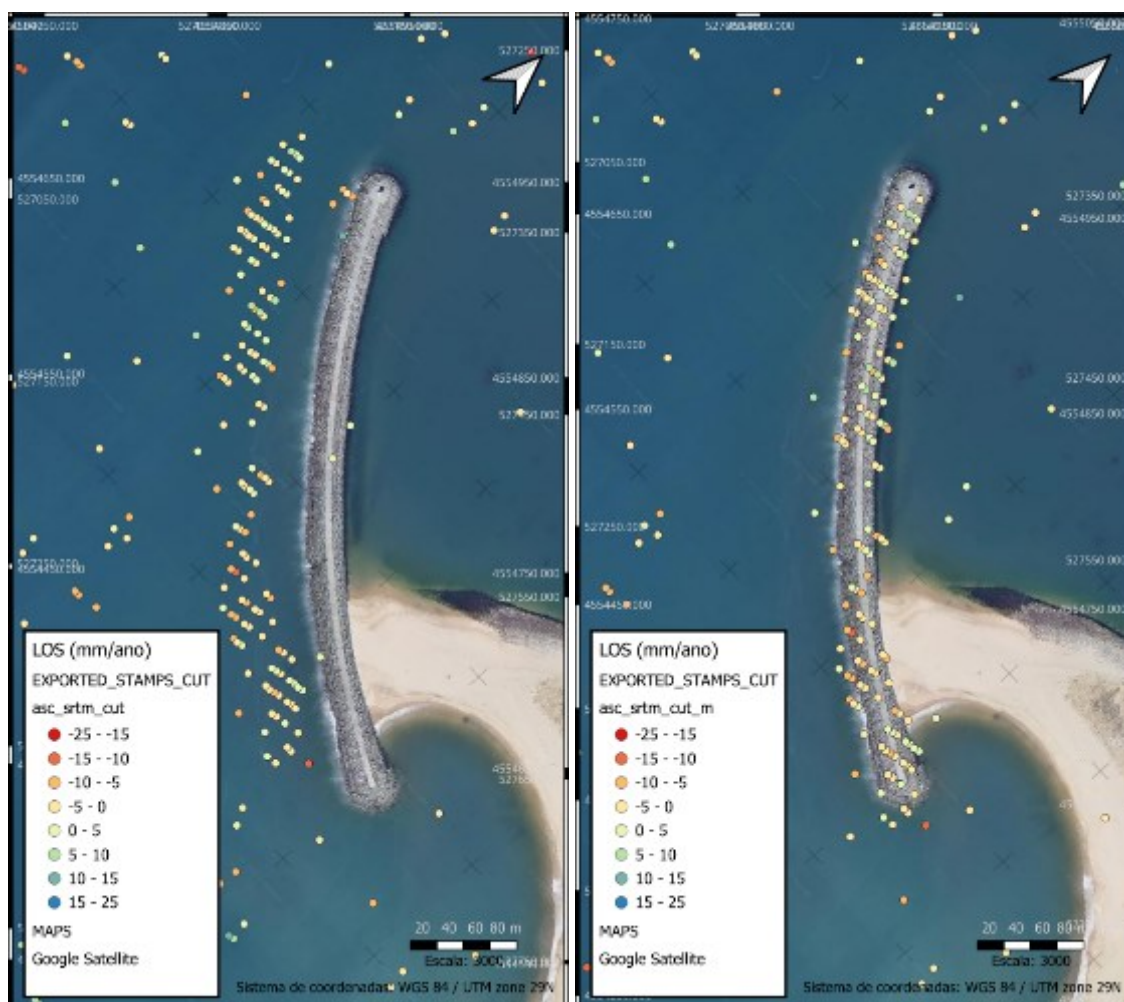


Figura 4.24 - Velocidade do deslocamento em linha de vista. Análise: ascendente e SRTM

Figura 4.25 - Localização dos difusores da velocidade de deslocamento em linha de vista corrigida.

Da mesma forma que no caso da trajetória descendente, o uso do MDT personalizado localiza corretamente os difusores, como se pode observar na Figura 4.26. As diferenças da velocidade de deslocamento entre as duas análises, ascendente com e sem MDT personalizado é em média 4 mm/ano.

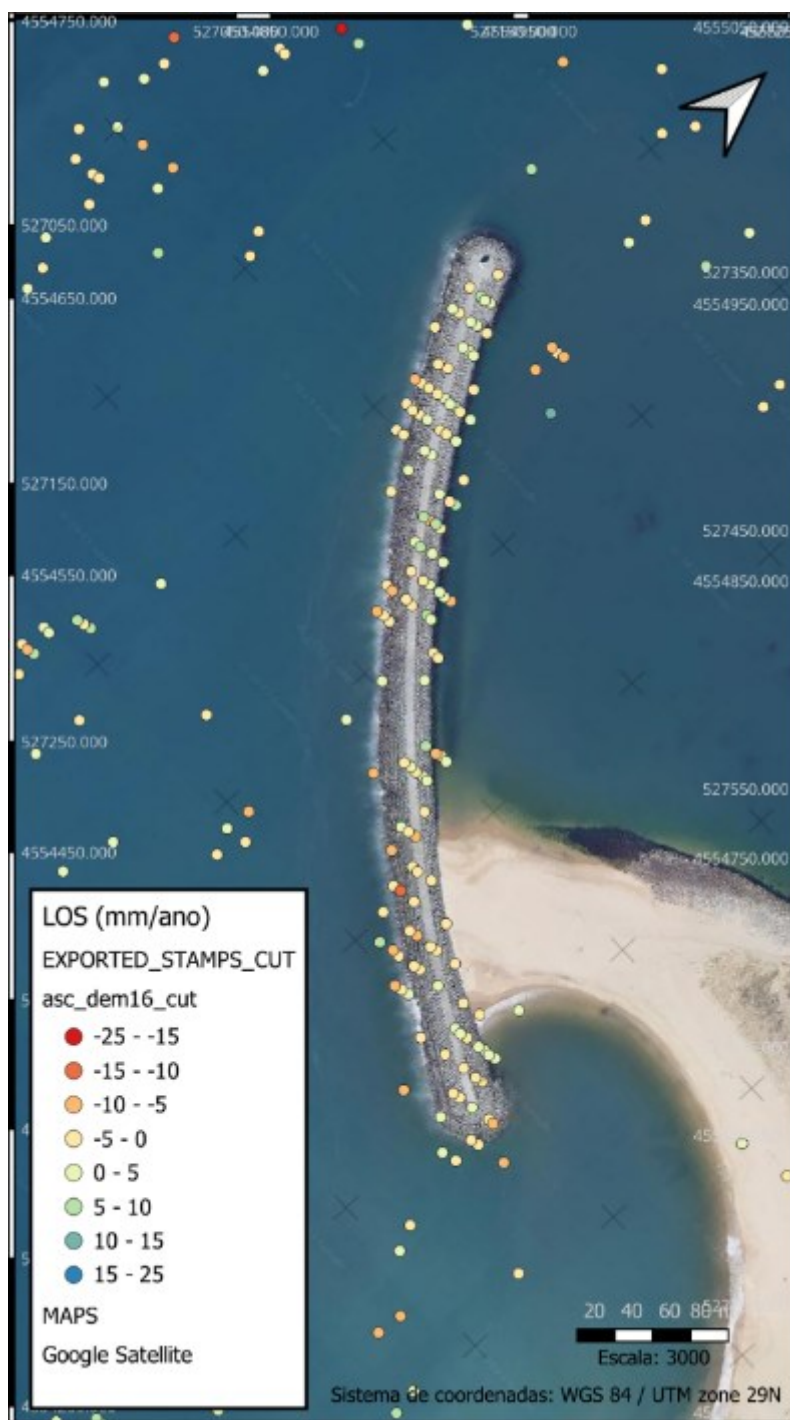


Figura 4.26 - Localização e valores dos difusores da velocidade de deslocamento, usando MDT personalizado.
 Trajetória ascendente

4.6.3. Conjugação da trajetória ascendente com a trajetória descendente

Para uma análise mais completa e comparação com valores medidos por outros processos, a linha de base temporal foi estendida para 18 meses, de janeiro de 2021 a junho de 2022. Como os blocos de betão de alta densidade do manto resistente constituem várias partes móveis, de deslocamento variável dentro daquilo que é a resolução espacial das imagens radar usadas (4 metros em alcance e 14 em azimuth), foi decidido aumentar a amplitude no processamento dos candidatos a difusores persistentes e o limiar do desvio-padrão no passo 3 do StaMPS.

Como demonstrado na Figura 4.17, esta análise mais completa tem como objetivo final cruzar os dados provenientes de uma trajetória ascendente com descendente de forma a estimar um deslocamento vertical e longitudinal além de em linha de vista.

Os parâmetros usados para preparar os candidatos a difusores persistentes foram:

- Amplitude: 1
- Segmentos do alcance oblíquo: 9
- Segmentos do azimuth: 3
- Sobreposição de pixels do alcance oblíquo: 50
- Sobreposição dos pixels do azimuth: 200

No processo StaMPS os parâmetros que se diferenciam das configurações padrão são:

- Máximo erro não correlacionado do MDE: 2m
- Tamanho do pixel da grade (em m) usado para procurar correlação espacial: 10m
- Processo de reestimativa de gamma: desativado
- Limiar de desvio padrão: 2
- Cálculo da informação imprecisa de órbita: ativado

Após processar novamente os dados no StaMPS, tanto para trajetória ascendente como para descendente, os dados foram exportados e carregados em ambiente SIG. Na Figura 4.27 é possível observar a cobertura de dados provenientes de ambas trajetórias. Na Figura 4.28 é possível observar uma suposta área de influência de cada ponto persistente.

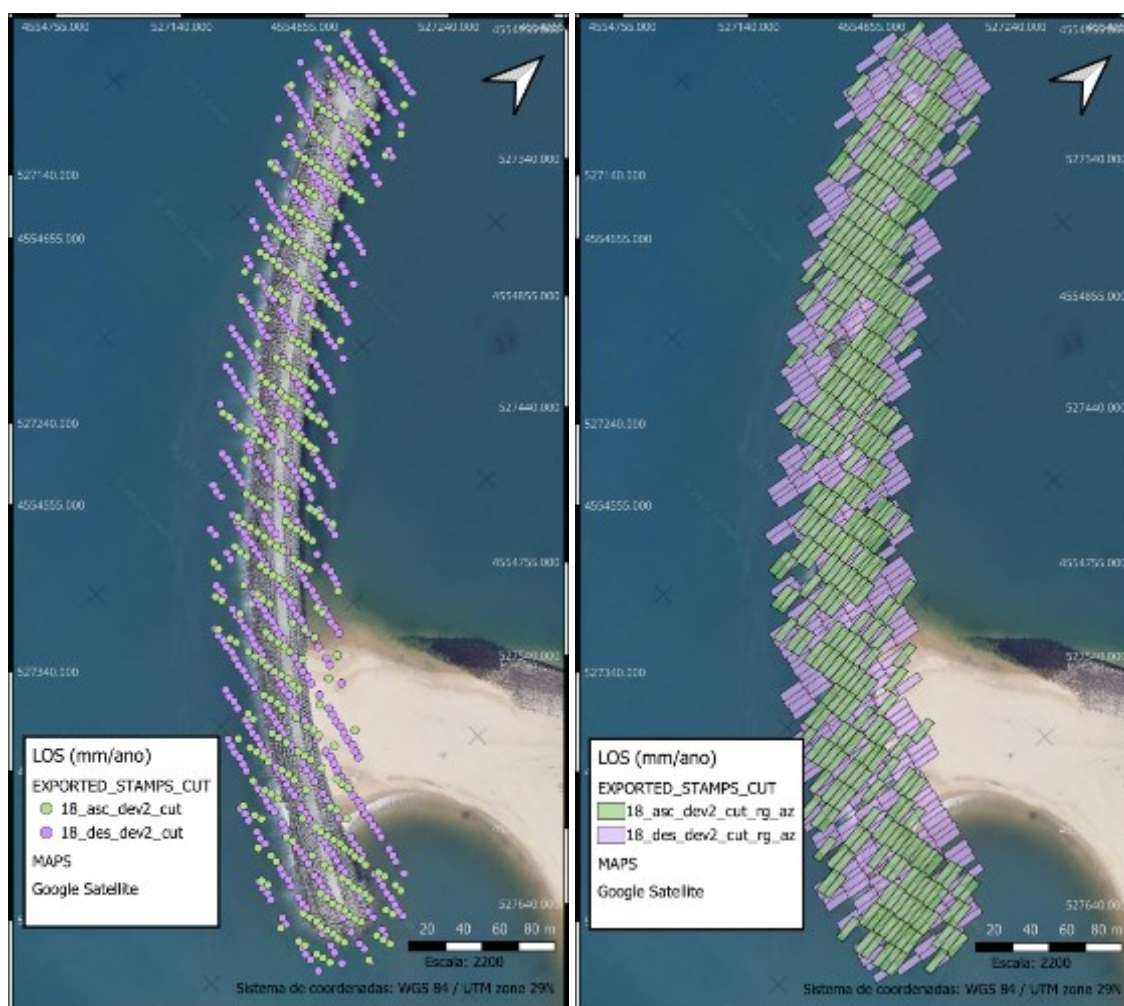


Figura 4.27 - Difusores persistentes ascendentes e Figura 4.28 - Representação da resolução espacial por ponto persistente (4m em alcance, 13m azimuth)

Nas figuras seguintes é possível observar os deslocamentos em LOS tanto para a trajetória ascendente (Figura 4.29) como para a descendente (Figura 4.30) em escala de 5mm. Perante as imagens escolhidas para cada trajetória e os parâmetros usados é identificado um número maior de difusores persistentes na trajetória descendente. Apesar de geometria de observação diferente, as estimativas apontam para mais subsidências no topo Este e elevações na zona da restinga.



Figura 4.29 - Valores da velocidade anual de deslocamento em linha de vista para trajetória ascendente



Figura 4.30 - Valores da velocidade anual de deslocamento em linha de vista para trajetória descendente

Com o intuito de realizar uma análise mais detalhada, foi então decidido dividir o quebra-mar em 3 seções que representam a estabilidade da superfície, conforme ilustrado na Figura 4.31. Os blocos de alta densidade dividem-se em duas seções, a rampa inclinada e as duas fileiras de inclinação mais horizontal como coroamento. Outra seção considerada é a laje de serviço (zona transitável) que se espera ser a seção mais estável da estrutura. Apesar de inicialmente o coroamento do quebra-mar ter 5 fileiras de blocos de alta densidade virados a noroeste e 3 fileiras viradas a nordeste, foram apenas consideradas as duas fileiras com posição mais próxima à original.

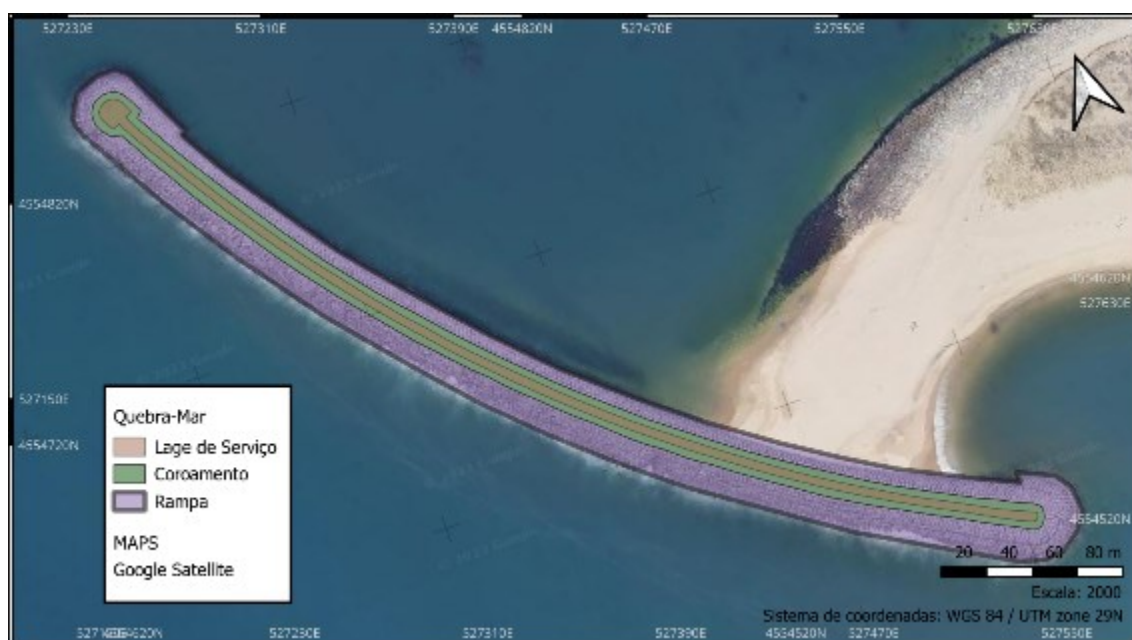


Figura 4.31 - Divisão do quebra-mar por estabilidade da superfície.

Após dividir a estrutura nessas diferentes áreas, foram definidos pontos e respectivas áreas de influência ao longo do eixo longitudinal cobrindo toda a extensão, como representado na Figura 4.32. O objetivo é fazer uma redistribuição espacial para cruzar os difusores persistentes de trajetória ascendente com descendente.

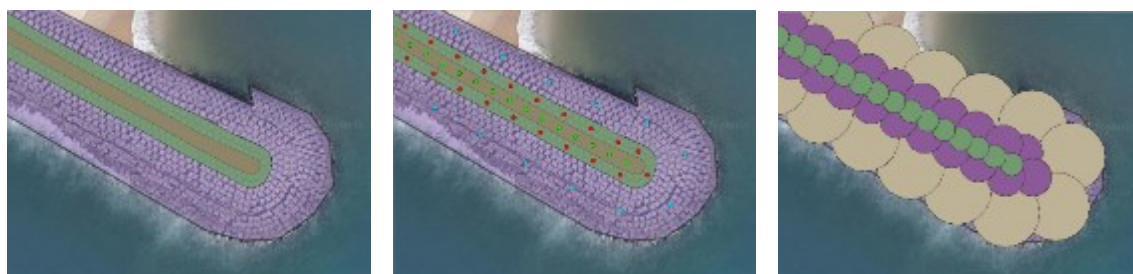


Figura 4.32 - Definição simples das áreas de influência para fazer reamostragem espacial.

De seguida, foi calculada uma média dos valores da velocidade e das series temporais dos difusores persistentes dentro de cada uma dessas áreas de influência, tanto para trajetória ascendente como para trajetória descendente. Dado que nem todas as áreas de influência contem difusores persistentes de trajetória ascendente e/ou descendente, nestes casos é excluído o cálculo de deslocamentos verticais e longitudinais. Outra opção seria usar interpolação dos difusores para cada trajetória de forma a ter dados simultâneos sobrepostos dispensando as áreas de influência criadas.

Posto isto, cada área de influência tem associado uma velocidade do deslocamento médio e uma serie temporal dos deslocamentos médios, ao qual é aplicada a Equação 3.6 para reconstruir os deslocamentos verticais e longitudinais (Jung et al., 2019).

Na Figura 4.33 e Figura 4.34 estão representados, respectivamente, os deslocamentos verticais e os deslocamentos longitudinais obtidos após esse processamento. Tendo em conta a Figura 4.29 e a Figura 4.30, quanto maior for a diferença entre o deslocamento proveniente da trajetória ascendente e o deslocamento proveniente da trajetória descendente, maior é o deslocamento longitudinal. Quanto menor a diferença referida, dependendo da grandeza, maior será o deslocamento vertical.



Figura 4.33 - Deslocamentos verticais



Figura 4.34 - Deslocamentos longitudinais

4.7. Análise dos resultados por comparação com medições baseadas em ortofotomapas

Na Figura 4.35 os deslocamentos verticais estimados com a aplicação da metodologia apresentada com os obtidos a partir de ortofotomapas, gerados a partir de fotografias aéreas ortoretificadas, consultados por cortesia do Foto Engenho, Lda.

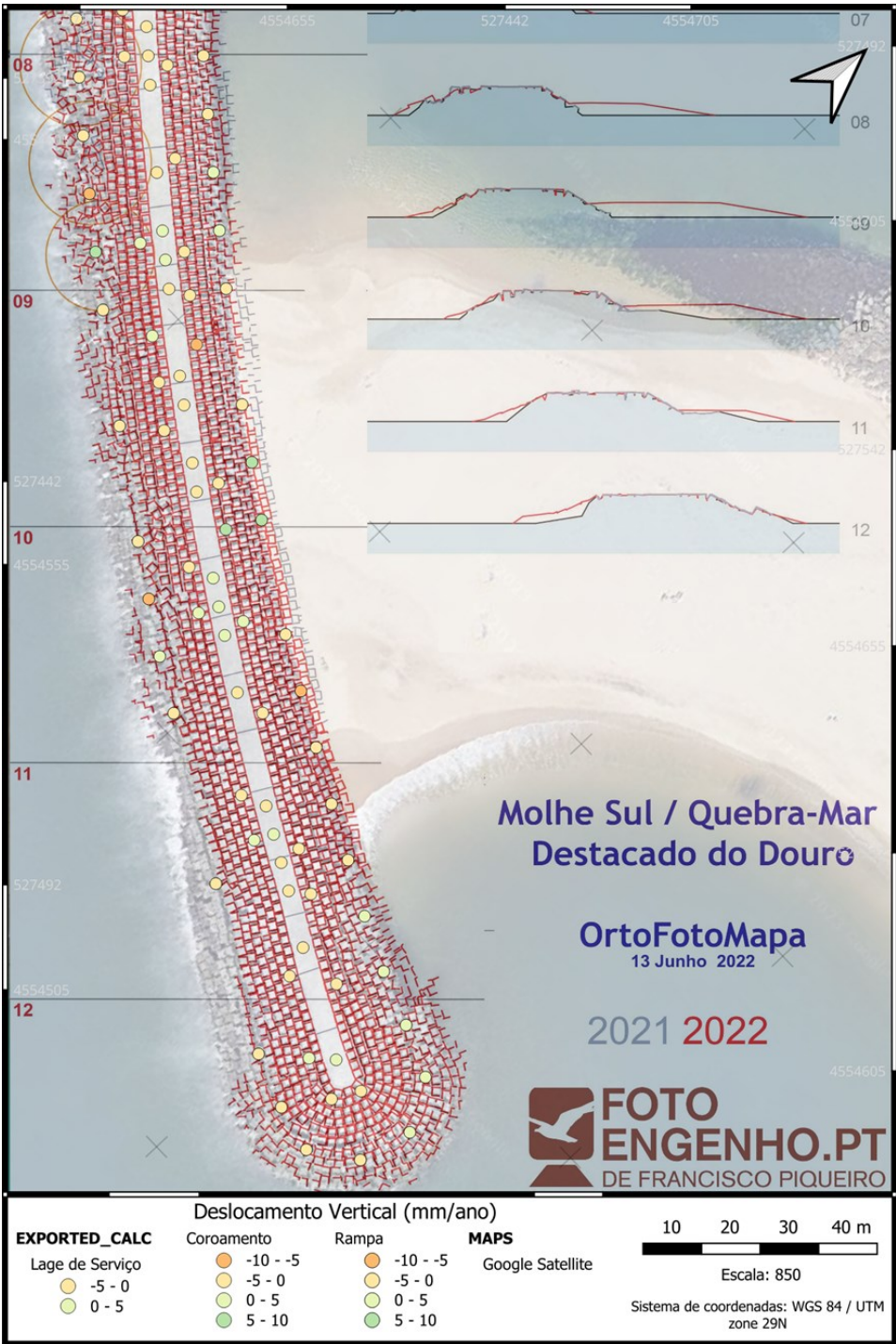


Figura 4.35 - Comparação dos resultados obtidos por sobreposição com medições baseadas em ortofotomapas.
Fonte: Foto Engenho, Lda (Piqueiro, n.d.)

Na Figura 4.35 observa-se os deslocamentos verticais estimados com a aplicação da metodologia apresentada com os obtidos a partir de ortofotomapas, de janeiro de 2021 a junho de 2022.

A estrutura em análise tem muitas partes móveis com áreas superficiais inferiores à resolução das imagens radar o que torna desafiante a obtenção e análise dos resultados. Esta análise apenas pode ser ilustrativa de um teste de aplicação, na medida que o processo StaMPS aplicado “procura” por difusores estáveis ao longo do tempo e, como observado na Figura 4.35, existem grandes variações ao longo da estrutura, sobretudo nas superfícies de blocos de betão de alta densidade.

Nas figuras seguintes (Figura 4.36 a Figura 4.42) é realizada uma análise da existência de uma correlação entre os dados obtidos e os medidos com ortofotomapas. Valores positivos de velocidade de deslocamento significam um aumento na elevação nos cortes assinalados, valores negativos uma diminuição. A linha vermelha representa a medição local na superfície 18 meses depois da medição relativa à linha cinzenta. A comparação em zonas assinaladas com círculos correspondentes a cerca de 8 metros, verificando se há maioritariamente aumento ou diminuição na elevação – círculos verdes correspondem a zonas em que é encontrada uma correspondência, vermelhos a zonas em que não há correspondência, laranjas a casos inconclusivos e pretos a situações em que não há dados.

Para o corte 6 observado na Figura 4.36 foram identificadas 3 zonas que correspondem à tendência dos deslocamentos e uma zona que não corresponde. Para essa zona, apesar de no local ser medido um acréscimo na elevação, a análise dos dados radar apontam uma tendência contrária. Para o corte 7 (Figura 4.37), da esquerda para a direita, as duas primeiras zonas onde são observadas elevações locais maioritariamente positivas correspondem a tendências positivas de velocidade de deslocamento. Também é observada uma diminuição de elevação correspondente na zona 4 que corresponde a uma tendência negativa do deslocamento.

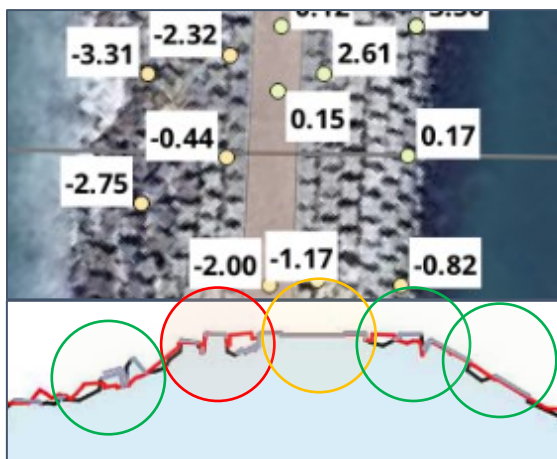


Figura 4.36 - Corte 6

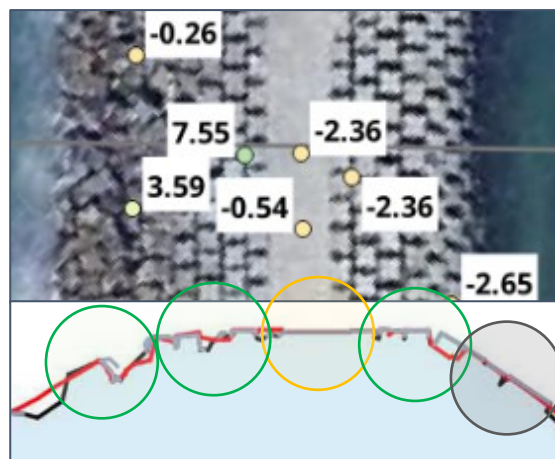


Figura 4.37 - Corte 7

No corte 8 (Figura 4.38) as zonas que demonstram aumento e perda de elevação na área de influência do ponto persistente são consideradas inconclusivas. A verde as zonas com considerável diminuição correspondem a valores negativos de deslocamento vertical.

No corte 9 (Figura 4.39), à semelhança do corte 8, não é perceptível se em várias zonas é predominante uma perda ou aumento de elevação. A primeira zona foi considerada como tendo uma correlação

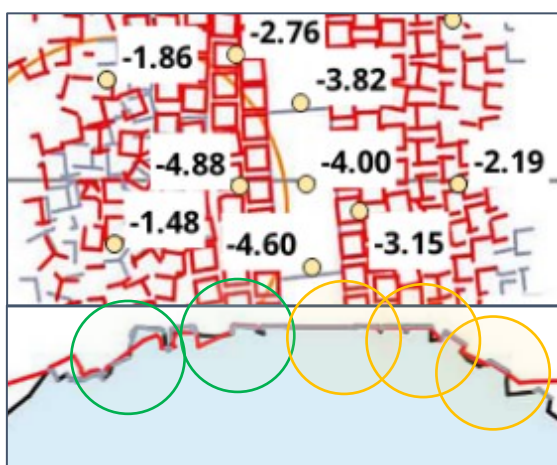


Figura 4.38 - Corte 8

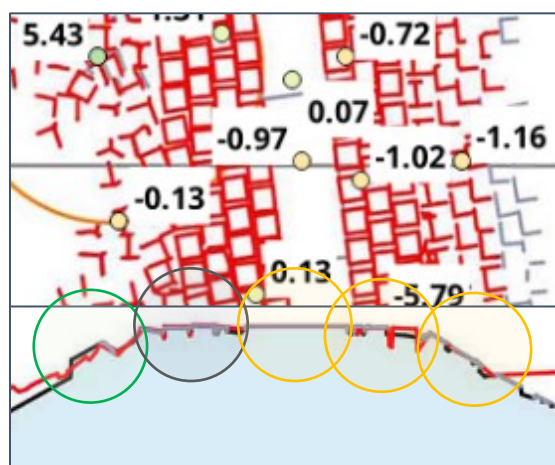


Figura 4.39 - Corte 9

Na primeira zona do corte 10 (Figura 4.40) não foi encontrada uma relação, a medição local indica um aumento na elevação e o deslocamento calculado indica uma diminuição. A zona 4 e 5 é predominante um aumento da elevação que corresponde a uma tendência também de deslocamento vertical positivo. No corte 11 (Figura 4.41) observa-se 3 zonas onde não é possível fazer uma comparação. Nas outras zonas é possível observar uma diminuição ligeira da elevação medida no local, que corresponde a uma tendência de deslocamento negativo calculado.

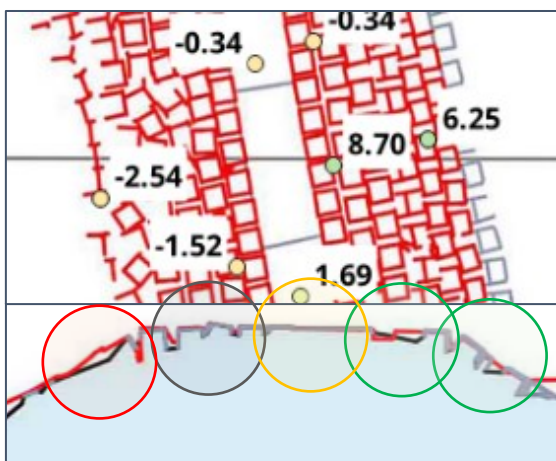


Figura 4.40 - Corte 10

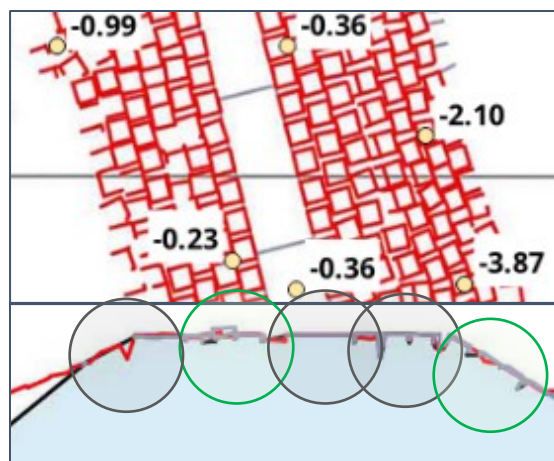


Figura 4.41 - Corte 11

No Corte 12 (Figura 4.42) é possível apenas concluir que há uma correspondência na zona 4 que denota uma diminuição na elevação medida no local, assim como uma tendência negativa do deslocamento calculado.

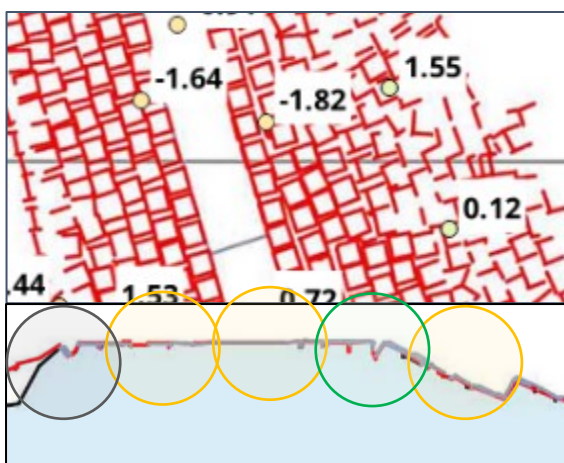


Figura 4.42 - Corte 12

Posto isto, de 35 zonas de verificação consideradas, foram encontradas 14 correlações entre medições no local e deslocamentos calculados, 12 zonas não conclusivas, 7 zonas não possíveis de comparar e 2 zonas onde a comparação se demonstrou contrária ao expectável. Todos os valores obtidos para as lajes de serviço são inconclusivos por falta de valores numéricos para comparação.

Apesar de se ter realizado uma análise dos dados obtidos, é de salientar que se considera que este estudo foi um trabalho exploratório e não é de todo conclusivo. Uma vez que comparar valores da velocidade de deslocamento anual numa estrutura em que cada pixel contem vários objetos (como os blocos de alta densidade) que se movem aleatoriamente pode induzir em erros. Isto porque a resposta de difusão (vetor de soma do sinal) de uma

célula de resolução é a soma de milhares de difusões individuais. Contudo, considera-se que o exercício realizado neste caso de estudo permite retirar algumas lições, tais como, o importante uso de um correto MDE, pois isso altera os valores do deslocamento pelas estimativas em muitos dos passos do StaMPS.

Ainda na questão do MDE, um *raster* maior, com mais detalhes, aumenta a carga no processamento e o número de erros a acontecer sobretudo no co-registo. Outra das lições é a importância de avaliar a série temporal, que levou a perceber a necessidade de automatizar mais alguns processos para as restantes aplicações.

Complementarmente, foram analisadas ainda algumas pontes sobre o rio Douro (Figura 4.43) onde o MDE personalizado não corrigiu a localização dos pontos em estruturas mais altas.

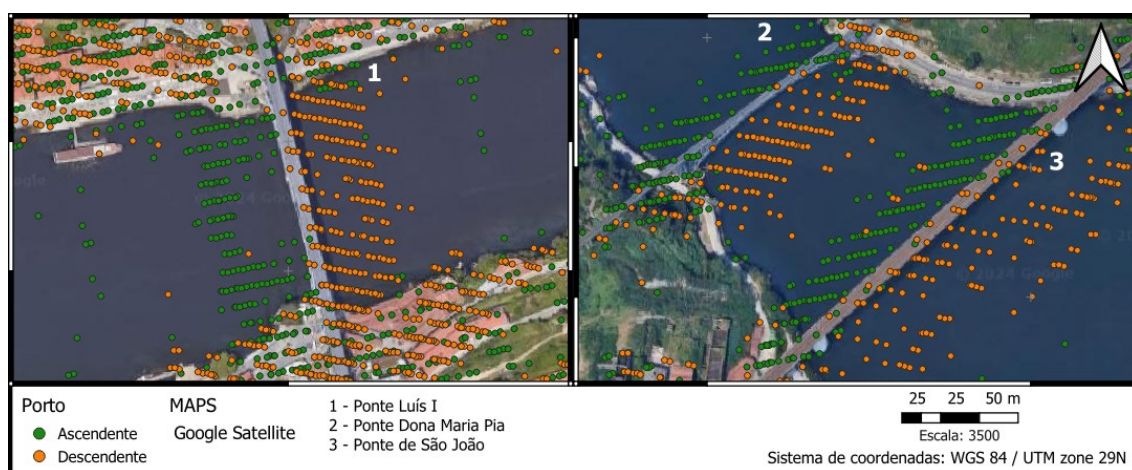


Figura 4.43 - PS sobre pontos no rio Douro, Porto.

5. ESTUDO DE PONTES EM SANTARÉM

5.1. Enquadramento e descrição das estruturas

A Figura 5.1 apresenta a localização das duas pontes que foram objeto de estudo no distrito de Santarém, assim como os pontos usados no StaMPS como referências para correção dos deslocamentos, designados por “Ref. 1” e ”Ref. 2”. A área de interesse, que abrange partes do concelho de Santarém, Almeirim e Cartaxo, considerada para o tratamento das imagens satélite e consequentemente no StaMPS, engloba estas estruturas a estudar.

A ponte D. Luís situa-se entre o concelho de Santarém e Almeirim, sendo que a parte da ponte a ser estudada situa-se na freguesia de Almeirim, concelho de Almeirim. A ponte da Asseca situa-se entre as freguesias do Vale de Santarém e a União de freguesias da Cidade de Santarém, no concelho de Santarém.



Figura 5.1 - Pontes em estudo e áreas de referência para StaMPS

5.1.1. Ponte D. Luis

A ponte D. Luís (Figura 5.2) liga os concelhos de Almeirim e Santarém e foi inaugurada a 17 de setembro de 1881 como parte da rede de estradas do fontismo. Nessa altura, foi considerada a maior da Península Ibérica, a terceira da Europa e a sexta do mundo (Cláudio, n.d.). A construção foi efetuada por companhias metalúrgicas francesas Fives-Lille, de Lille e Schneider & Cie., de Creuzot, a partir de projeto dos arquitetos Bento Fortunato de Moura Coutinho de Almeida d'Eça, Joaquim Simões Margiochi, Frederico Augusto Pimentel e António Lourenço da Silveira (Mendonça, 1997).

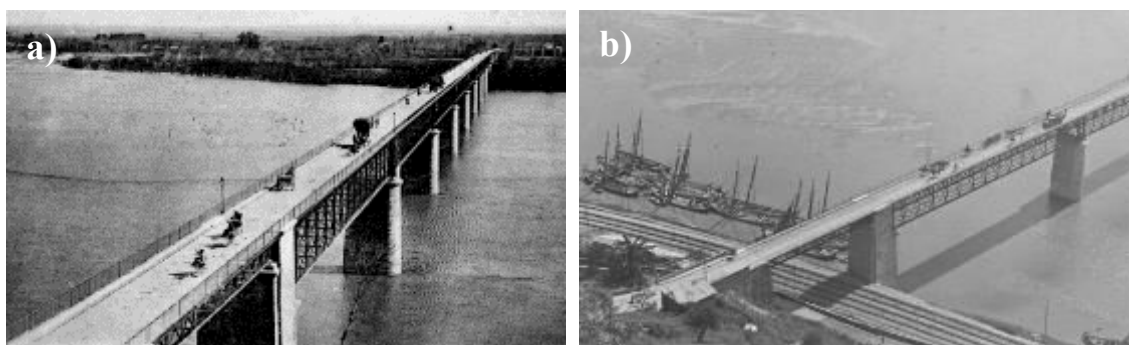


Figura 5.2 - Ponte D. Luis no início do século XX. Fonte: a) - (eugostodesantarem.pt, 2015); b) - (eugostodesantarem.pt, 2020)

A ponte, ilustrada na Figura 5.2, com um custo de construção de 376.353,139 reis, tem 1214m de comprimento, 22m de altura máxima sobre o nível de estiagem, 6 metros de largura à altura e é constituída por duas partes distintas – uma sobre o leito do Tejo e outra sobre a margem esquerda do rio (Cláudio, n.d.). Uma primeira parte com 620 metros sobre o leito do rio Tejo tem 11 pilares em cantaria interligados por estrutura metálica em gaiola, sobre os quais assenta um tabuleiro retilíneo. As fundações destes pilares foram construídas com recurso a caixões de ar comprimido. Os pilares apresentam talhamares arredondados, à exceção dos dois primeiros e dois últimos que tem forma prismática. Uma segunda parte, sobre a margem esquerda numa zona difícil de mouchões e pauis, constituída por 37 pilares de ferro fundido executados no local recorrendo à cravação por uma máquina especial à época, interligados por vigas metálicas em cruz, onde assenta um tabuleiro levemente inclinado. Em ambas as partes, o tabuleiro é ladeado por passeios para transeuntes, protegidos por corrimão metálico (Mendonça, 1997). É sobre a segunda parte que o estudo dos deslocamentos foi realizado (ver Figura 5.3.)

Ao longo dos anos a ponte sofreu alguns melhoramentos e alterações sobretudo de 1950 a 1959 com a substituição do tabuleiro em madeira, obras de alargamento das faixas de

rodagem para cerca de 8 metros e reforço de estruturas, sob a direção do engenheiro Edgar Cardoso (Mendonça, 1997). Estas alterações podem-se observar na Figura 5.3.



Figura 5.3 - Ponte D. Luís na atualidade, a) parte sobre o leito do rio Tejo (Torres, 2013), b) parte sobre a margem esquerda (Garcia, 2012).

5.1.2. Ponte da Asseca

A ponte rodoviária da Asseca fica próxima de outra ferroviária com o mesmo nome, no entanto, dado que só a primeira é que será analisada no presente trabalho, passará a ser designada apenas por Ponte da Asseca. A ponte localiza-se em Santarém (Figura 5.4) e terá uma primeira menção datada de 1243 (Viana, 2009). Esta ponte apesar de atualmente muito modificada, terá estado em ruínas no século XVI (Mantas, 2012). Sendo depois referida numa publicação de 1874 que faz referência a Santarém, onde se diz que “*D. Manuel a ennobreceu com templos grandiosos, fez construir fontes, calçadas, a extensa ponte de Asseca e a celebre torre das cabaças*” (Baptista, 1874).



Figura 5.4 - Ponte da Asseca no início do século XX (Cardoso, 2013)

Na Figura 5.5 é possível ver o lado a montante da ponte da Asseca na atualidade. A ponte tem cerca de 120 metros de comprimento e 7 metros de largura, que passam a totalizar 8 metros considerando o passeio para transeuntes. Apenas há passeio do lado montante, com corrimão de proteção metálico, como se pode observar na Figura 5.6. A ponte tem 6 arcos, 5 pilares com talhamares triangulares tanto a montante como a jusante. O perfil da ponte é em cavalete ligeiro, permitindo vãos mais altos que facilitam a passagem das águas em tempos de cheias, como se pode observar na Figura 5.6. A ponte aparenta ter aduelas que ajudam a formar a curvatura semicircular característica dos arcos. A parede de suporte entre arcos (*spandrel*) que na Figura 5.4 parece ser em cantaria grossa, atualmente parece estar revestida por algum tipo de argamassa (Figura 5.5).



Figura 5.5 - Ponte da Asseca na atualidade - lado montante (Cardoso, 2012)



Figura 5.6 - Ponte da Asseca – vista de Santarém para o Cartaxo (Google Street View).

5.2. Dados e respectivas linhas de base perpendicular e temporal

Foram selecionadas imagens para trajetória ascendente e descendente, sendo que as imagens ascendentes são de órbita relativa número 147, e as descendentes de órbita relativa 125. A geometria em relação à área de estudo pode ser observada na Figura 5.7.



Figura 5.7 - Geometria das imagens radar para trajetória ascendente (a verde) e descendente (a cor de laranja) sobre as duas pontes de Santarém em estudo.

Quanto mais afastado o objeto estiver do sensor maior a inclinação, maior o ângulo de incidência e por consequência melhor será a resolução. A opção por uma menor inclinação da linha de vista rege-se na preocupação com a necessidade de combinar difusores persistentes com qualidade entre as duas trajetórias a fim de obter um deslocamento vertical e longitudinal, uma vez que se pressupõe que dois pontos necessários se refiram ao mesmo objeto, neste caso uma estrutura em altura. Outro dos motivos é apontado em (Qin et al., 2017) em que geralmente ângulos de incidência mais baixos são mais sensíveis a deslocamentos verticais.

No cálculo de valores com trajetória múltipla em objetos com altura, dois pontos próximos podem ser reflexo de duas partes diferentes com movimentações próprias de um objeto e assim induzir em erro o significado dos resultados, ao contrário de objetos mais próximos ao solo. Por esta razão é importante o cuidado com identificar a que objeto dominante se refere um pixel PS.

Foram adquiridas 35 imagens para cada trajetória, para o período de março de 2022 a abril de 2023. No que se refere às imagens em trajetória ascendentes, apresentadas na Tabela 5.1, a ferramenta InSAR Stack Overview selecionou como master a aquisição de 27 de setembro. Após a formação de interferogramas, as coerências entre as *slaves* e a *master* variam de 0,75 a 0,95.

Tabela 5.1 - Resultado da ferramenta InSAR Stack para aquisições em trajetória ascendente

Nome do Arquivo	Ref/Sec	Aquisição	Rota	Órbita	Bperp [m]	Btemp [d]	Coerência
S1A_IW_SLC_1SDV_20220927	Reference	27/set/22	147	45194	0	0.00	1
S1A_IW_SLC_1SDV_20220307	Secondary	07/mar/22	147	42219	-97,99	204.00	0,75
S1A_IW_SLC_1SDV_20220319	Secondary	19/mar/22	147	42394	-78,36	192.00	0,77
S1A_IW_SLC_1SDV_20220331	Secondary	31/mar/22	147	42569	-12,36	180.00	0,83
S1A_IW_SLC_1SDV_20220412	Secondary	12/abr/22	147	42744	11,46	168.00	0,84
S1A_IW_SLC_1SDV_20220424	Secondary	24/abr/22	147	42919	-140,29	156.00	0,76
S1A_IW_SLC_1SDV_20220506	Secondary	06/mai/22	147	43094	13,16	144.00	0,86
S1A_IW_SLC_1SDV_20220518	Secondary	18/mai/22	147	43269	39,7	132.00	0,85
S1A_IW_SLC_1SDV_20220530	Secondary	30/mai/22	147	43444	-91,1	120.00	0,82
S1A_IW_SLC_1SDV_20220611	Secondary	11/jun/22	147	43619	-123,15	108.00	0,81
S1A_IW_SLC_1SDV_20220623	Secondary	23/jun/22	147	43794	-107,2	96.00	0,83
S1A_IW_SLC_1SDV_20220705	Secondary	05/jul/22	147	43969	-92,44	84.00	0,85
S1A_IW_SLC_1SDV_20220717	Secondary	17/jul/22	147	44144	-98,09	72.00	0,86
S1A_IW_SLC_1SDV_20220729	Secondary	29/jul/22	147	44319	14,74	60.00	0,93
S1A_IW_SLC_1SDV_20220810	Secondary	10/ago/22	147	44494	-43,63	48.00	0,92
S1A_IW_SLC_1SDV_20220822	Secondary	22/ago/22	147	44669	-78,12	36.00	0,9
S1A_IW_SLC_1SDV_20220903	Secondary	03/set/22	147	44844	-299,04	24.00	0,73
S1A_IW_SLC_1SDV_20220915	Secondary	15/set/22	147	45019	-140,34	12.00	0,87
S1A_IW_SLC_1SDV_20221009	Secondary	09/out/22	147	45369	0	-12.00	1
S1A_IW_SLC_1SDV_20221021	Secondary	21/out/22	147	45544	43,34	-24.00	0,95
S1A_IW_SLC_1SDV_20221102	Secondary	02/nov/22	147	45719	31,44	-36.00	0,95
S1A_IW_SLC_1SDV_20221114	Secondary	14/nov/22	147	45894	43,51	-48.00	0,93
S1A_IW_SLC_1SDV_20221126	Secondary	26/nov/22	147	46069	-57,42	-60.00	0,91
S1A_IW_SLC_1SDV_20221208	Secondary	08/dez/22	147	46244	-150,19	-72.00	0,83
S1A_IW_SLC_1SDV_20221220	Secondary	20/dez/22	147	46419	-26,14	-84.00	0,91
S1A_IW_SLC_1SDV_20230101	Secondary	01/jan/23	147	46594	92,61	-96.00	0,85

S1A_IW_SLC_1SDV_20230113	Secondary	13/jan/23	147	46769	-44,48	-108.00	0,88
S1A_IW_SLC_1SDV_20230125	Secondary	25/jan/23	147	46944	33,01	-120.00	0,88
S1A_IW_SLC_1SDV_20230206	Secondary	06/fev/23	147	47119	-128,03	-132.00	0,8
S1A_IW_SLC_1SDV_20230218	Secondary	18/fev/23	147	47294	25,9	-144.00	0,86
S1A_IW_SLC_1SDV_20230302	Secondary	02/mar/23	147	47469	43,64	-156.00	0,84
S1A_IW_SLC_1SDV_20230314	Secondary	14/mar/23	147	47644	-100,17	-168.00	0,78
S1A_IW_SLC_1SDV_20230326	Secondary	26/mar/23	147	47819	22,88	-180.00	0,83
S1A_IW_SLC_1SDV_20230407	Secondary	07/abr/23	147	47994	-109,85	-192.00	0,76
S1A_IW_SLC_1SDV_20230419	Secondary	19/abr/23	147	48169	-37,98	-204.00	0,8

As 35 imagens foram combinadas em 34 interferogramas com bases perpendiculares no intervalo de -299 e 186 metros e bases temporais de 408 dias. No gráfico da Figura 5.8 observa-se a relação entre tempo e distância perpendicular das *slaves* à *master*.

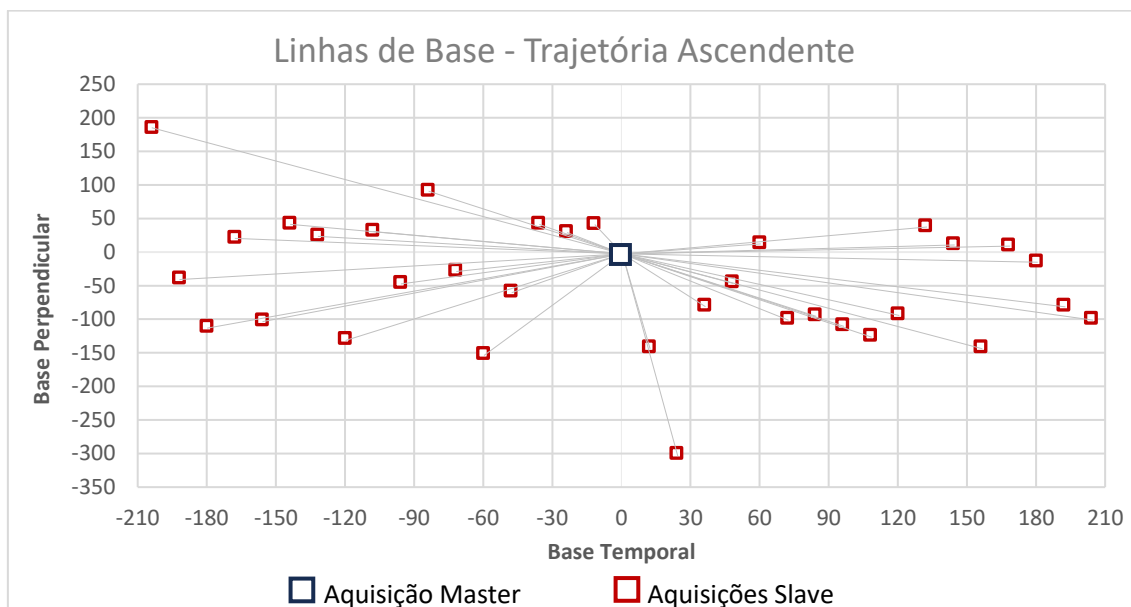


Figura 5.8 - Gráfico da relação da base perpendicular e temporal relativamente à master, trajetória ascendente.

Da mesma forma, para a trajetória descendente, a ferramenta selecionou a aquisição de 9 de agosto de 2022 como *master* e após a formação de interferogramas a coerência registrada variou entre 0.73 e 0.98, como exibido na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Resultado da ferramenta InSAR Stack para aquisições em trajetória descendente

Nome do Arquivo	Ref/Sec	Aquisição	Rota	Órbita	Bperp [m]	Btemp [d]	Coerência
S1A_IW_SLC_1SDV_20220809	Reference	09/ago/22	125	44472	0.00	0.00	1
S1A_IW_SLC_1SDV_20220306	Secondary	06/mar/22	125	42197	-9,28	156.00	0,85
S1A_IW_SLC_1SDV_20220318	Secondary	18/mar/22	125	42372	28,64	144.00	0,85

S1A_IW_SLC_1SDV_20220330	Secondary	30/mar/22	125	42547	4,81	132.00	0,87
S1A_IW_SLC_1SDV_20220411	Secondary	11/abr/22	125	42722	-68,31	120.00	0,84
S1A_IW_SLC_1SDV_20220423	Secondary	23/abr/22	125	42897	-45,82	108.00	0,87
S1A_IW_SLC_1SDV_20220505	Secondary	05/mai/22	125	43072	-215,32	96.00	0,75
S1A_IW_SLC_1SDV_20220517	Secondary	17/mai/22	125	43247	-150,35	84.00	0,81
S1A_IW_SLC_1SDV_20220529	Secondary	29/mai/22	125	43422	6,73	72.00	0,93
S1A_IW_SLC_1SDV_20220610	Secondary	10/jun/22	125	43597	46,71	60.00	0,91
S1A_IW_SLC_1SDV_20220622	Secondary	22/jun/22	125	43772	-15,83	48.00	0,94
S1A_IW_SLC_1SDV_20220704	Secondary	04/jul/22	125	43947	-9,05	36.00	0,96
S1A_IW_SLC_1SDV_20220716	Secondary	16/jul/22	125	44122	-7,15	24.00	0,97
S1A_IW_SLC_1SDV_20220728	Secondary	28/jul/22	125	44297	-14,73	12.00	0,98
S1A_IW_SLC_1SDV_20220821	Secondary	21/ago/22	125	44647	26,82	-12.00	0,97
S1A_IW_SLC_1SDV_20220902	Secondary	02/set/22	125	44822	68,86	-24.00	0,92
S1A_IW_SLC_1SDV_20220914	Secondary	14/set/22	125	44997	68,7	-36.00	0,91
S1A_IW_SLC_1SDV_20220926	Secondary	26/set/22	125	45172	-76,67	-48.00	0,89
S1A_IW_SLC_1SDV_20221008	Secondary	08/out/22	125	45347	-39,12	-60.00	0,91
S1A_IW_SLC_1SDV_20221020	Secondary	20/out/22	125	45522	-125,99	-72.00	0,84
S1A_IW_SLC_1SDV_20221101	Secondary	01/nov/22	125	45697	-35,16	-84.00	0,89
S1A_IW_SLC_1SDV_20221113	Secondary	13/nov/22	125	45872	-20,51	-96.00	0,9
S1A_IW_SLC_1SDV_20221125	Secondary	25/nov/22	125	46047	212,31	-108.00	0,74
S1A_IW_SLC_1SDV_20221207	Secondary	07/dez/22	125	46222	114,86	-120.00	0,8
S1A_IW_SLC_1SDV_20221219	Secondary	19/dez/22	125	46397	-38,44	-132.00	0,85
S1A_IW_SLC_1SDV_20221231	Secondary	31/dez/22	125	46572	-15,04	-144.00	0,86
S1A_IW_SLC_1SDV_20230112	Secondary	12/jan/23	125	46747	-168,24	-156.00	0,74
S1A_IW_SLC_1SDV_20230124	Secondary	24/jan/23	125	46922	74,77	-168.00	0,79
S1A_IW_SLC_1SDV_20230205	Secondary	05/fev/23	125	47097	97,19	-180.00	0,77
S1A_IW_SLC_1SDV_20230301	Secondary	01/mar/23	125	47447	-12,02	-204.00	0,81
S1A_IW_SLC_1SDV_20230313	Secondary	13/mar/23	125	47622	-108,84	-216.00	0,73
S1A_IW_SLC_1SDV_20230325	Secondary	25/mar/23	125	47797	-2,85	-228.00	0,79
S1A_IW_SLC_1SDV_20230406	Secondary	06/abr/23	125	47972	10,5	-240.00	0,77
S1A_IW_SLC_1SDV_20230418	Secondary	18/abr/23	125	48147	-38,97	-252.00	0,74
S1A_IW_SLC_1SDV_20230430	Secondary	30/abr/23	125	48322	24,72	-264.00	0,74

As 35 imagens foram combinadas em 34 interferogramas com bases perpendiculares no intervalo de -215 e 212 metros e bases temporais de 420 dias. No gráfico da Figura 5.9 observa-se a relação entre tempo e distancia perpendicular das *slaves* à *master*.

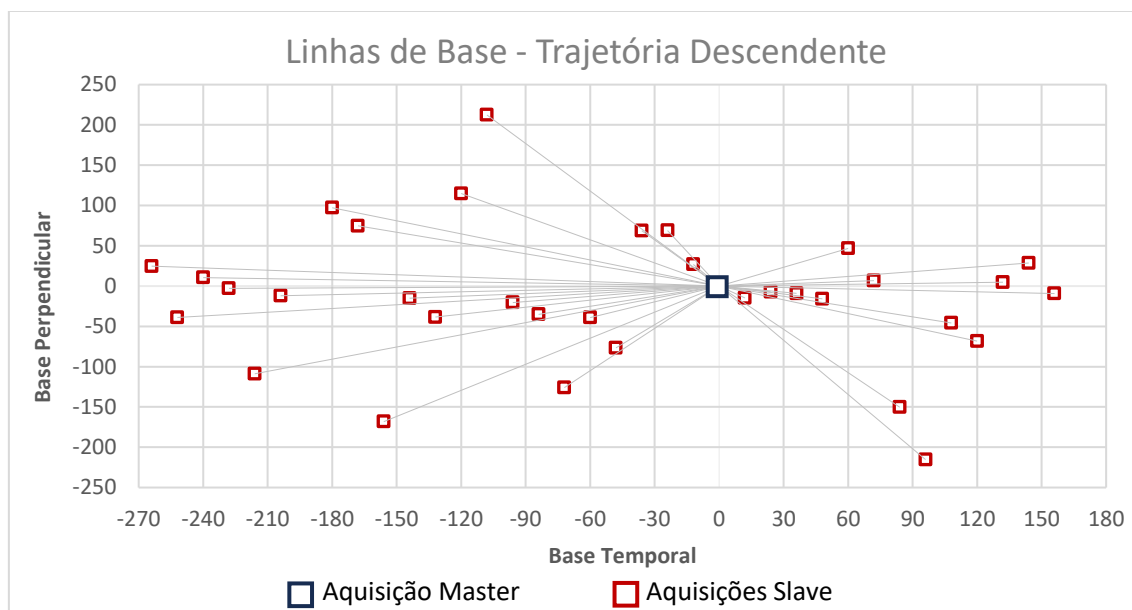


Figura 5.9 - Gráfico da relação da base perpendicular e temporal relativamente à master, trajetória descendente.

As extensões destas linhas de base podem ser consideradas aceitáveis na mesma medida que as usadas em (Qin et al., 2019; Jung et al., 2019), no qual nem sempre maiores distâncias perpendiculares e temporais são sinónimo de desconexões espaciais e temporais.

5.3. Modelo digital do terreno

Para o presente estudo, foi usado um modelo Copernicus Global DSM 30m editado para incluir alguns pontos na região de interesse. Neste caso a edição foi apenas direccionada para algumas pontes, sobretudo para a ponte de Asseca e para a ponte de D. Luís, como representado na Figura 5.10, ou seja, a resolução foi mantida nos 30m, inferior à que seria necessária uma vez que a ponte apenas tem aproximadamente 8 metros de largura.

Com esta opção é expectável que, em termos geométricos, os pontos não estejam posicionados com tanto rigor, mas considerando a quantidade de imagens a processar e os recursos limitados para o fazer optou-se por usar um MDE o mais leve possível que apenas identificasse as pontes de interesse.

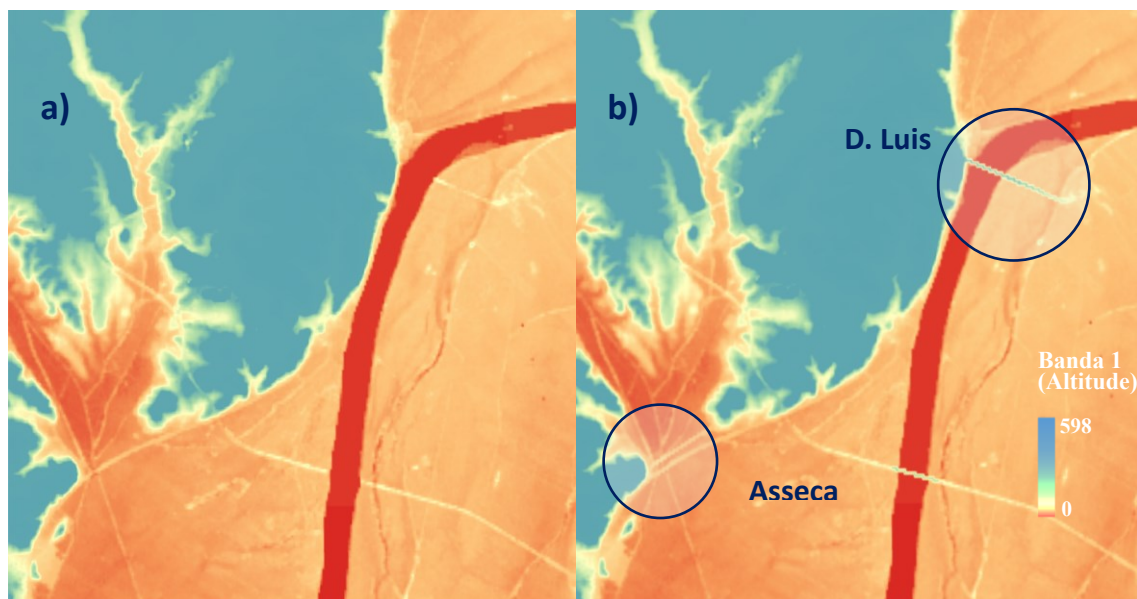


Figura 5.10 - a) Copernicus Global DSM 30m original para área de Santarém. b) - modelo Digital modificado considerado para a análise realizada.

5.4. Procedimentos e parâmetros usados na análise

À semelhança do estudo do quebra-mar, as estruturas referidas em Santarém foram objeto de procedimento idêntico (Figura 5.11) para formação da pilha interferométrica, análise StaMPS dessa pilha e no final extração de velocidades de deslocamento e séries temporais.

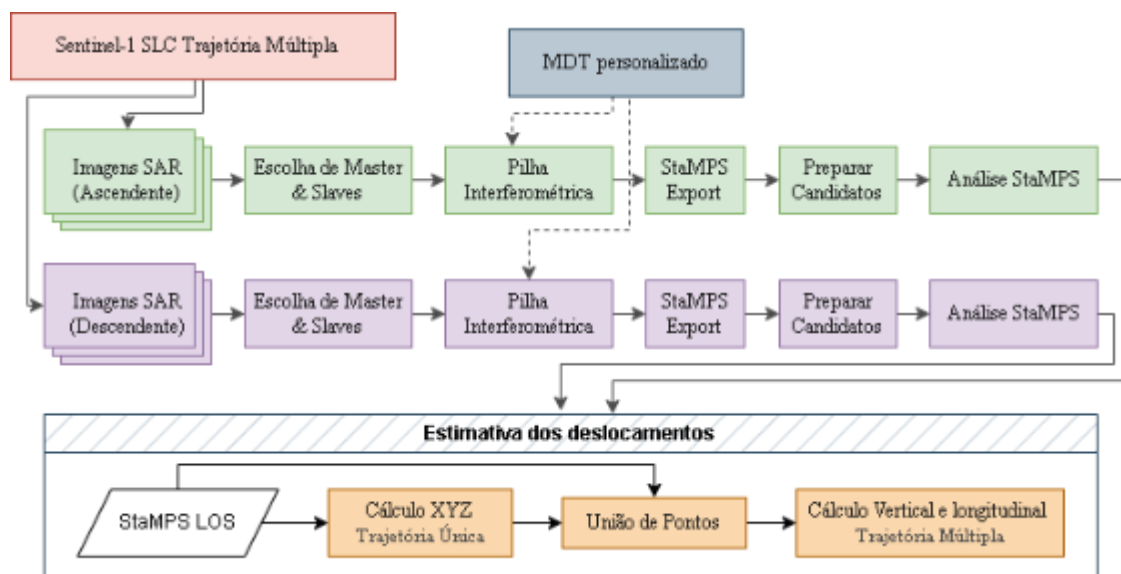


Figura 5.11 - Procedimento executado para análise das estruturas na área de Santarém

Para a análise das pontes foram feitas 3 extrações para cada trajetória, devido às alterações das áreas de referência no StaMPS após a análise e antes de exportar (ver ponto 3.4), ou seja, as seguintes 3 estimativas dos deslocamentos:

- Uma sem referência (Sem Ref.), ou seja, considerando a velocidade média de toda a imagem como referência.
- Referência numa área onde não é esperada subsidência do solo (Ref. 1), como uma encosta de uma montanha. A região de interesse é mais caracterizada por planícies agrícolas e colinas, ainda assim, para se conseguir testar foi escolhida uma área perto do Miradouro Ribeira Santarém.
- Referência numa área com medições conhecidas (Ref. 2), tendo sido escolhido o pilar 32 da ponte D. Luis. Os pilares que menos se deslocam verticalmente são o pilar 28 e 32, sendo que o 32 tem menos diferenças entre base e topo e apresenta um deslocamento vertical anual nulo.

Os parâmetros usados para preparar os candidatos a difusores persistentes foram:

- Amplitude: 0.6
- Segmentos do alcance oblíquo: 9
- Segmentos do azimute: 3
- Sobreposição de pixels do alcance oblíquo: 50
- Sobreposição dos pixels do azimute: 200

No processo StaMPS os parâmetros que se diferenciam as configurações padrão são:

- Máximo erro não correlacionado do MDE: 5m
- Tamanho da grade (em m) usado para procurar correlação espacial: 20m
- Processo de reestimativa de gamma: ativado (padrão)
- Limiar de desvio padrão: 1.2 (padrão)
- Cálculo da informação imprecisa de órbita: ativado
- Uso de referências

Estes parâmetros foram aplicados para ambas as trajetórias. No entanto, como na ponte da Asseca a trajetória descendente não produziu difusores persistentes com estas configurações, nesse caso, foram depois alterados para 10m de grade, como forma de obter valores para avaliar.

A extração dos resultados StaMPS é posteriormente objeto de um Assistente de Análise criado para o efeito, onde se compilaram os scripts *python* de cálculo inicialmente criados para o estudo do quebra-mar e outros scripts que permitem a visualização das séries temporais, entre outras ferramentas de realce de pontos por parâmetros.

5.5. Geometrias de interesse

Na Figura 5.12 é possível observar a disposição das duas estruturas em estudo relativamente aos ângulos de interesse das trajetórias.

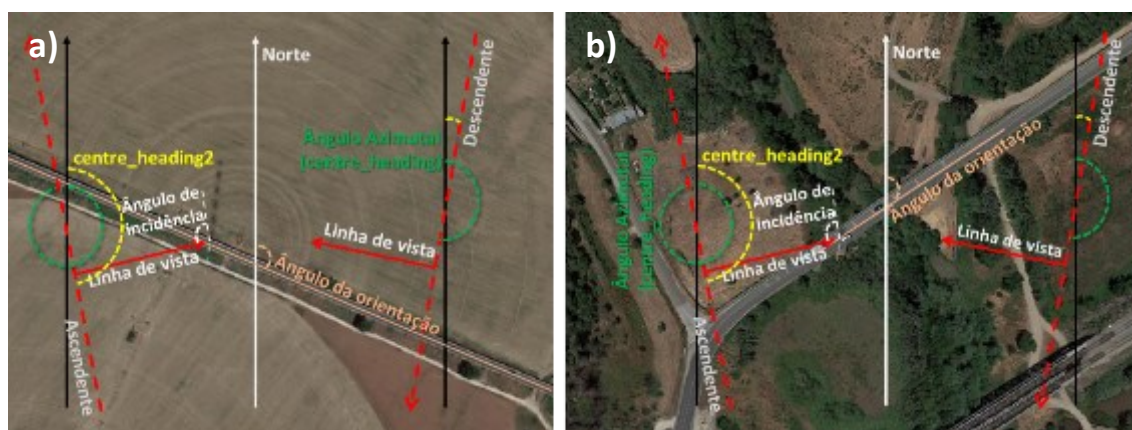


Figura 5.12 - Ângulos de enquadramento da ponte D. Luis (a) e Asseca (b) para com as trajetórias das imagens radar

Tendo em conta as duas estruturas em estudo e a passagem do satélite, a Tabela 5.3 compila os ângulos importantes a usar nos cálculos dos deslocamentos, ou seja, no pós-processamento dos resultados da análise StaMPS.

Tabela 5.3 - Valores para os parâmetros da monitorização sobre as estruturas a estudar na área de Santarém.

	Ascendente			Descendente	
Master	27 Set 2022			09 Aug 2022	
Azimuth ω	-10,70			190,44	
	Incidência θ	$\omega - \alpha$	Orientação α	$\omega - \alpha$	Incidência θ
Asseca Rodo.	32,38	-66,45	55,75	134,69	33,85
D. Luis	32,72	-124,00	113,30	77,14	33,61

5.6. Cálculo dos deslocamentos em ambiente SIG

Após processar os dados no StaMPS, tanto para a trajetória ascendente, Anexo 2, como para a descendente, Anexo 3, os dados foram exportados e carregados em ambiente SIG. Na Figura 5.13 é possível observar o *buffer* de 40m ao longo de toda a ponte D. Luís, assim como a cobertura de dados provenientes de ambas trajetórias. Foram encontrados cerca de 243 difusores persistentes em trajetória descendente e 339 em trajetória ascendente.



Figura 5.13 – Cobertura de difusores persistentes provenientes de trajetória ascendente e descendente incluídos no *buffer* de recorte – ponte de D. Luís

Na Figura 5.14 exibe-se uma área para cada difusor que represente o azimuth e alcance projetados de forma a melhorar a visualização e ajudar a decisão sobre o objeto predominante responsável pelo valor do deslocamento. A comparação de resultados é feita exclusivamente para a estrutura elevada sobre o solo.

Como também se pode observar, há pouca sobreposição dos pontos entre trajetórias, o que dificulta a obtenção e a fiabilidades dos resultados com base em procedimentos que dependam do facto de os pontos pertencerem ao mesmo elemento.



Figura 5.14 - Representação da resolução espacial por difusor persistente – ponte D. Luís

Para a ponte Asseca é aplicado o mesmo tratamento na pós análise, sendo que na Figura 5.15 estão representados cerca de 43 difusores persistentes provenientes da trajetória descendente, assim como outros 43 da trajetória ascendente. É possível observar alguma sobreposição, mas também alguns vazios importantes como o pilar entre o arco 4 e 5.

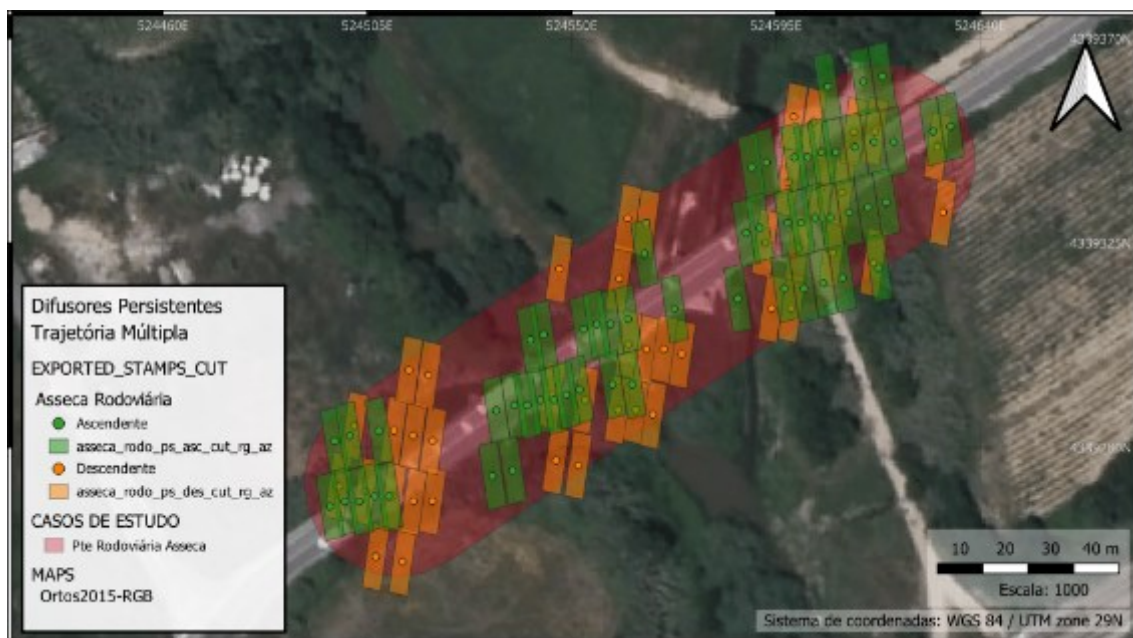


Figura 5.15 - Cobertura de difusores persistentes provenientes de trajetória ascendente e descendente incluídos no buffer de recorte assim como representação espacial em azimuth e alcance -ponte da Asseca.

A título de exemplo (Figura 5.16), para ambas as pontes e à semelhança do estudo do quebra-mar, foram definidos pontos ao longo do eixo longitudinal ao qual se atribuiu um *buffer* de 15m raio (distância entre pilares com alvo) a cada ponto sobre os pilares criando assim as áreas de influência. Tendo verificado que nem todas as áreas de influência contem difusores persistentes de trajetória ascendente e/ou descendente, pelo que nestes casos é excluído o cálculo de deslocamentos verticais e longitudinais.

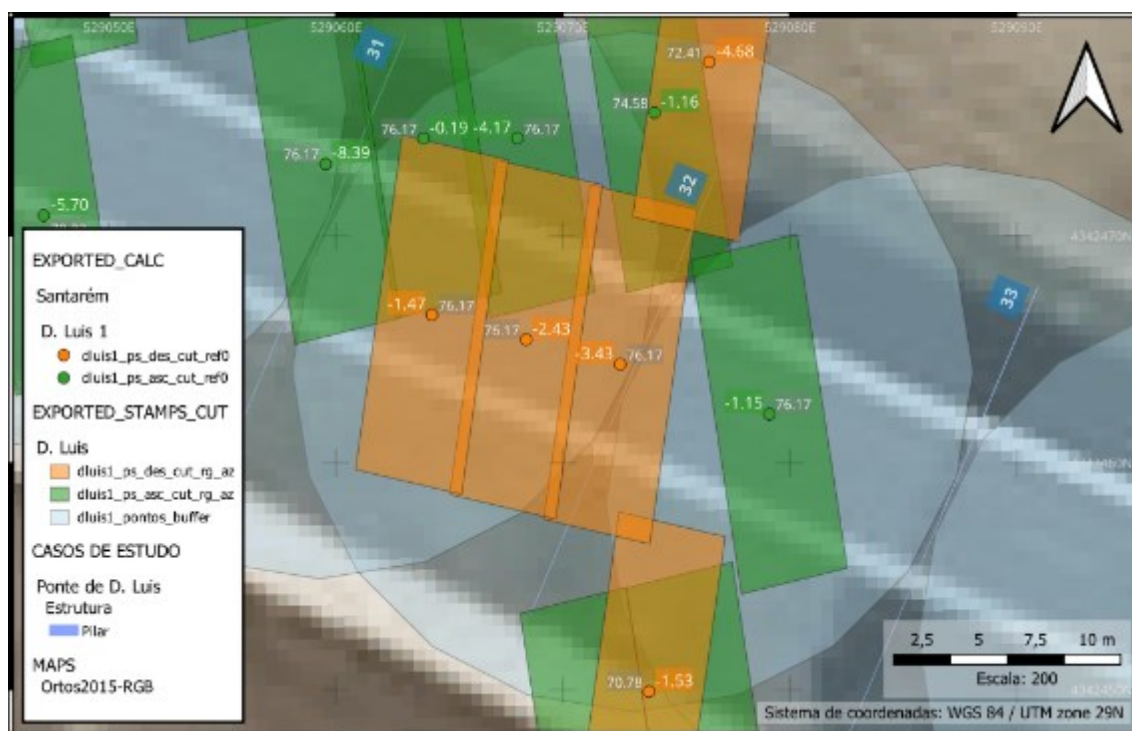


Figura 5.16 - Buffer aos pontos e respetivos difusores a serem unidos - Pilar 32 da Ponte D. Luís

Após esta organização, efetuou-se o cálculo dos deslocamentos que é, em suma, converter de deslocamentos LOS para eixos retos no plano. Para este estudo foram efetuados 2 tipos de cálculos, para trajetória única e para trajetória múltipla. O objetivo, em teoria, é ter valores para quando forem identificados difusores de apenas uma trajetória e conseguir maior fiabilidade dos valores quando houver difusores de duas trajetórias.

O primeiro cálculo é feito separadamente sobre cada uma das camadas contendo os pontos que representam os difusores. Como podemos observar na Figura 5.17, o assistente de análise faz o cálculo para eixo X, Y e Z de todos os pontos na camada selecionada. Após este cálculo, cada ponto contém além da informação sobre a velocidade de deslocamento e séries temporais em LOS, todos esses valores calculados para X, para Y e para Z no plano.

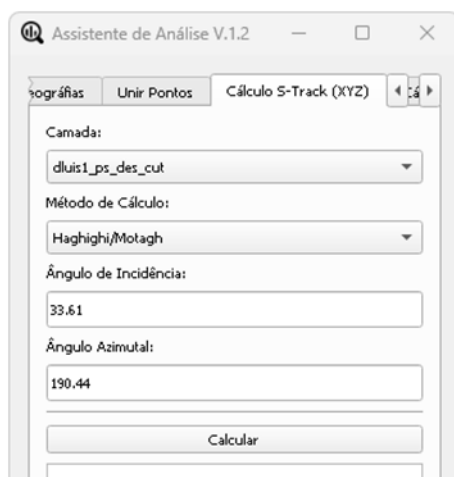


Figura 5.17 - Aba Cálculo trajetória única do assistente de análise.

Os valores da velocidade de deslocamento e da série temporal contida nos difusores dentro dessas áreas (*buffers*) são então unidos por média ponderada para cada trajetória, tendo o cuidado de apenas unir pontos com altura parecida, de acordo com a Figura 5.18 (Anexo 4). Este processo foi feito para cada uma das camadas correspondentes às diferentes trajetórias, tendo como resultado final uma nova distribuição de pontos ao longo do eixo longitudinal da estrutura, que permita representar os deslocamentos na sua área de influência.

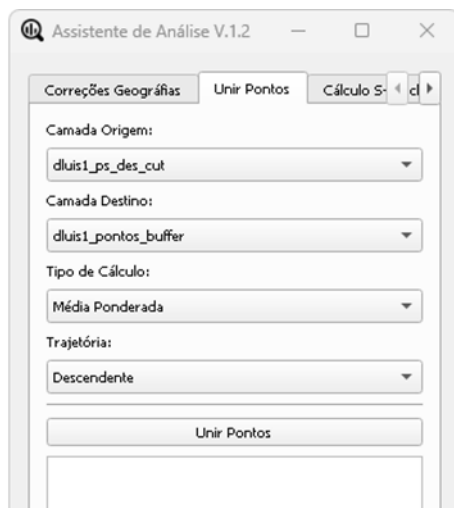


Figura 5.18 - Aba Unir Pontos no assistente de análise

Após esta construção dos novos pontos, é feito o cálculo do deslocamento vertical e longitudinal a partir dos valores em LOS. Neste cálculo são usadas as geometrias para ambas as trajetórias relativamente às estruturas e a orientação da própria, como demonstrado na Figura 5.19. Assim, cada novo ponto representativo da área de influência contém valores em LOS, valores para espaço XYZ e valores verticais e longitudinais da estrutura para velocidades de deslocamento e série temporal.

Assistente de Análise V.1.2

Cálculo S-Track (XYZ) Cálculo M-Track (ver lon)

Camada:
dluis1_pontos_buffer

Método de Cálculo:
Jung, J

Ângulo de Incidência Ascendente:
33.715

Ângulo de Incidência Descendente:
33.61

Ângulo Azimutal Ascendente:
-10.70

Ângulo Azimutal Descendente:
190.44

Orientação do Objeto:
293.30

Figura 5.19 - Aba Cálculo Trajetória Múltipla no assistente de análise

Entre 6 conjuntos de 35 valores cada, foi criada uma disposição de simbologia e etiquetas para facilitar uma primeira visualização dos resultados. Na Figura 5.20 observa-se um exemplo onde cada ponto tem associado os valores em LOS a branco, o cálculo YXZ para ambas trajetórias a verde e cálculo vertical e longitudinal a azul.

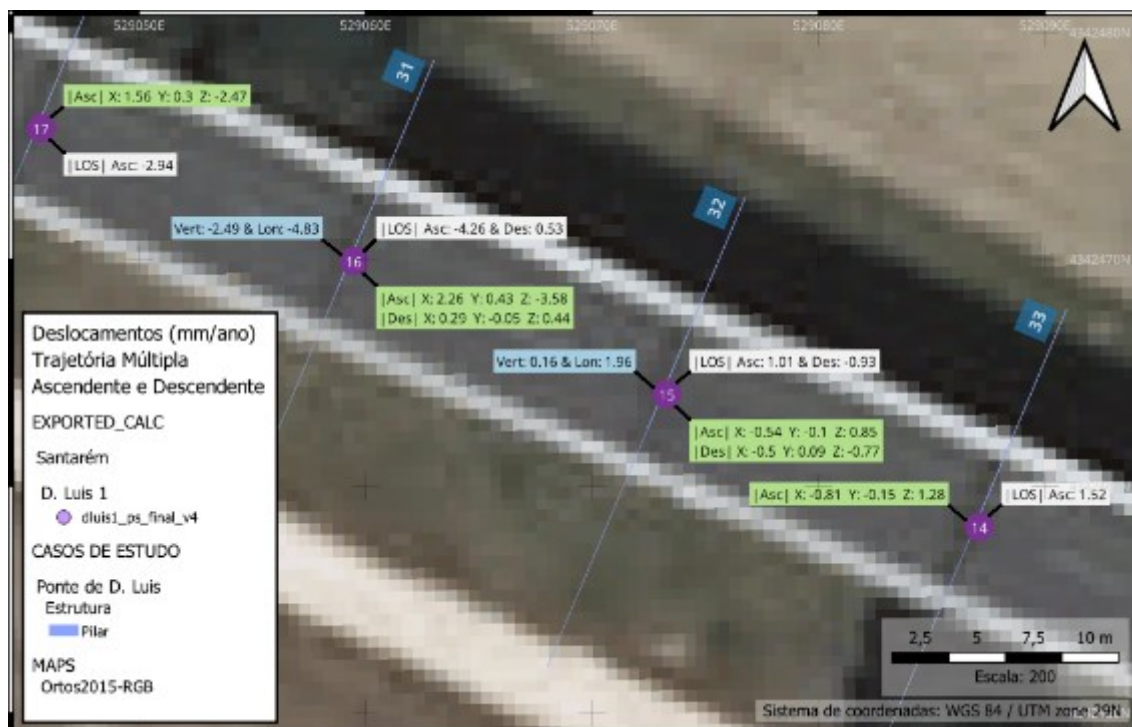


Figura 5.20 - Exemplo da visualização das velocidades de deslocamento - valores em LOS a branco, o cálculo YXZ para ambas trajetórias a verde e cálculo vertical e longitudinal a azul

Quanto aos valores das series temporais, a representação destes é feita através da aba de construção de gráficos do assistente de análise. Na Figura 5.21 observa-se a seleção de 3 pontos a partir dos quais, dependendo dos parâmetros ilustrados, são criados os gráficos para análise de séries temporais – com a representação dos deslocamentos e a respetiva tendência de variação ao longo do período temporal analisado. A figura ilustra ainda a possibilidade de comparação das séries temporais relativas a deslocamentos de diferentes pontos.

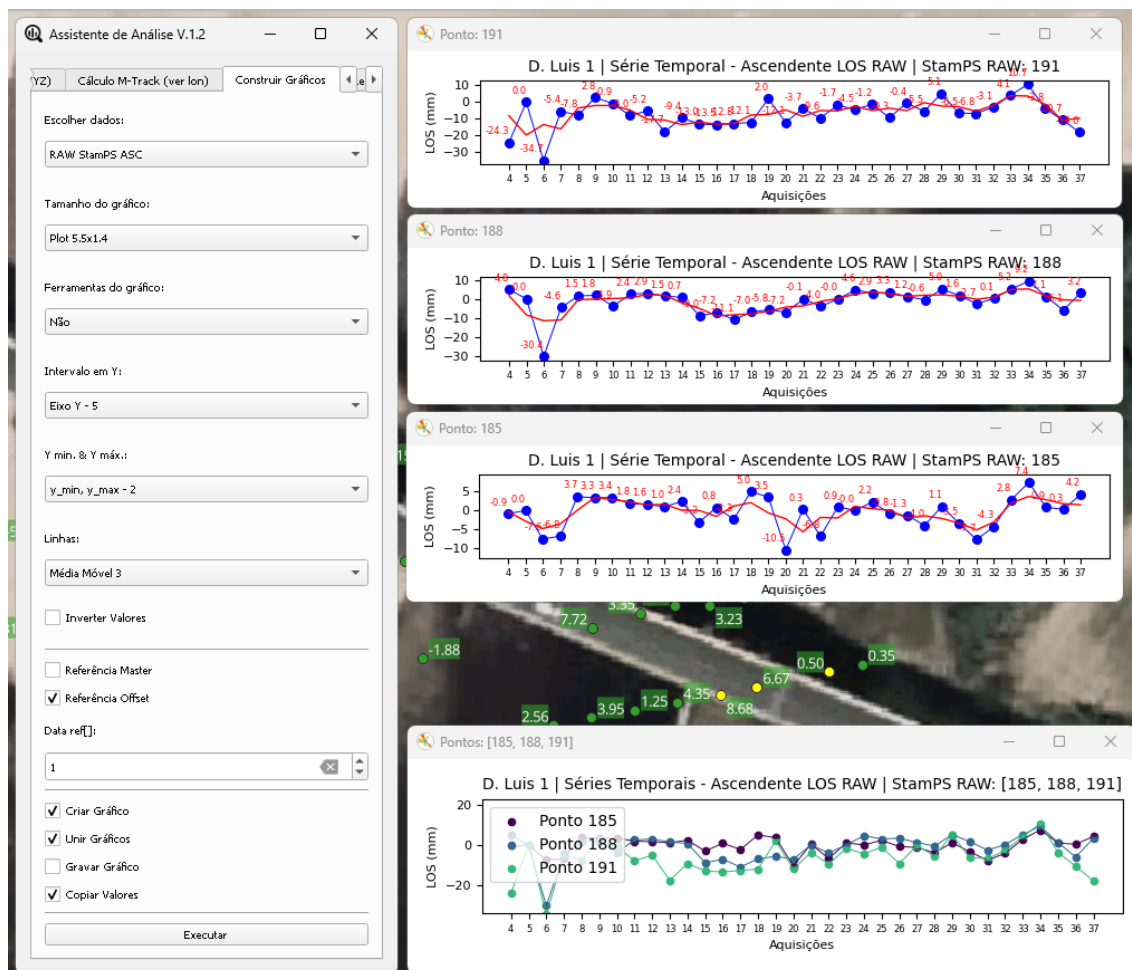


Figura 5.21 - Aba Construir Gráficos do assistente de análise com gráficos das series temporais do ponto 191, 188, 185 ascendente LOS

5.7. Análise dos resultados por comparação com medições topográficas

Por cortesia das Infraestruturas de Portugal, foram consultados valores de deslocamento das pontes de Asseca e de D. Luís, medidos *in situ*, por meio de medições topográficas tradicionais, realizadas entre março de 2022 e abril de 2023 na ponte de D. Luís e entre setembro de 2022 e abril de 2023 na ponte sobre a Ribeira da Asseca. A comparação dos resultados obtidos com a metodologia apresentada e com a análise topográfica tradicional, permite fazer uma análise crítica dos mesmos com vista à sua eventual validação e à proposta de recomendações para as melhores práticas a adotar futuramente neste tipo de abordagens.

Numa primeira análise, os resultados das séries temporais foram obtidos com o uso da velocidade anual média de toda a área como referência (adiante designado “Sem Ref.”) no StaMPS. De seguida, , foi relocalizado o centro da área de influência encontrando uma área com probabilidade de ter menor deslocamentos, como já referido em 5.4, que se passará a referir por “Ref. 1” (Figura 5.1). Uma vez que também se recomenda usar um ponto de deslocamento vertical conhecido e isento de deslocamento horizontal, como também referido nos parâmetros usados, escolheu-se ainda um pilar da ponte D. Luís como referência 2 – “Ref. 2” (Figura 5.1).

Apesar de o objetivo ser, a partir de uma região de interesse, obter valores para estruturas que não sejam monitorizadas e avaliar se há produção de resultados fidedignos, usar um valor conhecido não é redundante se estivermos a tentar responder à questão se é possível calibrar todos os valores obtidos através das imagens radar para toda a ponte com base em apenas um sensor localizado num ponto da ponte.

Como nas medições por satélite temos datas de aquisições diferentes para trajetória ascendente (Tabela 5.5) e descendente (Tabela 5.4), em trajetória múltipla os valores são cruzados apenas com os valores de data mais próxima na trajetória contrária. Como as datas entre trajetórias variam apenas 1 dia, à exceção da aquisição 17 a 20, foi decidido apenas atribuir uma data média a cada par (Tabela 5.6). Depois comparou-se as aquisições com data próxima à data das medições *in situ* registadas na Tabela 5.7, no qual as datas a laranja são exclusivamente as datas de medições na ponte da Asseca.

Tabela 5.4 - Datas das aquisições (imagens SAR) de trajetória Descendente e respetivo ID

Aquisição	4	5	6	7	8	9	10	11
Data	06/03/22	18/03/22	30/03/22	11/04/22	23/04/22	05/05/22	17/05/22	29/05/22

12	13	14	15	16	17	18	19	20
10/06/22	22/06/22	04/07/22	16/07/22	28/07/22	21/08/22	02/09/22	14/09/22	26/09/22
21	22	23	24	25	26	27	28	29
08/10/22	20/10/22	01/11/22	13/11/22	25/11/22	07/12/22	19/12/22	31/12/22	12/01/23
30	31	32	33	34	35	36	37	
24/01/23	05/02/23	01/03/23	13/03/23	25/03/23	06/04/23	18/04/23	30/04/23	

Tabela 5.5 - Datas das aquisições de trajetória Ascendente e respectivos ID's

Aquisição	4	5	6	7	8	9	10	11
Data	07/03/22	19/03/22	31/03/22	12/04/22	24/04/22	06/05/22	18/05/22	30/05/22
12	13	14	15	16	17	18	19	20
11/06/22	23/06/22	05/07/22	17/07/22	29/07/22	10/08/22	22/08/22	03/09/22	15/09/22
21	22	23	24	25	26	27	28	29
09/10/22	21/10/22	02/11/22	14/11/22	26/11/22	08/12/22	20/12/22	01/01/23	13/01/23
30	31	32	33	34	35	36	37	
25/01/23	06/02/23	18/02/23	02/03/23	14/03/23	26/03/23	07/04/23	19/04/23	

Tabela 5.6 - Média das datas das trajetórias Ascendente e Descendente e respectivos ID's

Aquisição	4	5	6	7	8	9	10	11
Data	06/03/22	18/03/22	30/03/22	11/04/22	23/04/22	05/05/22	17/05/22	29/05/22
12	13	14	15	16	17	18	19	20
10/06/22	22/06/22	04/07/22	16/07/22	28/07/22	15/08/22	27/08/22	08/09/22	20/09/22
21	22	23	24	25	26	27	28	29
08/10/22	20/10/22	01/11/22	13/11/22	25/11/22	07/12/22	19/12/22	31/12/22	12/01/23
30	31	32	33	34	35	36	37	
24/01/23	05/02/23	23/02/23	07/03/23	19/03/23	31/03/23	12/04/23	24/04/23	

Tabela 5.7 - Datas das medições in situ (as datas a laranja são exclusivas da Ponte da Asseca)

Datas	17/03/22	19/04/22	19/05/22	01/07/22	22/07/22	11/08/22	19/09/22
							23/09/22
	27/10/22	22/11/22	21/12/22	24/01/23	28/02/23	01/03/23	04/04/23
							05/04/23

As diferenças de localização dos PS identificados e diferenças de tempo de aquisições das imagens SAR ascendente e descendente podem levar a dificuldades no processamento das séries temporais para converter em deslocamentos verticais e longitudinais (Jung et al., 2019). Da observação da Tabela 5.4 e da Tabela 5.5, verifica-se que existe unicamente uma diferença de um dia nas datas de aquisição (excetuando entre a aquisição 17 e a 20), pelo que se optou por não realizara interpolação temporal dos resultados. Contudo, aqui é possível observar um erro ao longo deste trabalho, cuja combinação foi feita entre igual

número de aquisições e não entre data de aquisições, o que melhoraria as combinações nos últimos 2 meses da análise. No que se refere à resolução espacial, apenas a média ponderada dos resultados foi implementada.

5.7.1. Análise dos resultados obtidos para a Ponte D. Luís

Por cortesia das Infraestruturas de Portugal foram consultados valores de medições topográficas em 64 alvos da ponte D. Luís, representados na Figura 5.22, para diferentes instantes temporais, entre 17 de março de 2023 a 4 de abril de 2023. Nessa imagem pode verificar-se que os pilares estão numerados por ordem crescente no sentido de Santarém para Almeirim e visualizar-se a disposição dos alvos tanto a montante como a jusante.

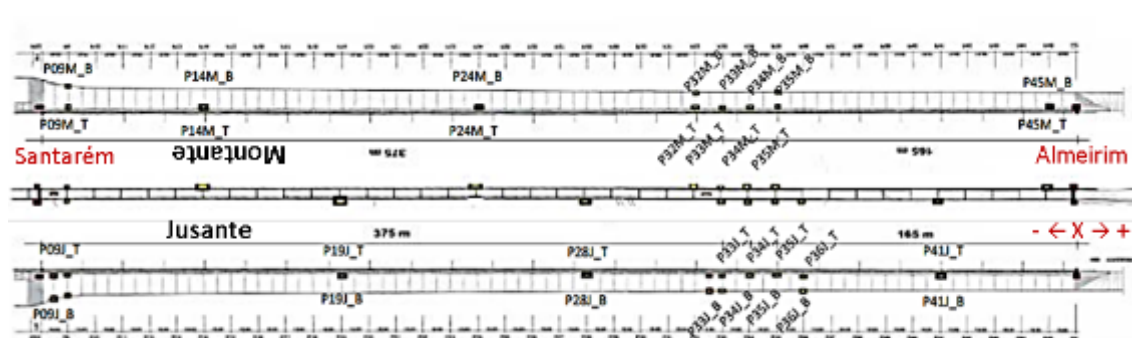


Figura 5.22 - Esquema da Ponte D. Luís e respectivas posições dos alvos. Fonte: (Infraestruturas de Portugal, n.d.)

Serão usadas as medições em Z e em X da ponte, ignorando os deslocamentos laterais desta. Os valores de Z são positivos da base para o topo e os valores X são positivos de Santarém para Almeirim. O sensor utilizado para as medições topográficas foi um Sokkia 1010 com uma precisão de 4mm e a tolerância total das observações, tanto na componente altimétrica como planimétrica, foi de 6mm (4mm do aparelho + 1mm de pontaria + 1 mm de alvo). Já na Figura 5.23, observa-se que os pontos alvos se encontram no topo e na base dos antigos pilares metálicos da ponte.



Figura 5.23 - Posição vertical dos sensores nos pilares da ponte D. Luís. Esquema: (Infraestruturas de Portugal, n.d.), Fotografia: Google Street Maps

Apesar do foco ser a série temporal, a Figura 5.24, a Figura 5.25 e a Figura 5.26 apresentam os resultados obtidos com o uso do StaMPS, com as diferentes taxas de deslocamento caracterizadas com uma escala de cores.

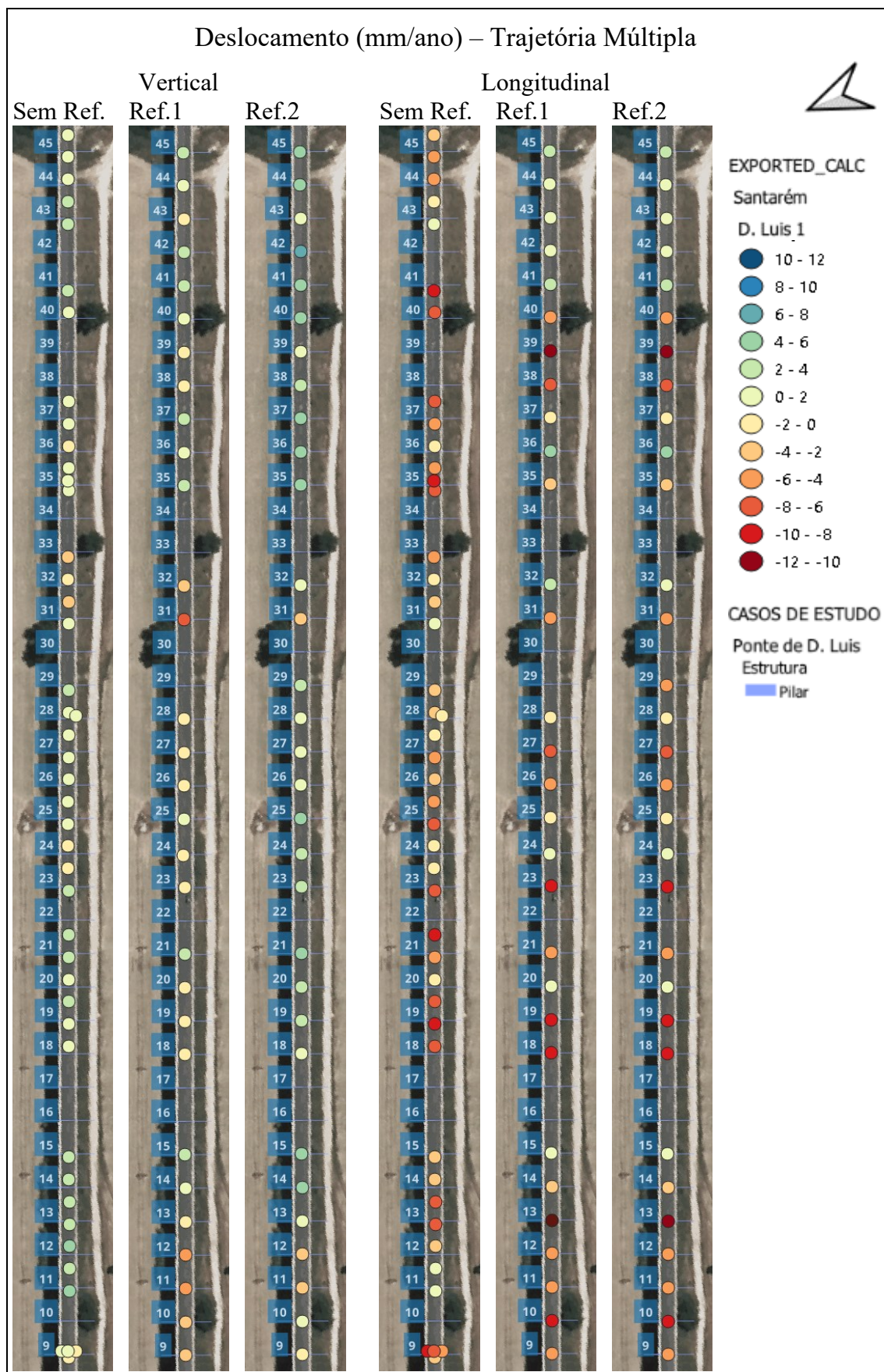


Figura 5.24 - Resultados velocidade de deslocamento anual para as várias referências na trajetória múltipla, ponte D. Luis

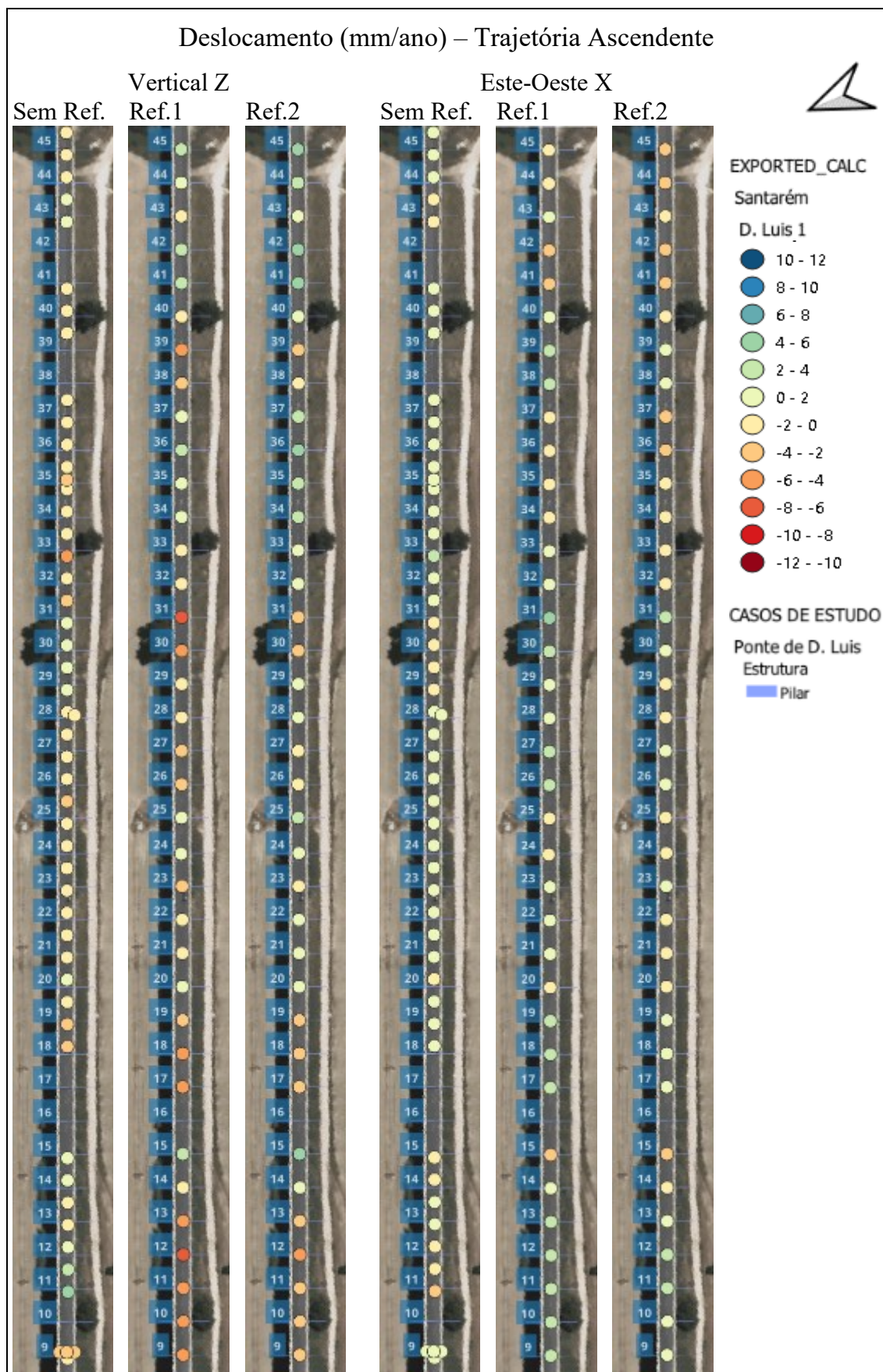


Figura 5.25 - Resultados velocidade de deslocamento anual para as várias referências, na trajetória ascendente, ponte D. Luis

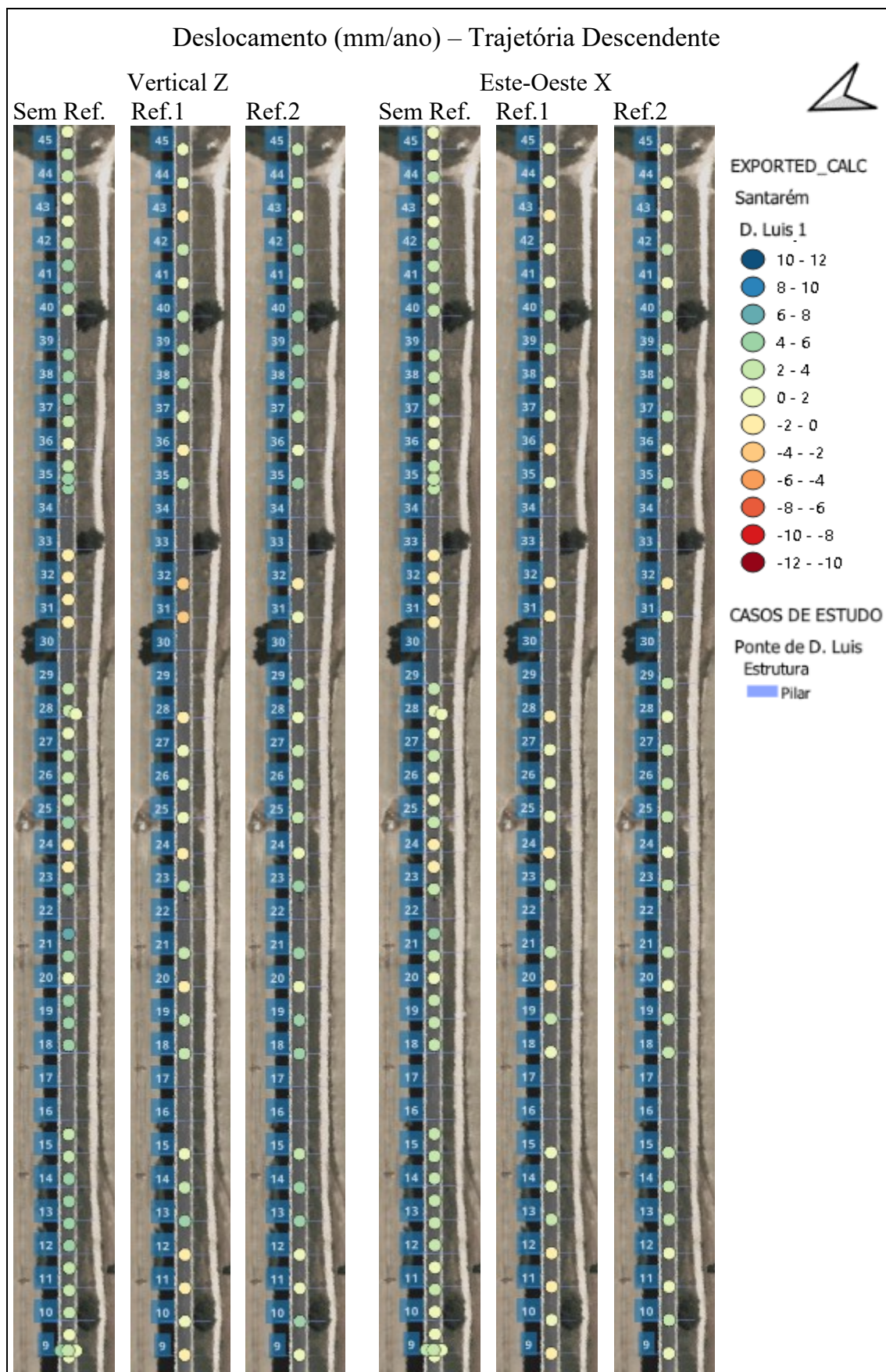


Figura 5.26 - Resultados velocidade de deslocamento anual para as várias referências, na trajetória descendente, ponte D. Luis

Da Observação e análise dos resultados apresentados nas figuras, constata-se que há mais deslocamentos longitudinais negativos por toda a ponte, sobretudo nos pilares 9 ao 14, 18, 19, 23, 38, 39, 40. Também é visível que o uso de referências pode inverter o sentido do deslocamento quando comparado com o uso da velocidade média de toda a área de estudo como referência. Isso acontece mais expressivamente nos pilares 36, 44, 45.

Em trajetória única, os valores são de este-oeste no plano, por isso, apesar de não corresponder à orientação da ponte, esperam-se valores de sentido não diretamente correspondente. Quanto aos deslocamentos verticais em trajetória múltipla, observa-se como resultado valores mais positivos no final da ponte, do pilar 35 ao 45, e negativos no início da ponte e à volta do pilar 31.

O StaMPS produz 2 outputs quanto a deslocamentos, a série temporal e a taxa de deformação anual. As taxas de deformação são geralmente relatadas como deformações médias por um período de tempo. Embora essas taxas possam ser viáveis para certas aplicações, a complexidade das séries temporais é maior para este tipo de estrutura e por isso não deve ser simplificada, mas, para evitar conclusões errôneas, deve ser a análise de maior atenção (Schlögl et al., 2021) (Xiong et al., 2021). Assim sendo, os resultados apresentados na Figura 5.24, Figura 5.25 e Figura 5.26 não serão considerados para avaliação das movimentações das estruturas em estudo e, em vez destes, serão analisadas as séries temporais.

Nesse sentido fez-se uma avaliação mais direta com base na série temporal. São 34 aquisições radar e respectivas datas, sobre 13 medições *in situ*. A expectativa é observar uma tendência de movimentação semelhante ao longo do tempo, preferencialmente com valores de idêntica magnitude. Para comparação de valores, apenas os valores relativos às datas das aquisições mais próximas da data das medições *in situ* foram tidos em conta. É igualmente importante ter em conta que nalguns pilares (zonas/pórticos) apenas há dados *in situ* para montante ou jusante, o que pode não ser representativo do comportamento total da zona.

Começando pelo pilar 9, temos valores a comparar a montante (Figura 5.27) e a jusante (Figura 5.28). Nessas figuras os valores a azul e laranja são medições *in situ*, respetivamente para a base e para o topo do pilar. Para este pilar, o comportamento a montante e a jusante é parecido tanto para o eixo Z como para o eixo X. Em termos comparativos, notou-se alguma correspondência sem usar referência, mas com uma maior oscilação e uma grandeza dos valores muito diferente. Quanto à causa da diferença dessa

grandeza, se o valor da data mais próxima à data de referência *in situ* ser pouco fiável, toda a linha no gráfico pode subir ou descer. Já com o uso da referência 1, notou-se menor variabilidade e maior aproximação aos valores *in situ*. Com o uso da referência 2, correspondente a um dos pilares da ponte em análise, a tendência melhora significativamente e a variação ao longo do tempo fica mais próxima da verificada com base nas medições topográficas, com uma maior aproximação aos deslocamentos de topo do que os de base, como seria de esperar

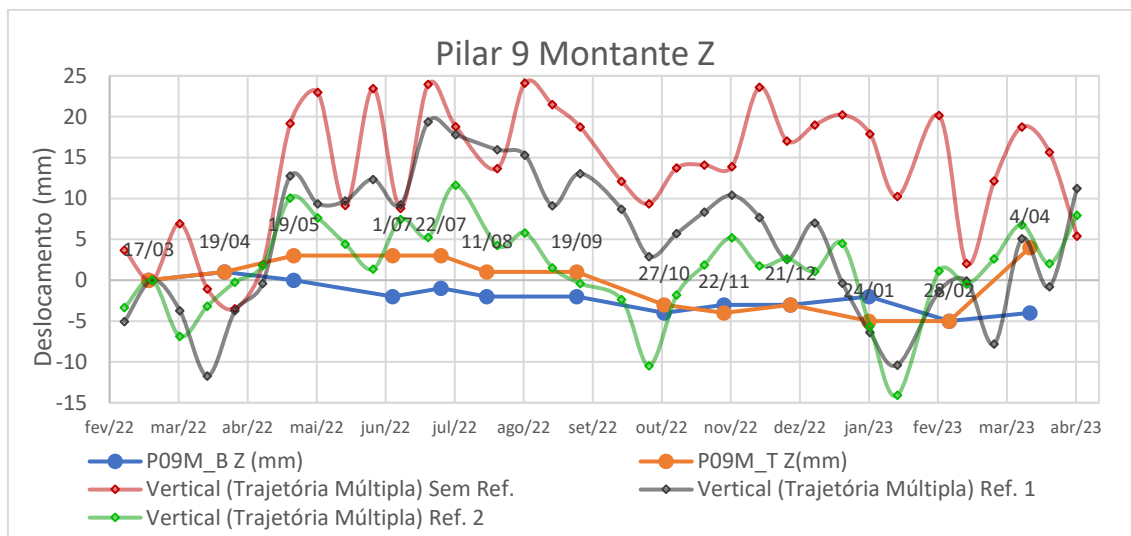


Figura 5.27 - Comparação pilar 9 a montante, deslocamento vertical, trajetória múltipla.

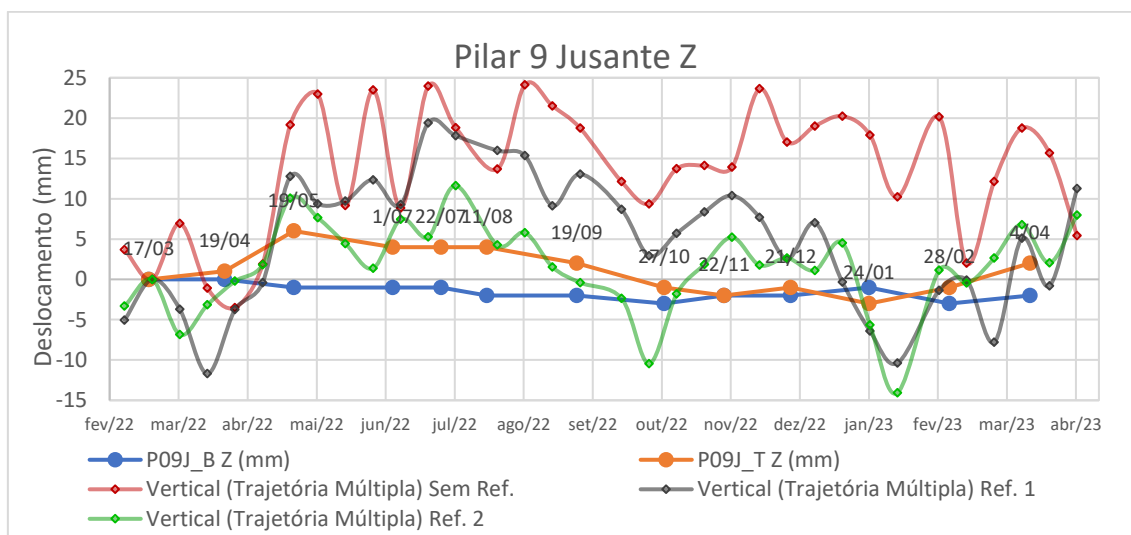


Figura 5.28 - Comparação pilar 9 a jusante, deslocamento vertical, trajetória múltipla

Uma vez que, para cada medição *in situ*, há 3 datas medidas com a metodologia apresentada, é possível fazer uma média móvel que facilita a visualização da correspondência, conforme se mostra na Figura 5.29 e na Figura 5.30.

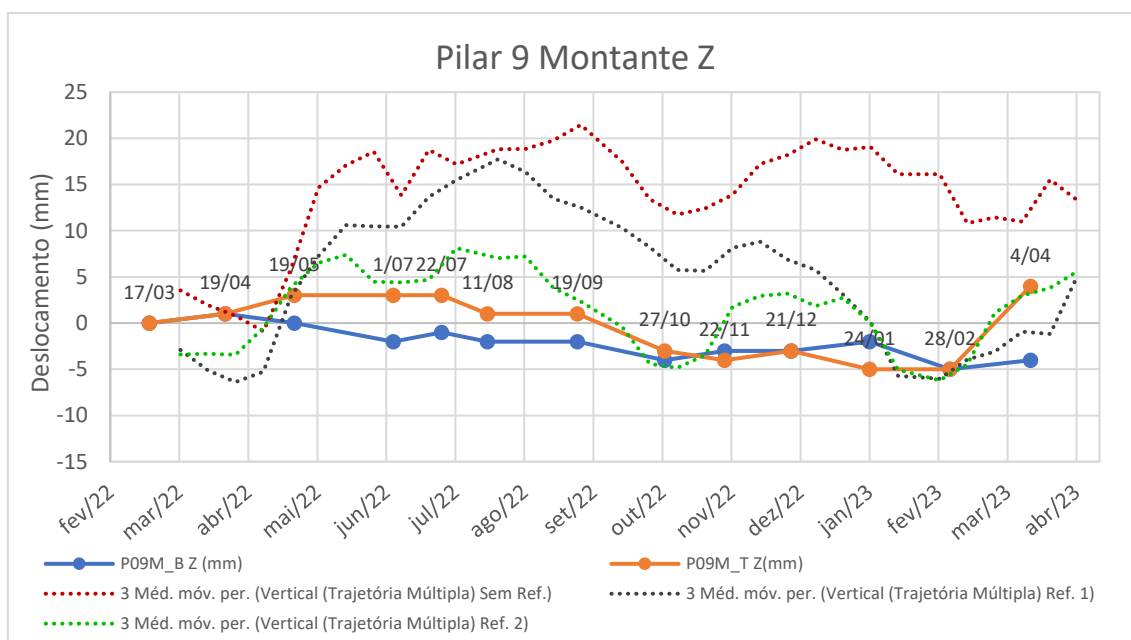


Figura 5.29 - Comparação média móvel para pilar 9 a montante, deslocamento vertical, trajetória múltipla

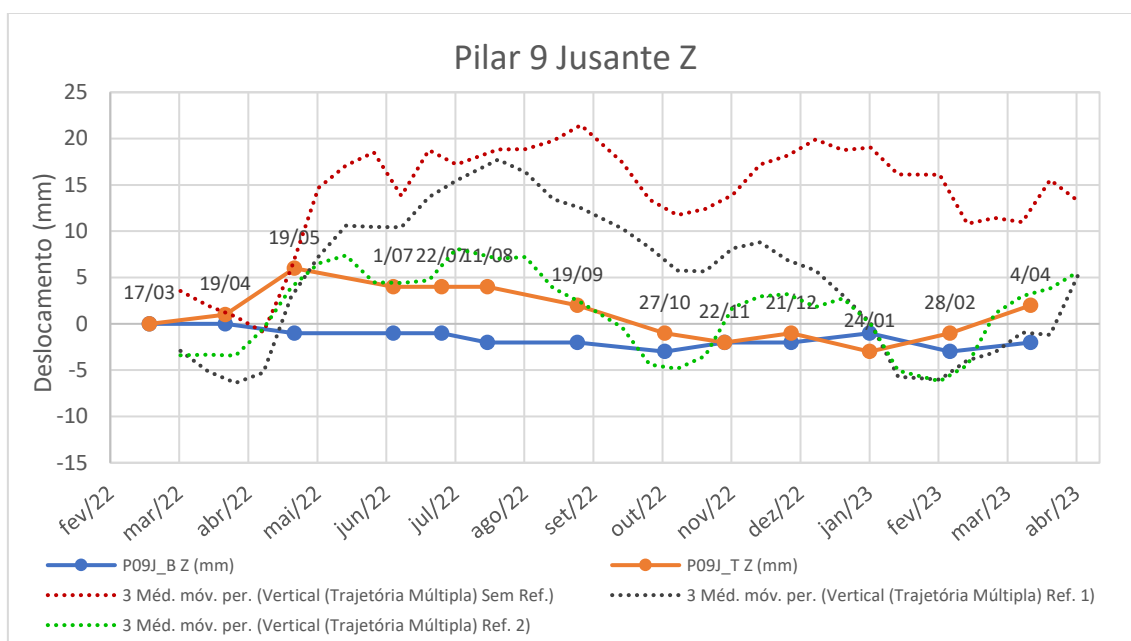


Figura 5.30 - Comparação média móvel para pilar 9 a jusante, deslocamento vertical, trajetória múltipla

Quanto a deslocamentos longitudinais (Figura 5.31 e Figura 5.32), na simulação sem referências observa-se alguma correspondência em tendências mensais, mas a variabilidade e grandeza dos valores tornam a análise anual inconclusiva. Com o uso de referências, apesar de melhoria na grandeza, verificou-se uma diminuição da correspondência de tendências.

Isto pode ter acontecido pelo facto de as referências consideradas corresponderem a áreas com movimentações horizontais. Uma vez que estes valores tem uma boa correspondência em deslocamentos verticais e não se verifica uma boa correspondência em deslocamentos longitudinais, conclui-se que a conversão de LOS não permitiu capturar as maiores movimentações medidas *in situ*, apesar das diferenças entre LOS ascendente e descende apontarem para a existência de maiores deslocamentos horizontais.

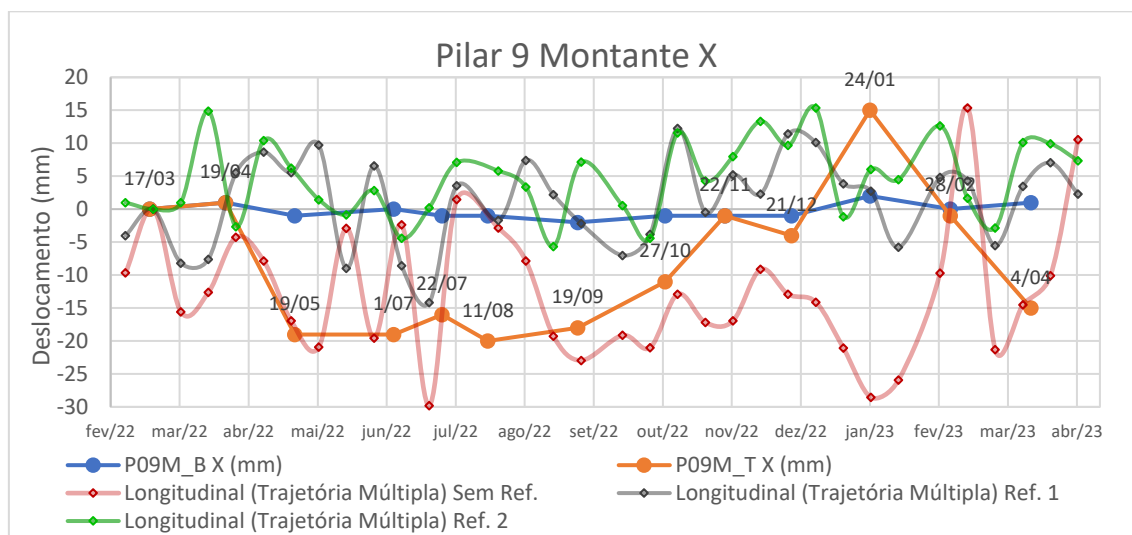


Figura 5.31 - Comparação para pilar 9 a montante, deslocamento longitudinal, trajetória múltipla

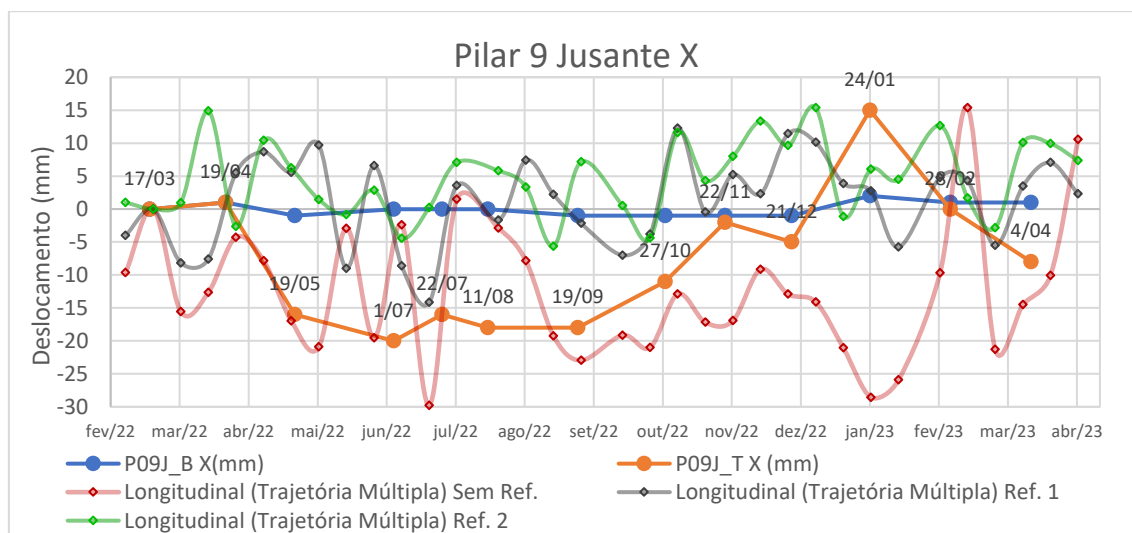


Figura 5.32 - Comparação para pilar 9 a jusante, deslocamento longitudinal, trajetória múltipla

Nas estimativas de deslocamentos verticais do pilar 14 (Figura 5.33), o não uso de referência mostra alguma correspondência de tendência, com uma grandeza dos valores muito diferente, visualizando-se uma subida até julho e uma descida até outubro correspondida pelas medições *in situ* do lado montante. De outubro até fevereiro também

há correspondência de tendência, mas os valores são ainda mais desfasados. O uso da referência 1 não proporcionou melhorias significativas, mas diminuiu a distância dos valores à realidade a partir de outubro, embora à custa de maiores oscilações. Com a referência 2 constata-se uma melhoria mais significativa com uma boa correspondência dos valores até outubro. As datas próximas entre os cálculos e as medições in situ, apresentam valores semelhantes, exceto para as datas 22/11/22 e 24/01/2023.

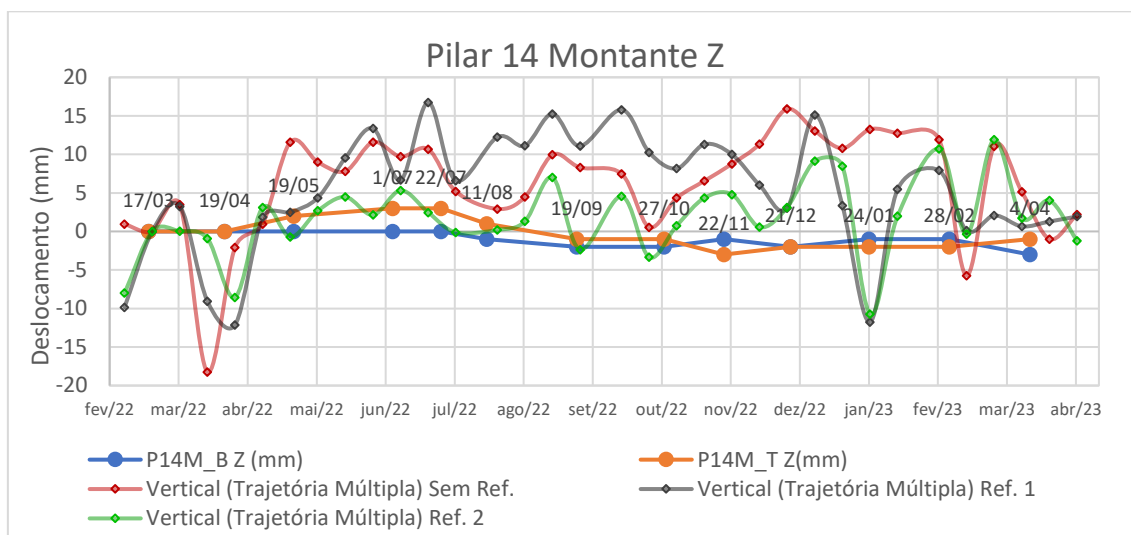


Figura 5.33 - Comparação para pilar 14 a montante, deslocamento vertical, trajetória múltipla

Quanto aos deslocamentos longitudinais no pilar 14 do lado montante (Figura 5.34) há correspondência apenas de outubro a fevereiro. À semelhança do pilar 9, não foi conseguido captar estes deslocamentos longitudinais, correspondentes aos deslocamentos de maior valor.

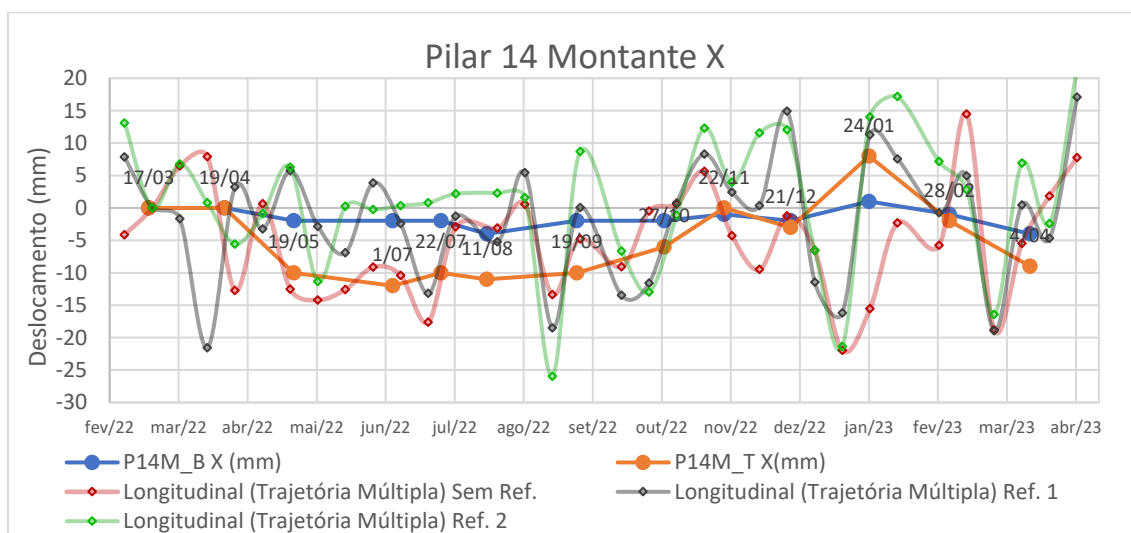


Figura 5.34 - Comparação para pilar 14 a montante, deslocamento longitudinal, trajetória múltipla

No pilar 19 (Figura 5.35), o uso de referências também melhorou a aproximação aos valores de deslocamentos verticais medidos *in situ*. Neste caso, referência 1 foi a que mostrou ter valores mais próximos e melhor correspondência de tendências.

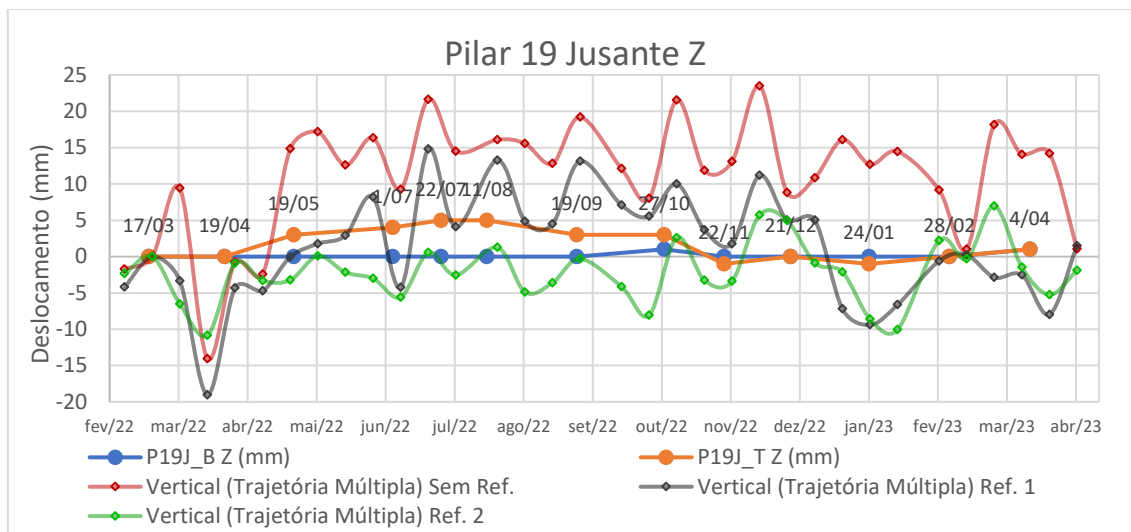


Figura 5.35 - Comparação para pilar 19 a jusante, deslocamento vertical, trajetória múltipla

Nesse pilar, mas na direção longitudinal (Figura 5.36), as referências aproximam os valores aos medidos *in situ*, mas não melhoram as tendências porque apresentam oscilações muito expressivas.

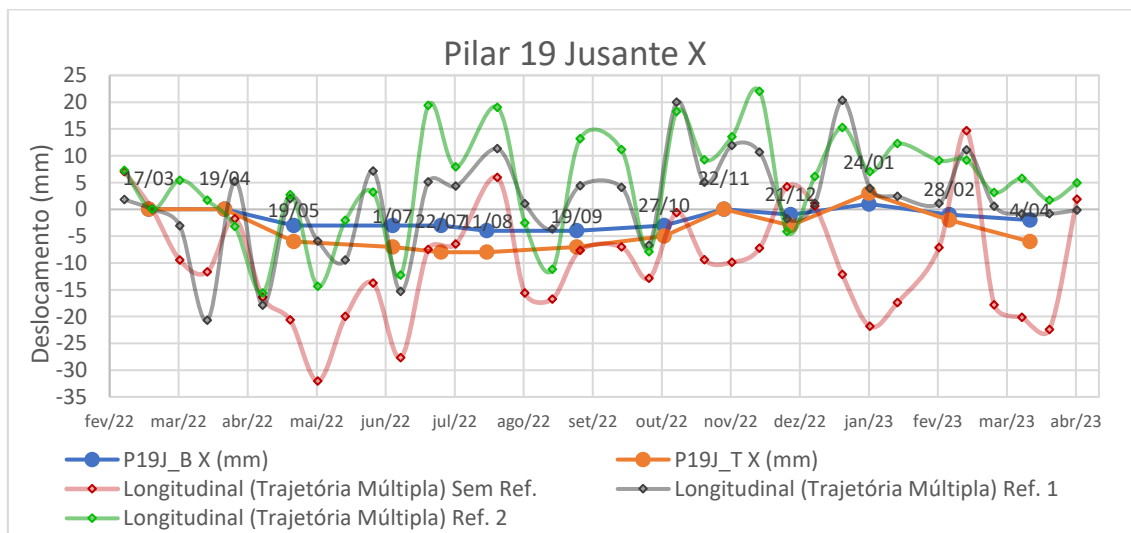


Figura 5.36 - Comparação para pilar 19 a jusante, deslocamento vertical, trajetória múltipla

Nas medições verticais do pilar 24 do lado montante (Figura 5.37), as estimativas com a referência 2 tem menos oscilação, igual tendência e grandeza semelhante, sobretudo quando comparado ao não uso de referência. Há uma correspondência viável embora o ponto zero de referência para comparação (combinação entre as aquisições nº 2) deslocado a linha do gráfico consideravelmente acima do medido *in situ*. A referência 1 demonstrou pouca correspondência e grandezas muito diferentes, à semelhança do não uso de referência.

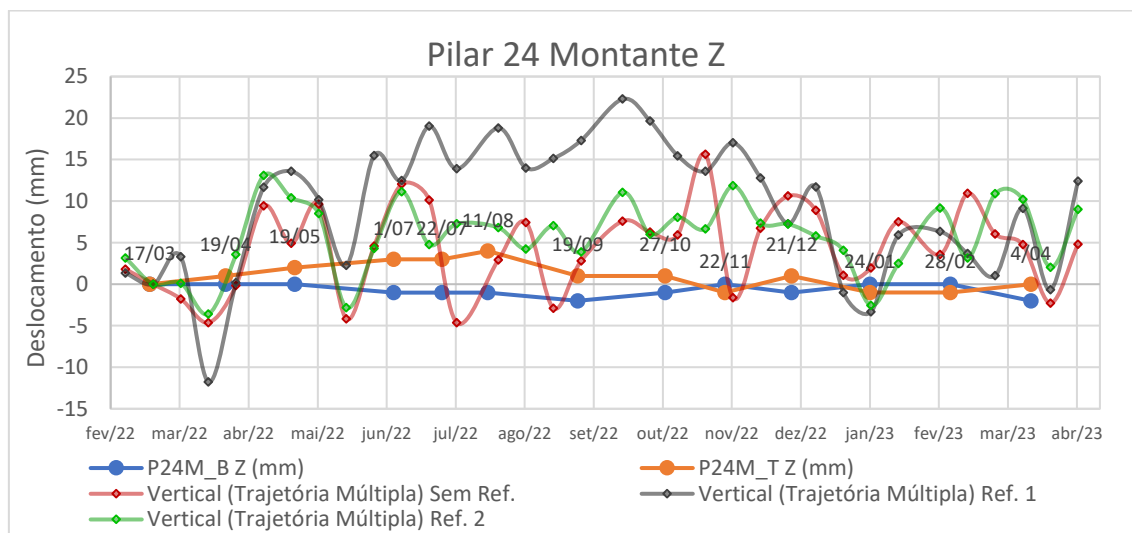


Figura 5.37 - Comparação para pilar 24 a montante, deslocamento vertical, trajetória múltipla

Neste pilar as medições *in situ* não demonstraram grandes alterações de movimento no eixo longitudinal, como observado na Figura 5.38. O uso de referências melhorou a aproximação dos valores calculados, mas não há uma correspondência visível.

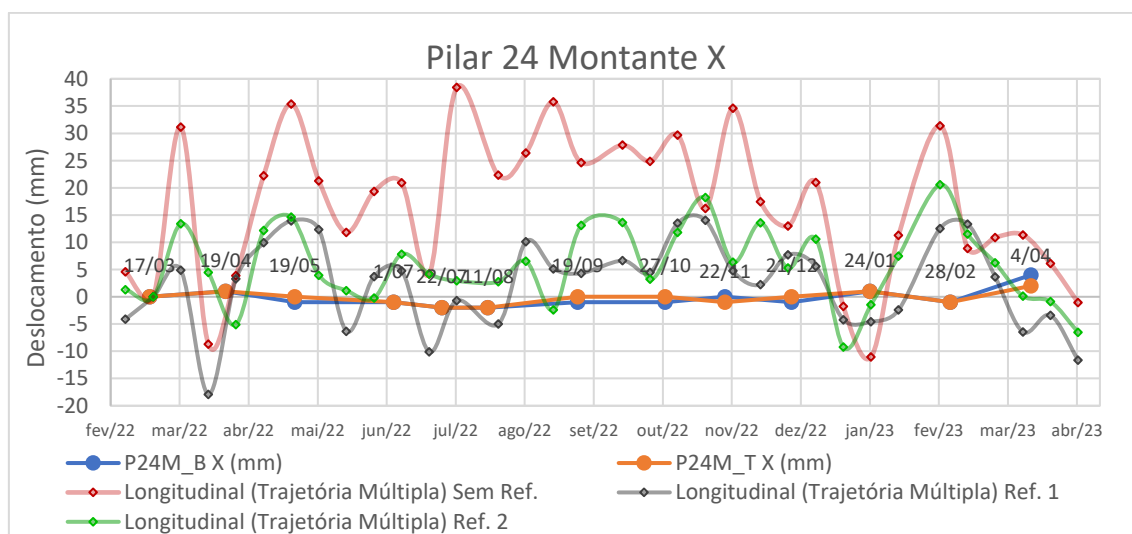


Figura 5.38 - Comparação para pilar 24 a montante, deslocamento longitudinal, trajetória múltipla

O pilar 28 a jusante (Figura 5.39) não apresenta grandes movimentações nas medições *in situ*, por sua vez os valores calculados também são menores, embora apenas haja correspondência a partir de julho. À semelhança do pilar 24, o uso de não referência apresentou valores similares ao uso da referência 2. A referência 1 apresentou valores muito altos de junho a outubro.

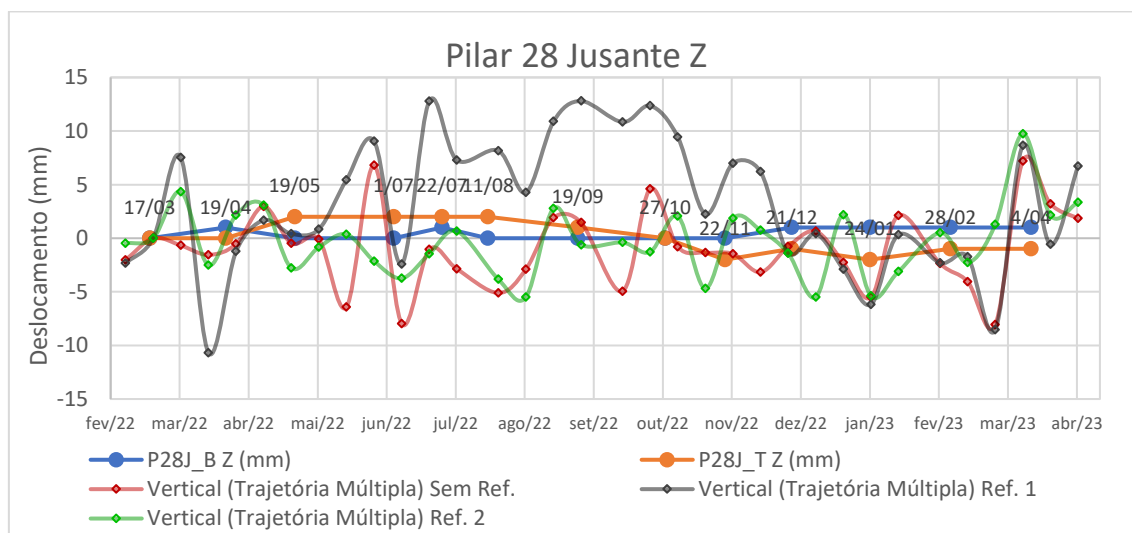


Figura 5.39 - Comparação para pilar 28 a jusante, deslocamento vertical, trajetória múltipla

Já na longitude (Figura 5.40), também não há grandes movimentações *in situ*, e os cálculos melhoram nesse aspecto com o uso da referência 1 e 2. Não há correspondência entre valores obtidos a partir do não uso de referência com os medidos *in situ*.

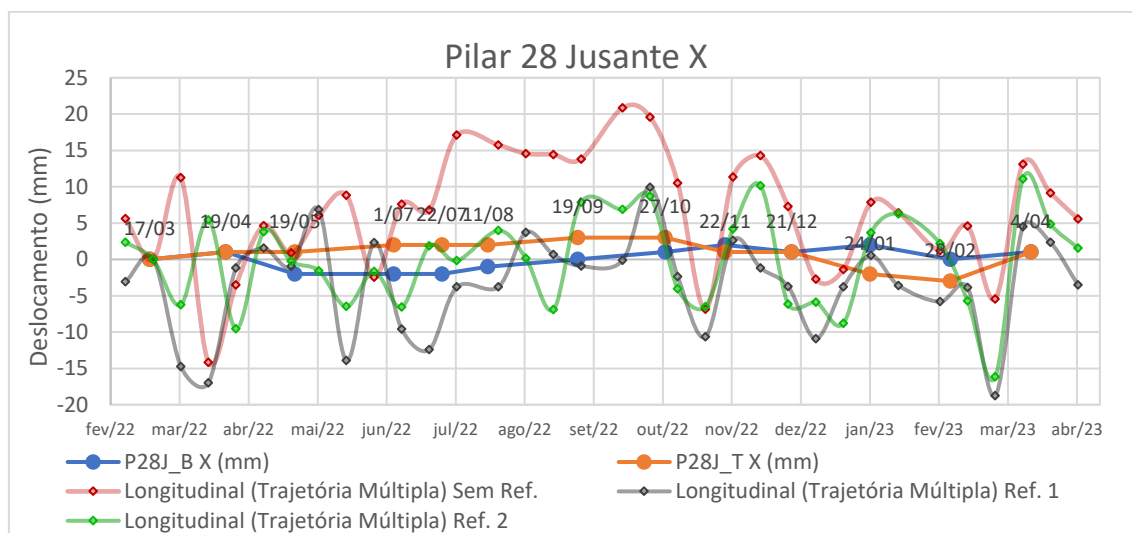


Figura 5.40 - Comparação para pilar 28 a jusante, deslocamento longitudinal, trajetória múltipla

No pilar 32 a montante (Figura 5.41), os valores medidos in situ não mostraram grandes variações ao longo do tempo, nem grandes diferenças entre o topo e a base. Essa foi, aliás, a razão para a escolha deste pilar como referência 2. Mais uma vez, à semelhança do pilar 24 e 28, as linhas correspondentes à referência 2 e ao sem referência mostram resultados parecidos. Há alguma correspondência nas tendências mensais, mas, será mais importante referir que as grandezas dos valores obtidos se enquadram na precisão dos valores de deslocamento individuais de 5mm referidos em (Nettis et al., 2023; Tre Altamira, n.d.).

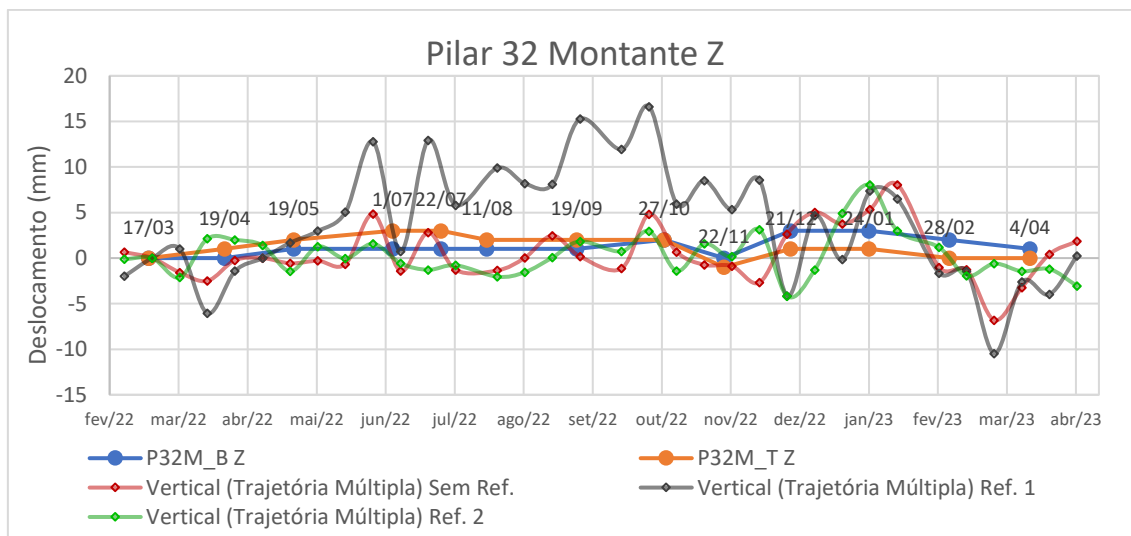


Figura 5.41 - Comparação para pilar 32 a montante, deslocamento vertical, trajetória múltipla

Quanto aos deslocamentos na longitudinal (Figura 5.42), não usar referencia demonstrou uma aproximação dos valores e correspondência nas tendências. Com as referências 1 e 2 as linhas no gráfico descem, tornando menos perceptível a correspondência de tendências demonstrada originalmente.

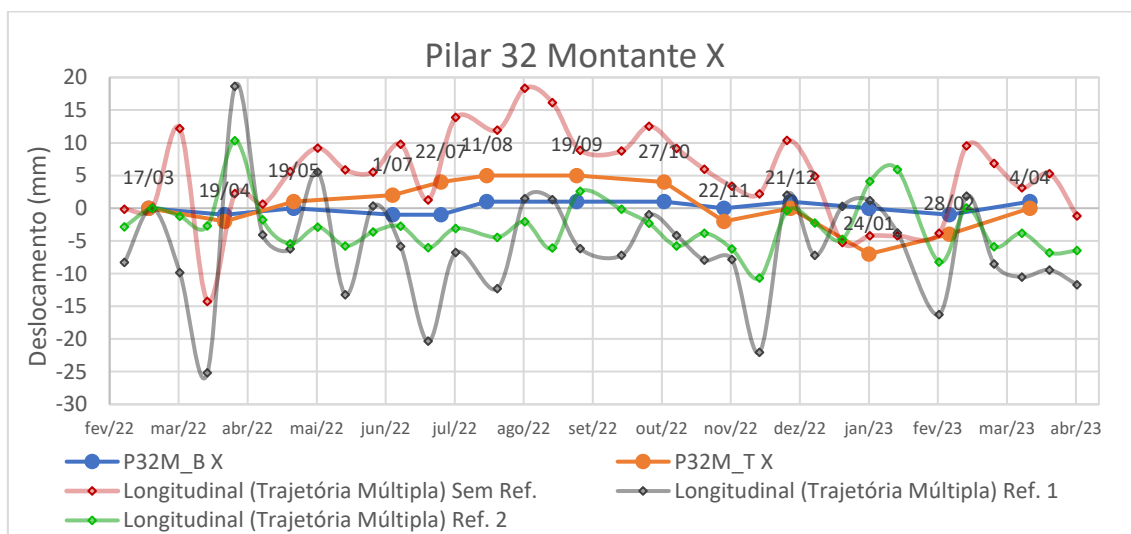


Figura 5.42 - Comparação para pilar 32 a montante, deslocamento vertical, trajetória múltipla

O comportamento do pilar 33 (Figura 5.43, Figura 5.44) é parecido ao pilar 32 na verticalidade. Os resultados são os mesmos. Os valores oscilam e variam maioritariamente entre 5 e -5mm exceto para sem referência depois de dezembro de 2023 e para a referência 1 que, apesar de maiores distâncias aos valores reais, mostrou maior correspondência nas tendências entre medições.

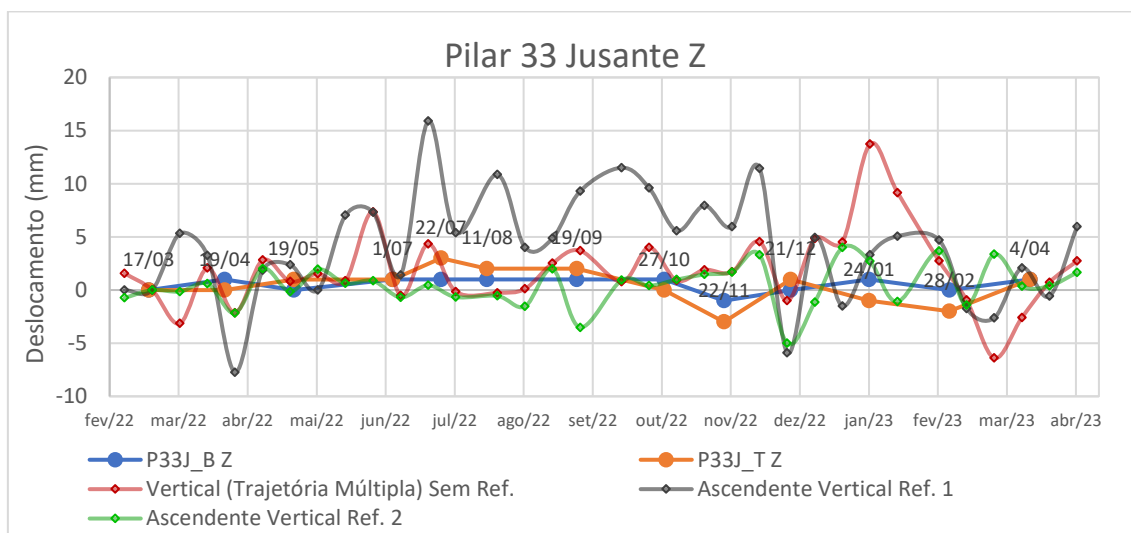


Figura 5.43- Comparação para pilar 33 a jusante, deslocamento vertical, trajetória múltipla

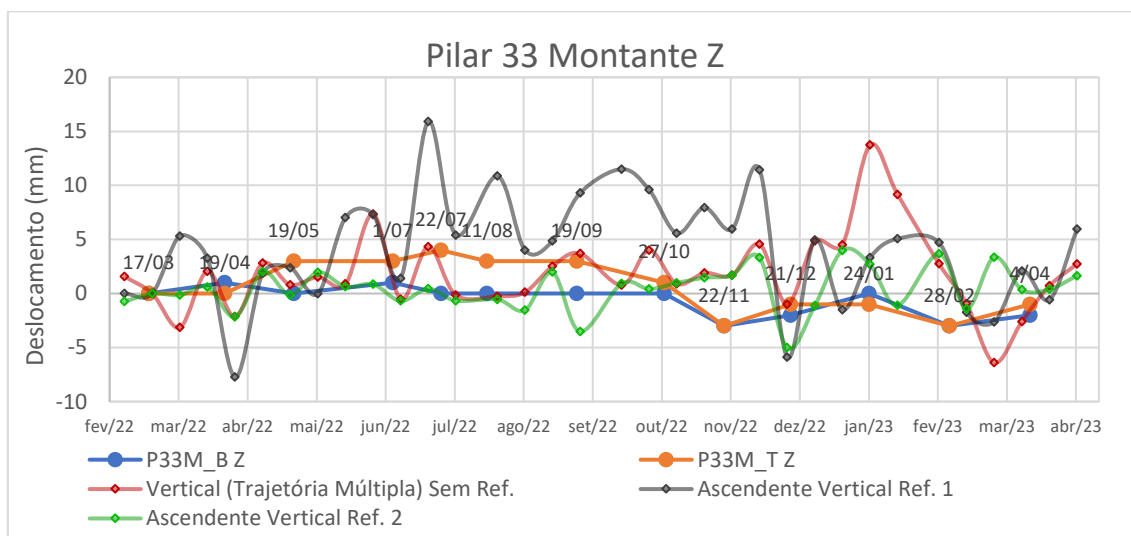


Figura 5.44 - Comparação para pilar 33 a montante, deslocamento vertical, trajetória múltipla

No pilar 33 observaram-se diferenças significativas das movimentações no eixo longitudinal entre jusante e montante através das medições in situ (Figura 5.45, Figura 5.46). Apesar de parecer que sem referência representa melhor o pilar a jusante e a referência 2 a montante, essa assunção não foi possível fazer por ser trajetória única e não sensível a valores laterais. Uma vez que só há difusores provenientes de rota ascendente para referência 1 e 2, pode-se assumir que há um reflexo mais predominante por partes a jusante da ponte o que poderia permitir concluir que tanto na vertical como no eixo oeste-este há melhor correspondência com dados a jusante. Infelizmente no decorrer do trabalho não foram encontradas correspondências concretas que cumpram os requisitos dessa regra.

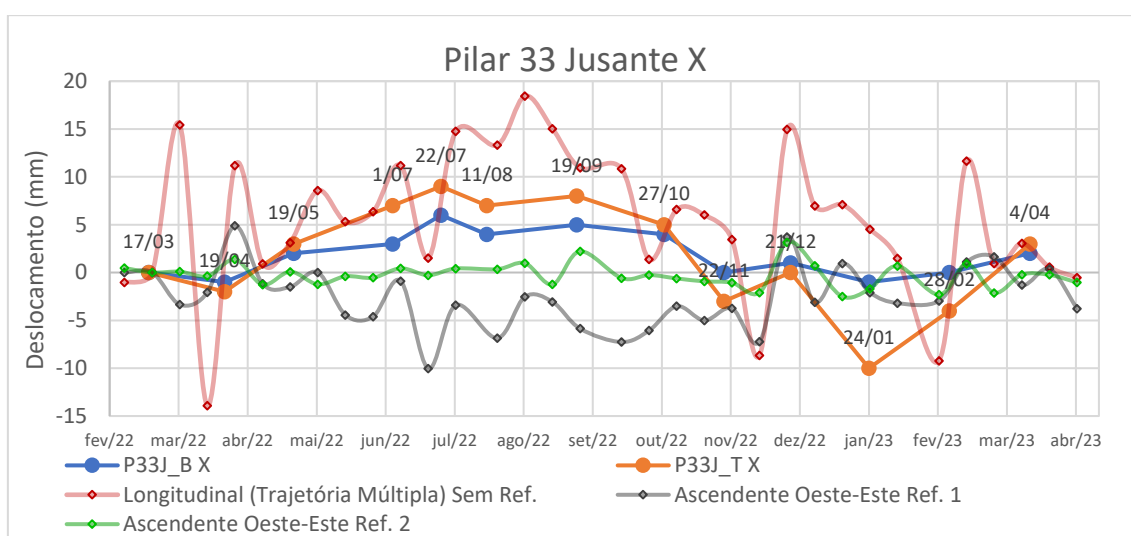


Figura 5.45 - Comparação para pilar 33 a jusante, deslocamento longitudinal, trajetória múltipla

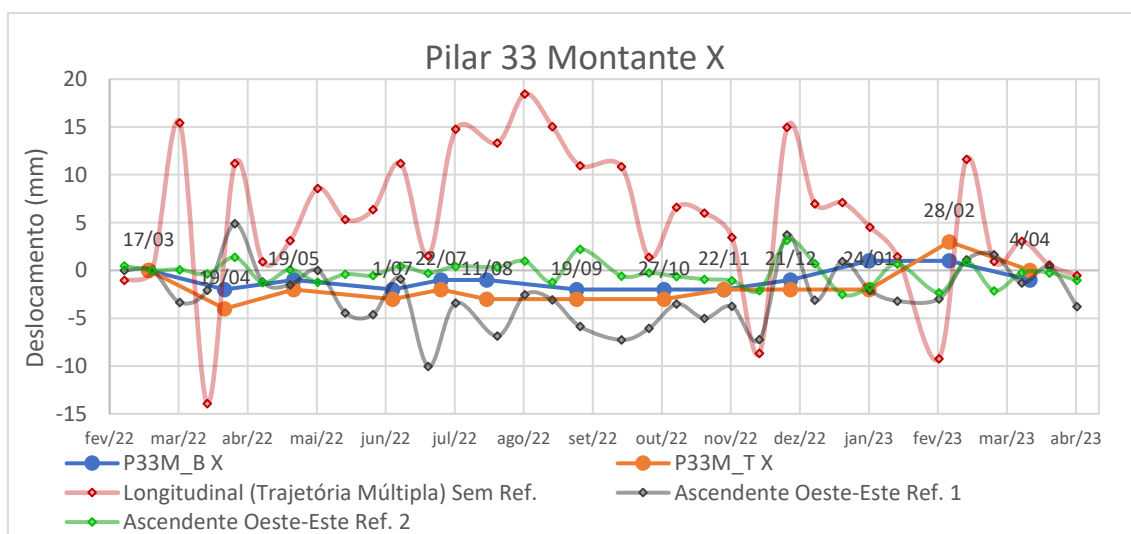


Figura 5.46 - Comparação para pilar 33 a montante, deslocamento longitudinal, trajetória múltipla

Para o pilar 34 (Figura 5.47, Figura 5.48) não há valores provenientes da trajetória descendente na área de influência do ponto correspondente. O não uso de referência e a referência 2 tem tendências semelhantes e alguma correspondência às medições in situ, mas em grandeza de valores diferente. A referência 1 mostrou-se com maiores oscilações.

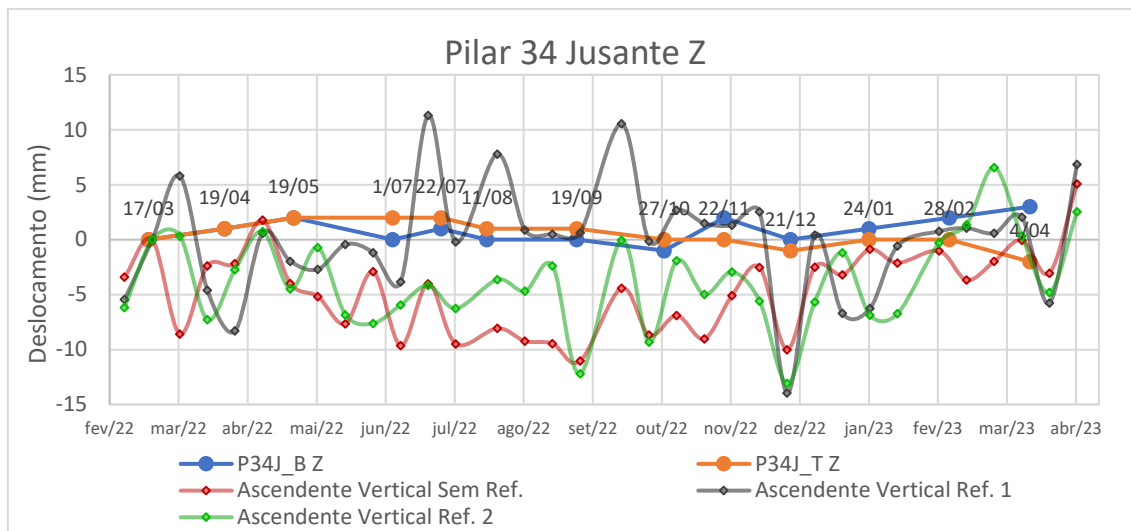


Figura 5.47 - Comparação para pilar 34 a jusante, deslocamento vertical, trajetória única

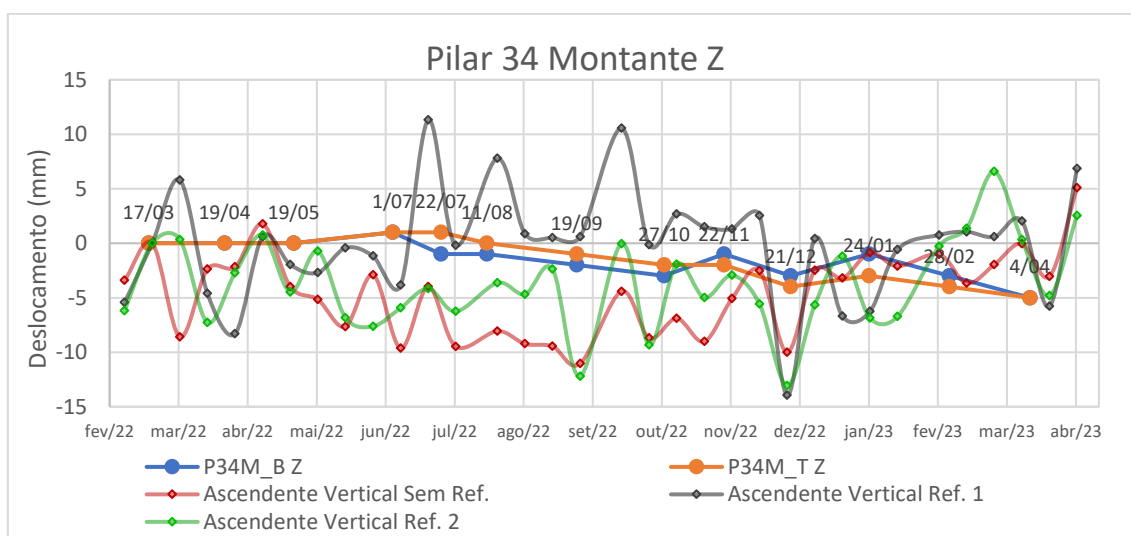


Figura 5.48 - Comparação para pilar 34 a montante, deslocamento vertical, trajetória única

Quanto ao eixo longitudinal, os valores a comparar são apenas no plano X, Oeste-Este (Figura 5.49, Figura 5.50), a inclinação da ponte é de noroeste para sudeste. Pelo fato de a aquisição de referência ter um valor negativo, a curva do gráfico subiu e, apesar de alguma correspondência nas tendências, os valores estão significativamente distantes às medições *in situ*.

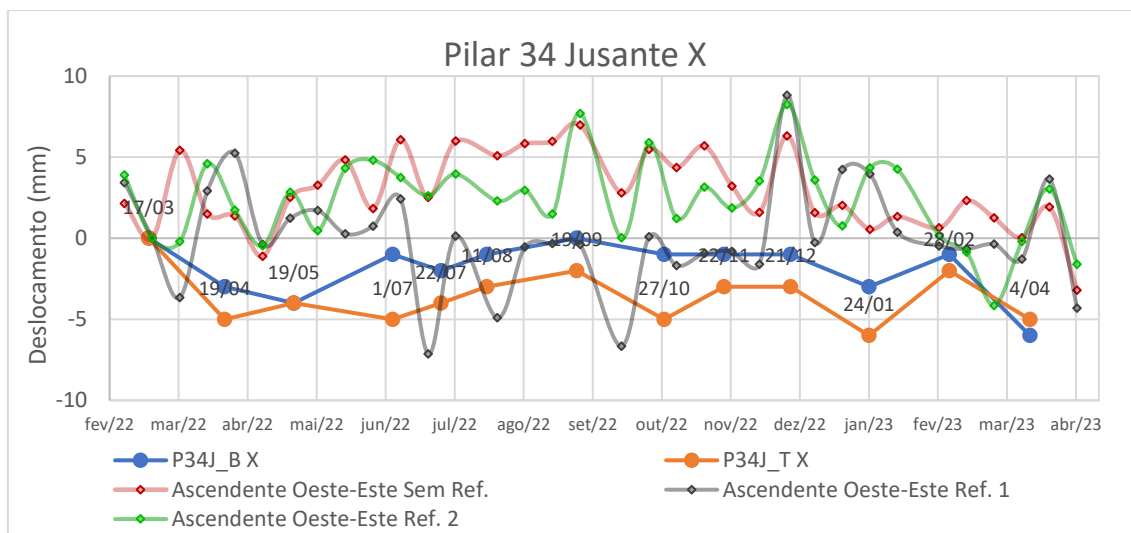


Figura 5.49 - Comparação para pilar 34 a jusante, deslocamento longitudinal, trajetória única

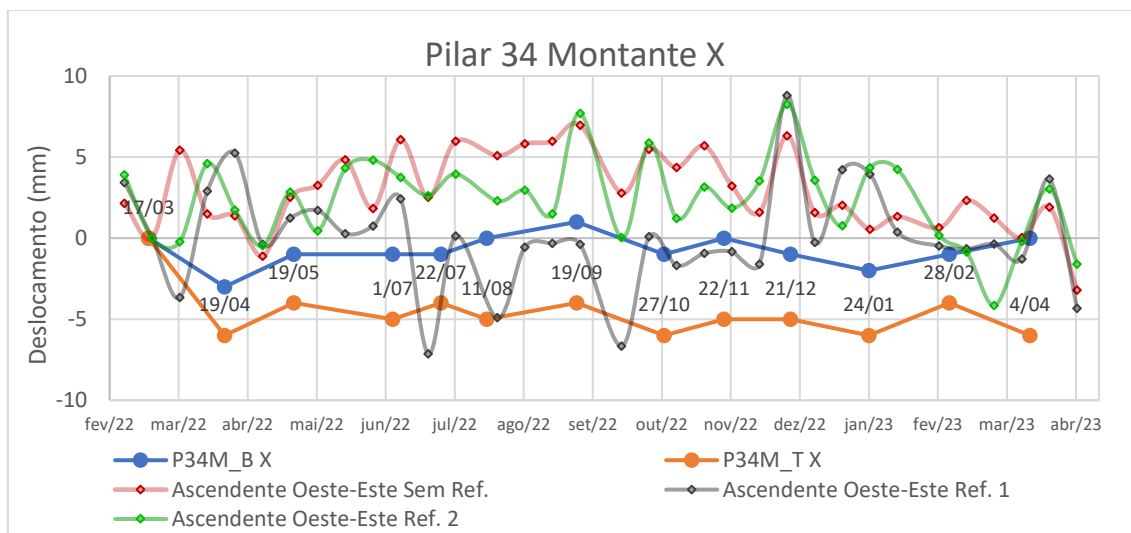


Figura 5.50 - Comparação para pilar 34 a montante, deslocamento longitudinal, trajetória única

No pilar 35 (Figura 5.51, Figura 5.52) os valores com a referência 2 são muito parecidos aos valores sem uso de referência, mas é a referência 1 que melhor representa a tendência em relação ao verificado *in situ*.

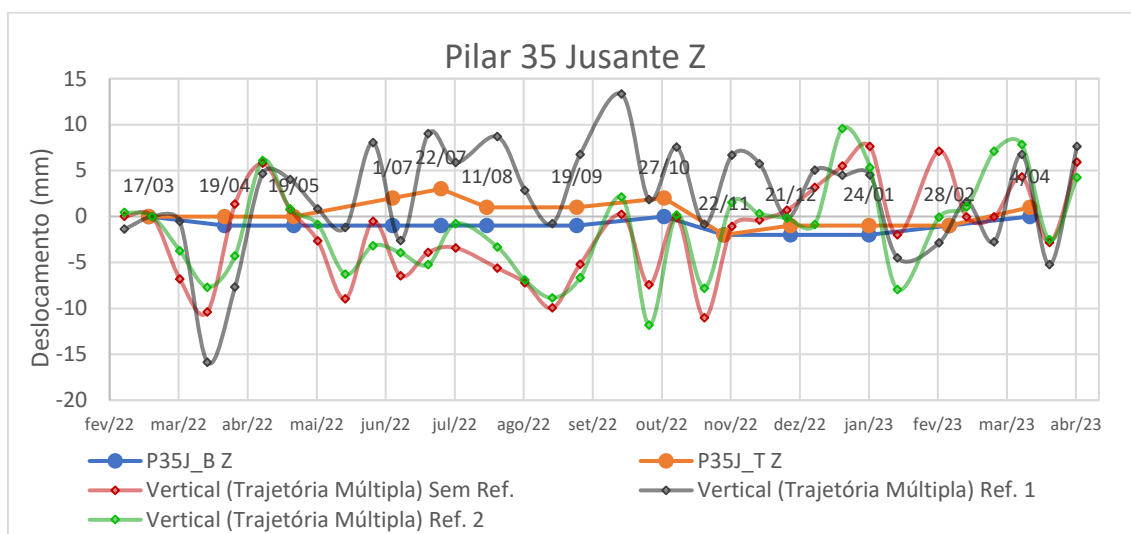


Figura 5.51 - Comparação para pilar 35 a jusante, deslocamento longitudinal, trajetória única

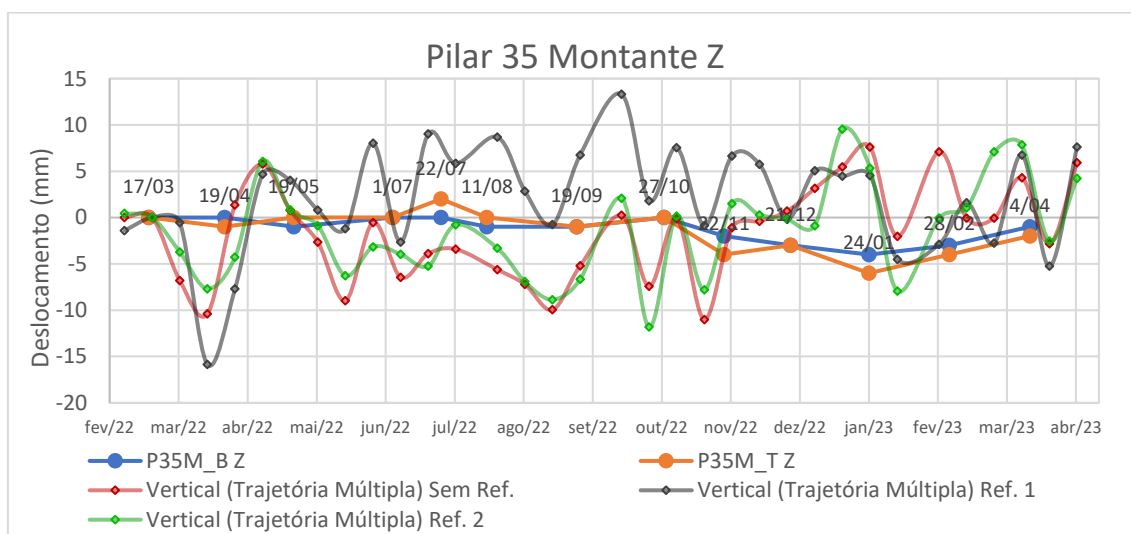


Figura 5.52 - Comparação para pilar 35 a montante, deslocamento vertical, trajetória única

No eixo longitudinal (Figura 5.53, Figura 5.54), há uma melhoria na aproximação dos valores calculados com referência 1 e 2 aos valores medidos in situ. Há uma maior correspondência a montante do que a jusante.

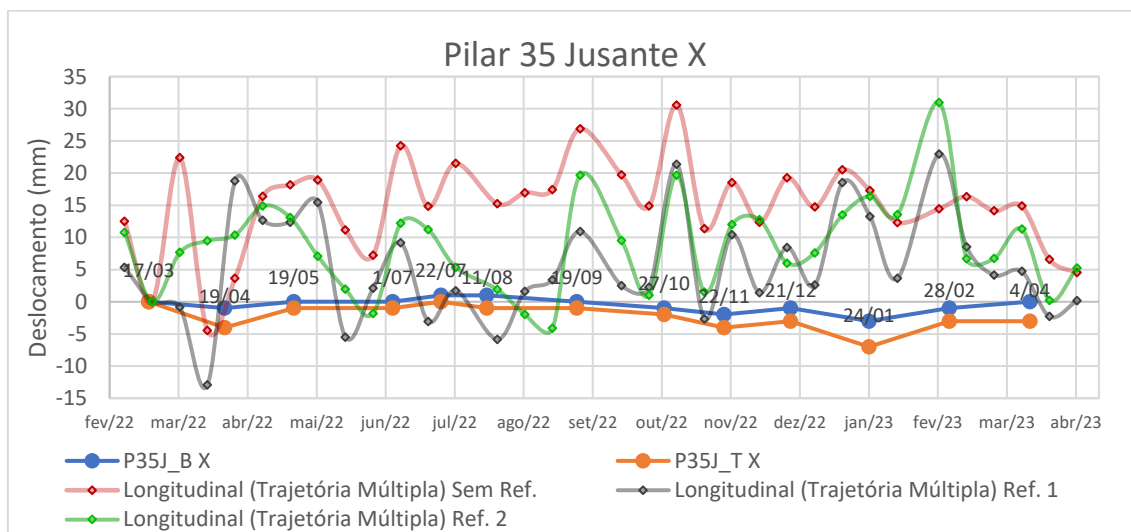


Figura 5.53 - Comparação para pilar 35 a jusante, deslocamento longitudinal, trajetória única

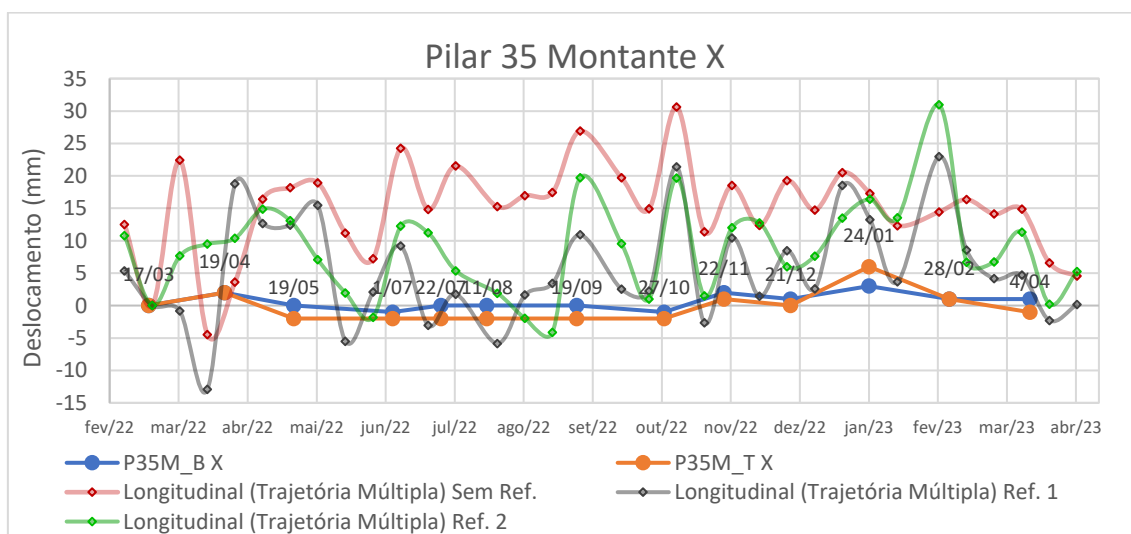


Figura 5.54 - Comparação para pilar 35 a montante, deslocamento longitudinal, trajetória única

No pilar 36 (Figura 5.55) os difusores apresentaram alturas mais compatíveis com a realidade quando comparados com o pilar 35. O não uso de referência e a referência 2 demonstraram uma aproximação dos valores calculados aos medidos *in situ*, assim como as respectivas tendências. A referência 1 corresponde nas tendências, mas a grandeza dos valores é superior.

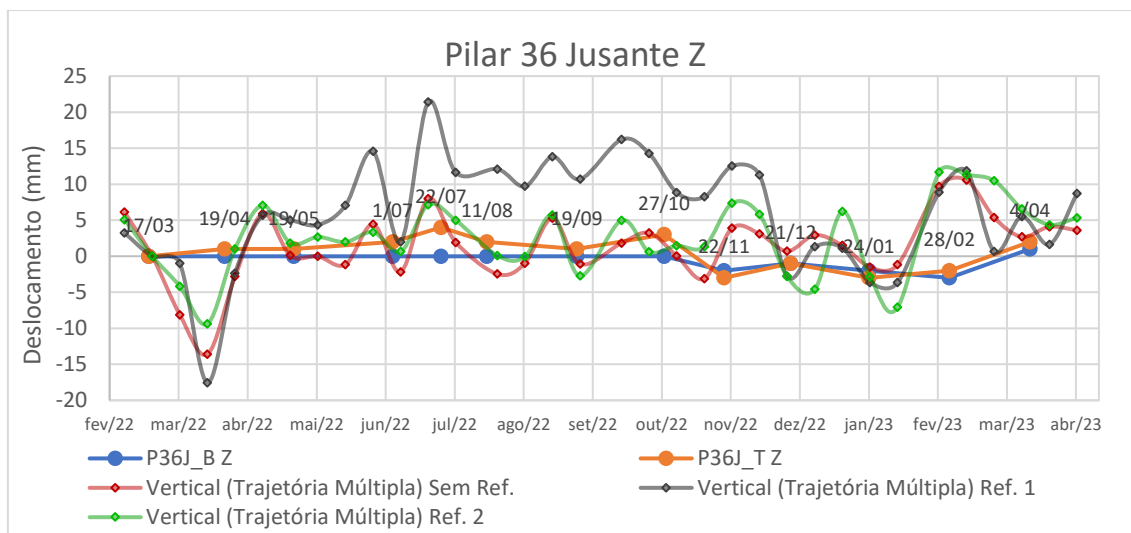


Figura 5.55 - Comparação para pilar 36 a jusante, deslocamento vertical, trajetória única

No eixo longitudinal (Figura 5.56), o uso de referências não trouxe melhores resultados. Apesar de alguma correspondência em tendência, a não referência apresentou valores mais próximos aos medidos *in situ*.

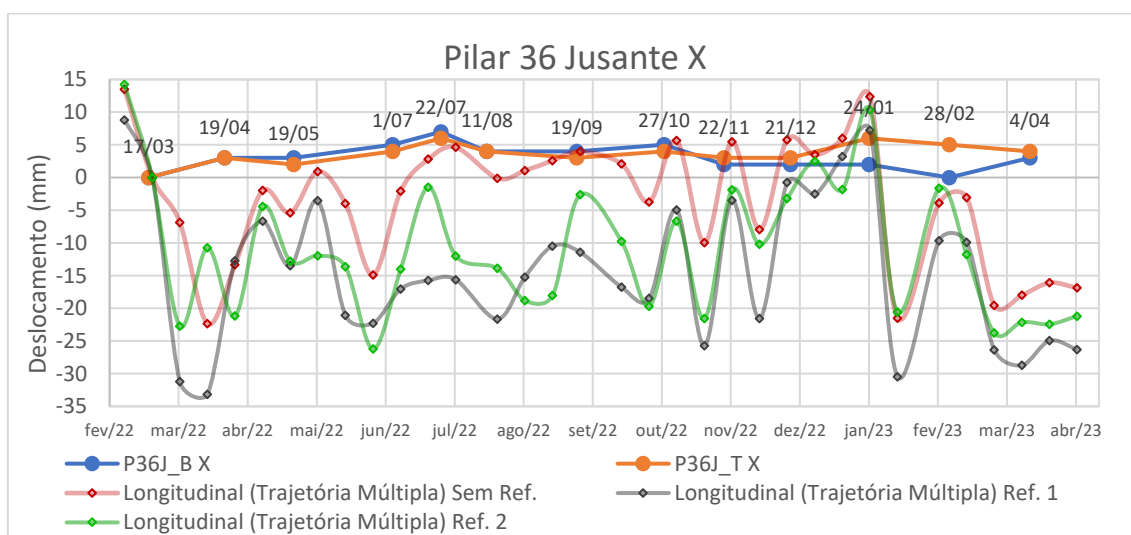


Figura 5.56 - Comparação para pilar 36 a jusante, deslocamento longitudinal, trajetória única

Para o pilar 41(Figura 5.57), os valores oscilam bastante e não aparenta haver qualquer correspondência com as medições *in situ*.

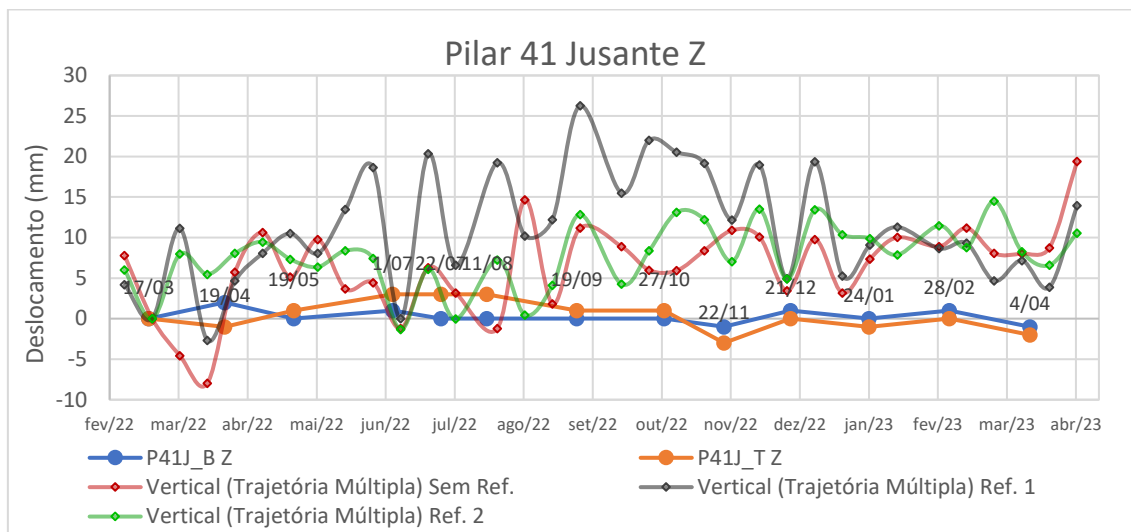


Figura 5.57 - Comparação para pilar 41 a jusante, deslocamento vertical, trajetória única

No eixo longitudinal (Figura 5.58), também não há qualquer correspondência em tendências, os valores oscilam, mas não criam uma tendência que seja categoricamente similar ao medido *in situ*.

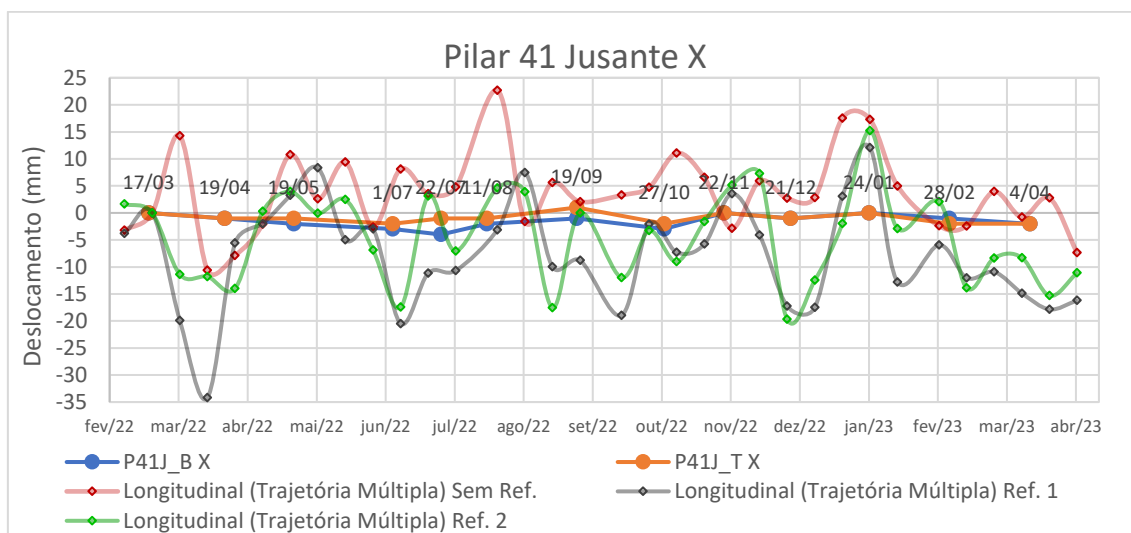


Figura 5.58 - Comparação para pilar 41 a jusante, deslocamento longitudinal, trajetória única

No pilar 45 (Figura 5.59) os difusores apresentaram alturas inferiores ao que seria espectável. À semelhança dos pilares anteriores a referência 1 tem valores mais distantes, a referência 2 e não referencia tem valores e tendências parecidos. Em relação às medições *in situ*, comparado com pilar 45 a montante, a oscilação dos valores calculados mantém-se na mesma grandeza.

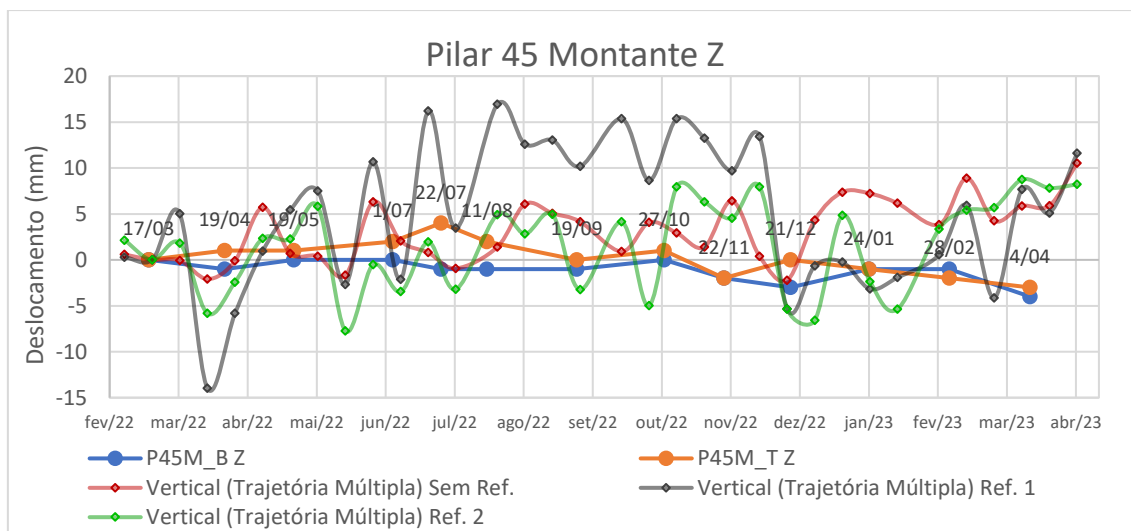


Figura 5.59 - Comparação para pilar 45 a montante, deslocamento vertical, trajetória única

No eixo longitudinal (Figura 5.60), ambas as referências pioram a aproximação dos valores. Com a referência 2 os valores aproximam-se em alguns períodos, mas de forma geral o não uso de referência mostra melhores correspondências nas tendências.

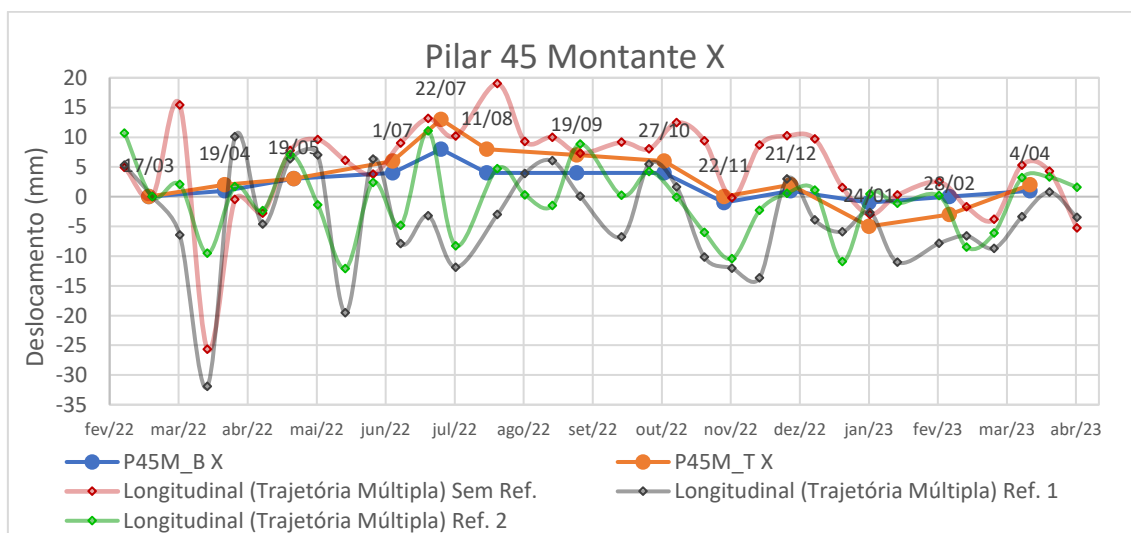


Figura 5.60 - Comparação para pilar 45 a montante, deslocamento longitudinal, trajetória única

Na Figura 5.61 estão representadas as variações em todos os pilares comparados, medições verticais no topo e base com estimativas verticais e medições longitudinais no topo e base com estimativas longitudinais. Para comparação de valores, apenas os valores relativos às datas das aquisições mais próximas da data das medições *in situ* foram tidos em conta. Observando a figura e sendo a mediana a tendência central, verifica-se que a distribuição é positivamente assimétrica com valores atípicos que colocam as médias próximas do quantil 75. Observa-se que as diferenças verticais entre dados *in situ* e estimativas em Ref. 2 apresentam menor variabilidade que a Ref. 1 e Sem Ref.. Quanto às diferenças longitudinais verifica-se uma maior variabilidade sem o uso de referência, embora a tendência central muito parecida quando comparado os dados das estimativas com os medidos nos alvos do topo dos pilares. De forma geral, a Ref. 2 permitiu que os valores se aproximassem consideravelmente, já com a Ref. 1 verifica-se uma tendência central superior nas medições verticais.

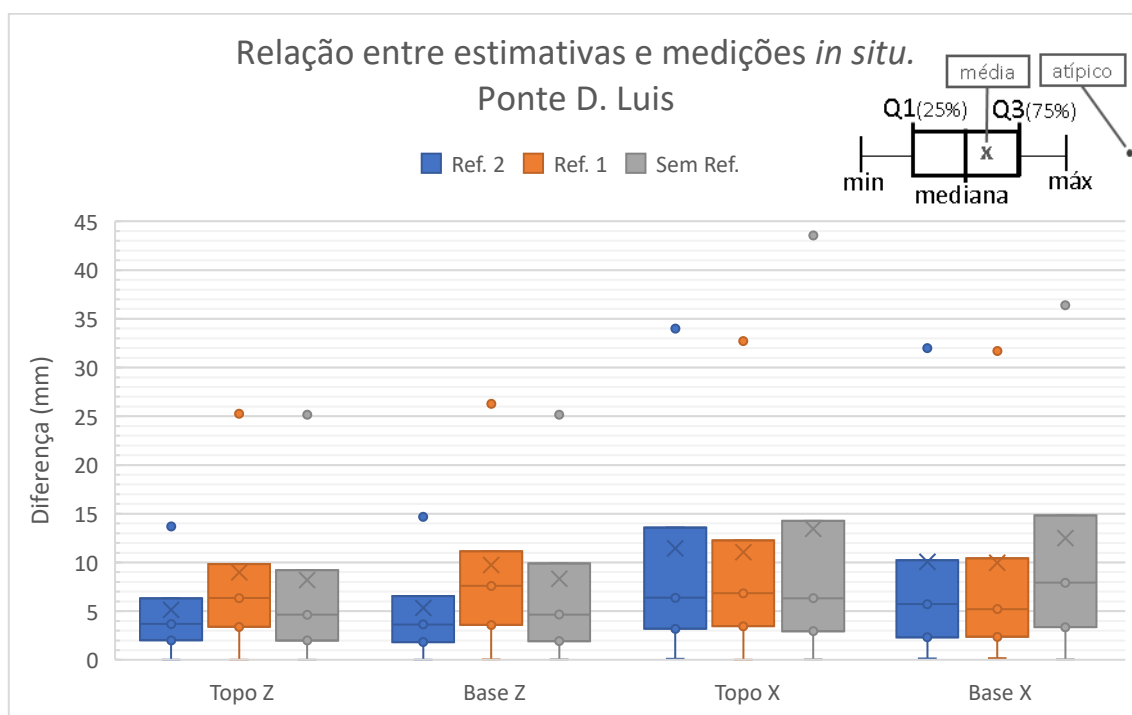


Figura 5.61 - Distribuição das diferenças entre estimativas e medições *in situ* para a ponte D. Luís

Os pilares que melhor correspondem a tendência de movimentações verticais são o Pilar 9, o pilar 32 e o pilar 36. Sendo que há um fator importante que relaciona estes 3 pilares comparativamente com os outros, que é a topografia correta dos PS que constituem o ponto de análise sobre cada um destes pilares (Tabela 5.8). Isto é, se os pontos usados, que estão sobre a ponte, têm uma altura associada correspondente com a altura real da ponte, então o comportamento estimado representa melhor o medido *in situ*. Contudo, no

que toca aos deslocamentos longitudinais, esta condição não se confirma, a correspondência é mais aleatória, pelo que merece ser objeto de mais estudos.

A correção da geolocalização com recurso à topografia não foi aplicada no pós-processamento pois os PS aparentam estar sobre a ponte, mas numa análise mais completa do valor de elevação de cada PS nota-se inconsistências topográficas. Elevações estimadas dos PS influenciam os valores dos deslocamentos, isto é, se há PS com elevações incorretas, geralmente os valores do deslocamento também serão incorretos (Patrício, 2018). Não há uma uniformidade na topografia, sendo que a elevação de pontos correspondentes entre trajetórias varia muito.

Segue-se uma tabela (Tabela 5.8) de uma avaliação entre a altura real da ponte a partir do elipsoide e a altura associada dos pontos sobre a ponte que foram usados. Observa-se que outros pilares além dos 9, 32 e 36, não apresentam inconsistências, como é o exemplo do pilar 33 e 41. O problema com estes pilares é que os PS estão mais afastados. O pilar 28 os PS estão mais próximos, mas traduz apenas uma aproximação de grandeza dos valores, isto pode ser explicado por futuros estudos na correlação entre os PS, uma vez que há 1 PS em trajetória descendente e 3 em trajetória ascendente com correlação média entre si inferior aos outros.

Tabela 5.8 - Comparação da elevação dos pontos com a elevação real da sua posição.

Pilar	Altura real (m)	Altura associada dos pontos (m)	Inconsistência topográfica
P9	80.76	78-81	Não
P14	79.86	73-79	Sim
P19	78.86	72-79	Sim
P24	78.26	73	Sim
P28	77.76	75-77	Não
P32	75.76	76	Não
P33	75.76	76	Não
P34	75.76	72-74	Sim
P35	75.76	72-75	Sim
P36	75.26	74-75	Não
P41	74.76	74	Não
P45	73.26	68-71	Sim

À semelhança da análise em geral para toda a ponte, quando analisamos apenas os pilares 9, 32 e 36, verifica-se a melhoria na variabilidade dos dados verticais com referências como observado na Figura 5.62. Embora na Ref. 1 a mediana seja maior que Sem Ref., os dados concentram-se mais em seu entorno. De qualquer forma, a Ref. 2 é a que conduz a melhores resultados nesse aspeto. Quanto a resultados longitudinais verifica-se que, a Ref. 2 demonstra mais variação com um máximo de 18mm para 75% dos valores quando comparado com Sem Ref. que obtém um máximo de variação de 11mm apesar da presença de valores atípicos. É também possível observar que 50% das comparações, variam entre 1 e 4mm na componente vertical, apesar de valores atípicos, e entre 6 e 18mm na componente longitudinal, quando usado a Ref. 2. Assim, quando os PS verificados para topografia e tendências correspondentes, 75% dos valores verticais individuais das series temporais estimados variaram um máximo de 4 mm, dos valores efetivamente medidos *in situ* nos alvos no topo da ponte.

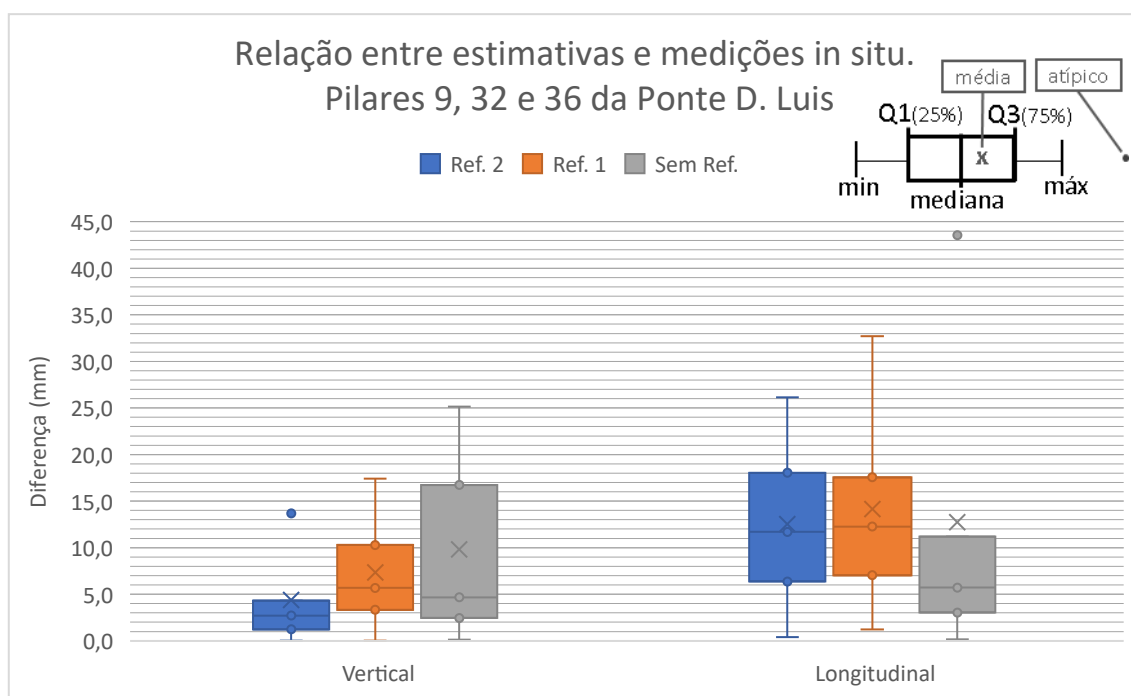


Figura 5.62 - Distribuição das diferenças entre estimativas e medições *in situ* para os pilares 9, 32, 36 da ponte D. Luis

Importa ainda dizer que estes valores verticais estão dentro do intervalo referido para medições individuais absolutas (Nettis et al., 2023; Tre Altamira, n.d.).

5.7.2. Análise dos resultados obtidos para a Ponte da Asseca

Também por cortesia das Infraestruturas de Portugal, foram consultados para a Ponte da Asseca valores medidos *in situ* por técnicas topográficas, com 24 alvos, de 23 de setembro de 2022 a 5 de abril de 2024, representados na Figura 5.63, onde se observa a sua disposição, tanto do lado montante, como do lado jusante.

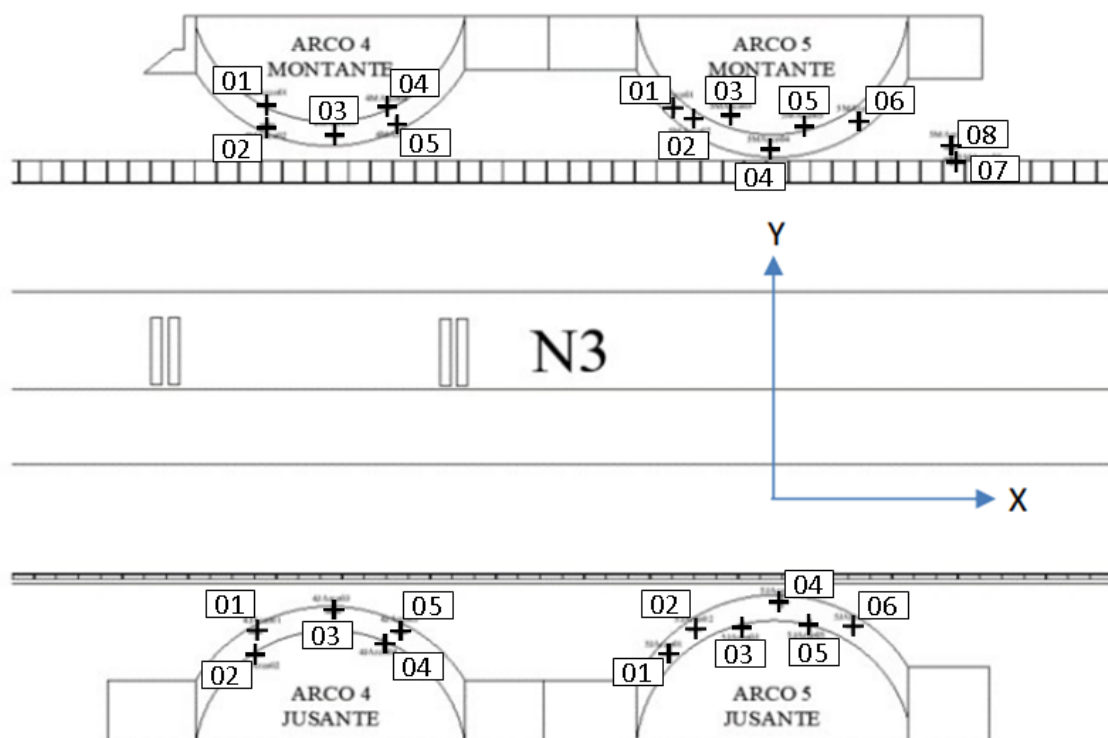


Figura 5.63 - Esquema da Ponte da Asseca e respectivas posições dos alvos. Fonte: (Infraestruturas de Portugal, n.d.).

Serão unicamente usadas as medições em Z e em X da ponte, ignorando os deslocamentos laterais desta. Os valores de Z são considerados positivos da base para o topo e os valores X são considerados positivos do Carregado para Santarém.

A referência do sensor utilizado foi Leica TM 50i, com uma precisão de 0.6mm e uma tolerância total das observações, tanto na componente altimétrica como na planimétrica de 3mm (1mm aparelho + 1mm pontaria + 1mm alvo).

Os resultados obtidos para esta ponte com o uso do StaMPS foram os que se passam a apresentar na Figura 5.64, na Figura 5.65 e na Figura 5.66, onde a gama obtida para a taxa de deslocamento é caracterizada através de uma escala de cores.

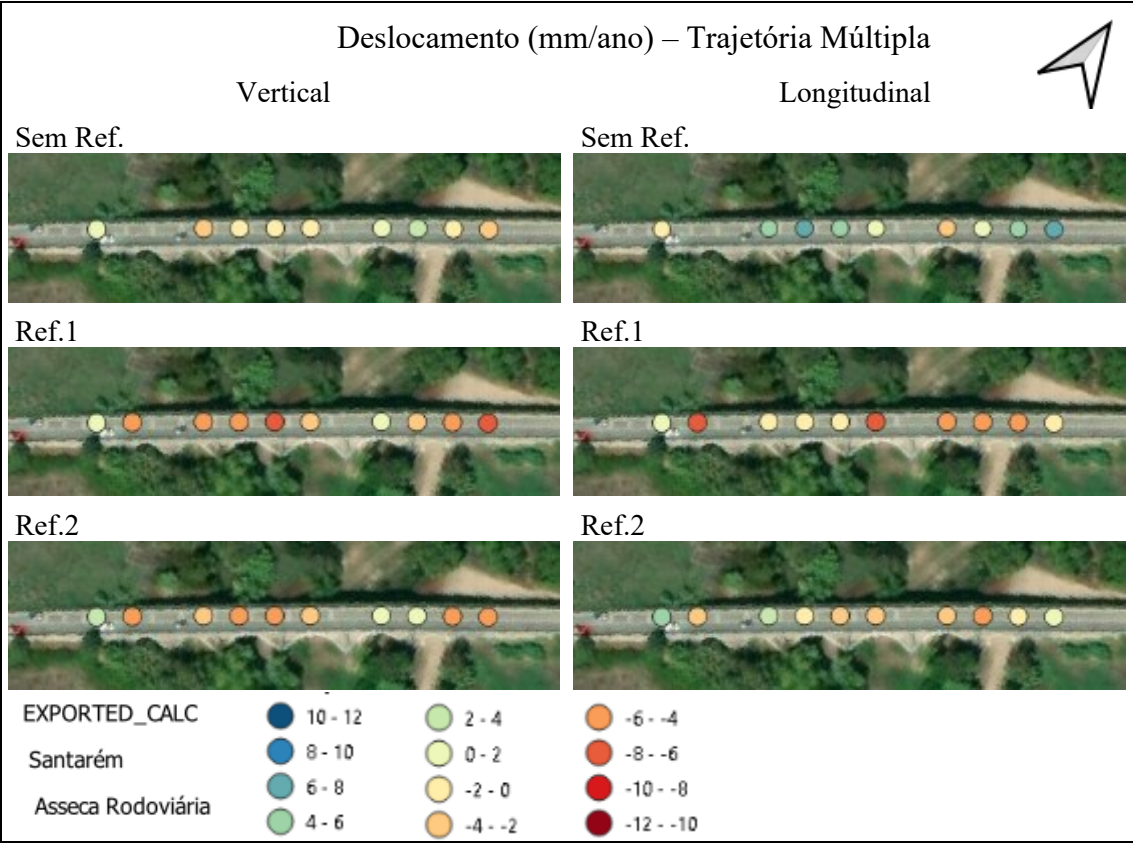


Figura 5.64 - Resultados velocidade de deslocamento anual para várias referências na trajetória múltipla, ponte da Asseca

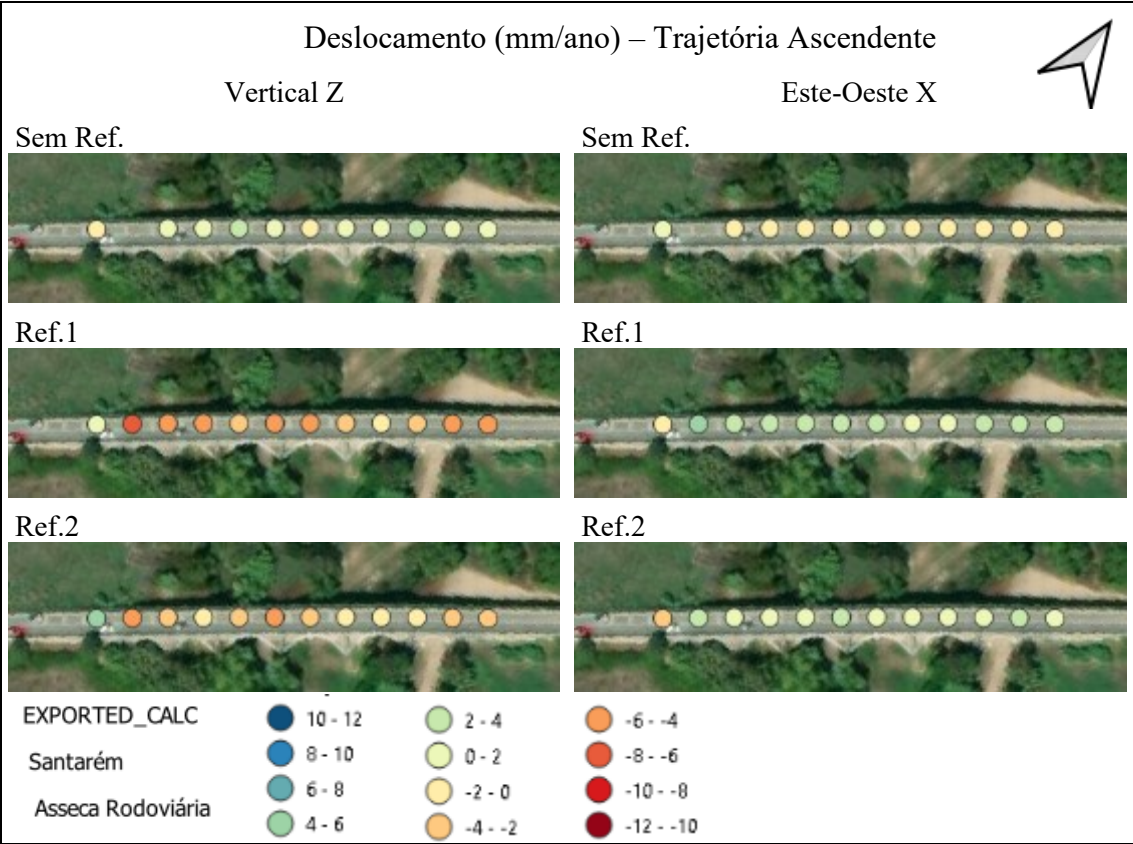


Figura 5.65 - Resultados velocidade de deslocamento anual para várias referências, na trajetória ascendente, ponte da Asseca

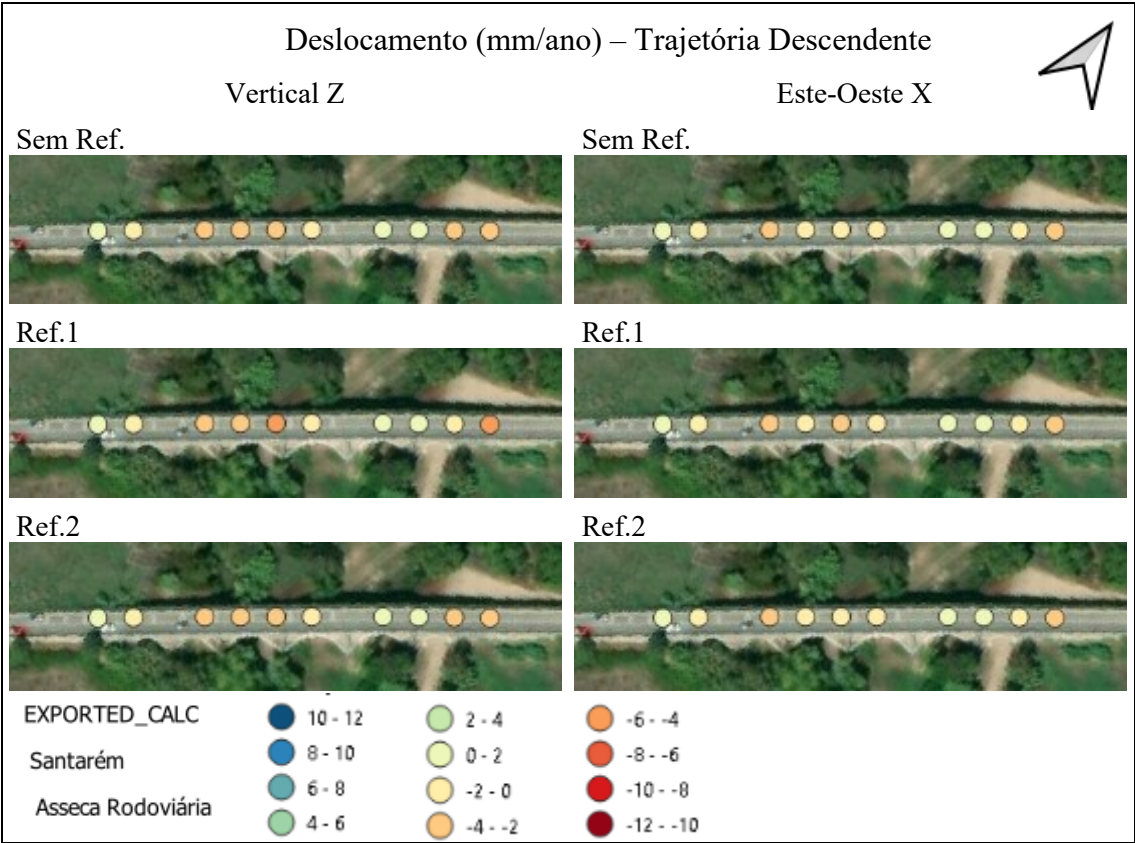


Figura 5.66 - Resultados velocidade de deslocamento anual para várias referências, na trajetória descendente, ponte da Asseca

De acordo com estes resultados apresentados, na Figura 5.64 verificou-se uma mudança significativa de valores da variação longitudinal com uso de referências. Quanto aos valores verticais por trajetória múltipla, notou-se uma taxa negativa para o arco 4 e uma taxa positiva para o arco 5, contudo sem que nenhum destes deslocamentos seja muito expressivo. Em valores longitudinais para trajetória múltipla observou-se uma taxa de deslocamento negativa. Em trajetória única para deslocamentos verticais não é possível observar a mesma tendência para os arcos em questão, tanto em ascendente (Figura 5.65) como descendente (Figura 5.66). Os deslocamentos este-oeste, em trajetória ascendente mostraram-se positivos e em trajetória descendente rondaram o valor nulo.

Todavia, estes resultados de velocidade anual, não podem ser tão diretamente comparados devido a diferenças na resolução temporal. Da mesma forma que para a ponte D. Luís, em vez de analisar os resultados apresentados na Figura 5.64, Figura 5.65 e Figura 5.66, será mais interessante fazer uma comparação da série temporal dando especial atenção à proximidade das datas entre os cálculos das aquisições e as medições realizadas *in situ*, conforme o que se passa a apresentar de seguida.

Tanto para jusante (Figura 5.67) como para montante (Figura 5.68) os dados *in situ* mostram que há um deslocamento vertical negativo de setembro de 2022 a fevereiro de 2023, estabilizando até abril desse mesmo ano. Verifica-se que para o arco 4 os valores estimados com a referência 1 seguem uma tendência mais distante. Apesar disso e tendo em conta apenas 2 momentos de comparação, 1 de março de 2023 e 4 de abril de 2023, as estimativas mostram valores mais próximos para a referência 2.

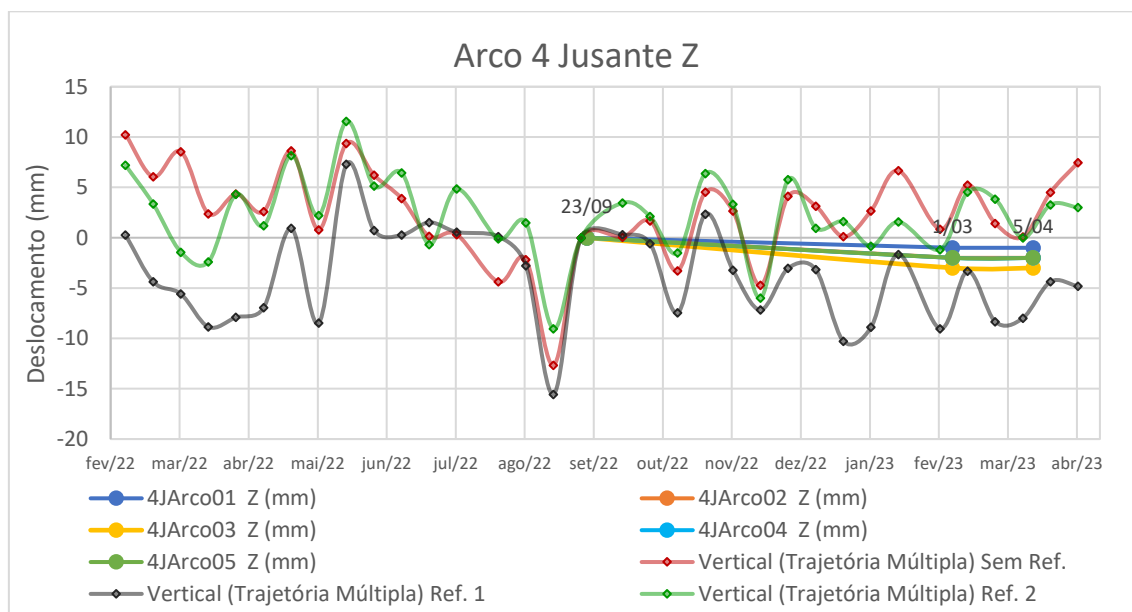


Figura 5.67 - Comparação arco 4 a jusante, deslocamento vertical, trajetória múltipla.

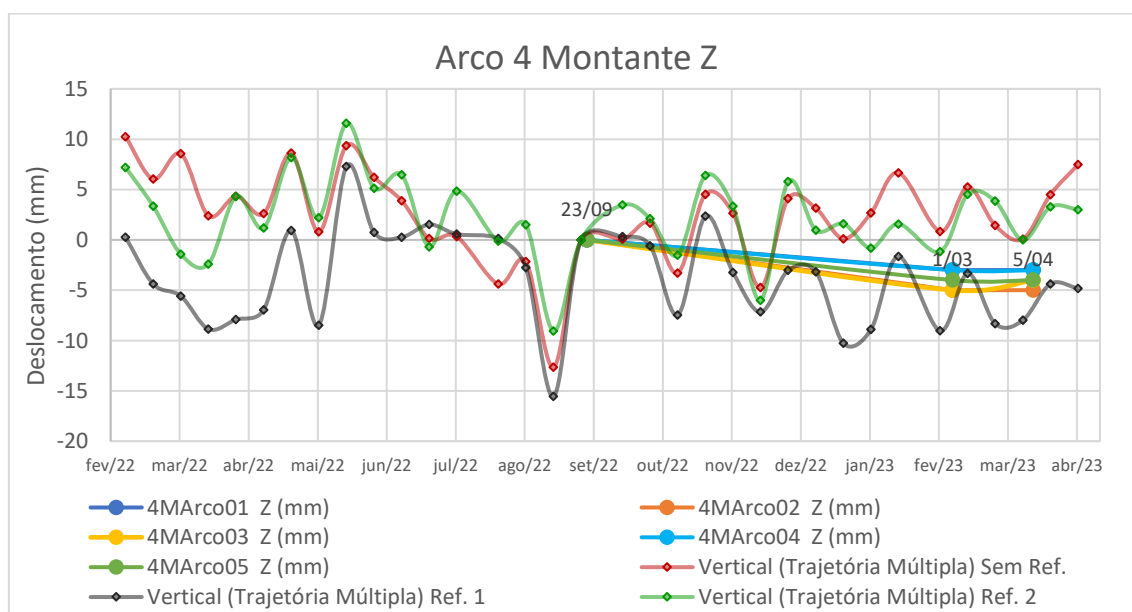


Figura 5.68 - Comparação arco 4 a montante, deslocamento vertical, trajetória múltipla.

Tanto para jusante (Figura 5.69) como para montante (Figura 5.70) os dados *in situ* mostram uma movimentação longitudinal positiva no sentido santarém de setembro a fevereiro de 2023, estabilizando até abril desse mesmo ano. Quanto às estimativas dos deslocamentos na longitude (sentido Santarém), verificam-se valores na mesma magnitude para o não uso de referência e a referência 2.

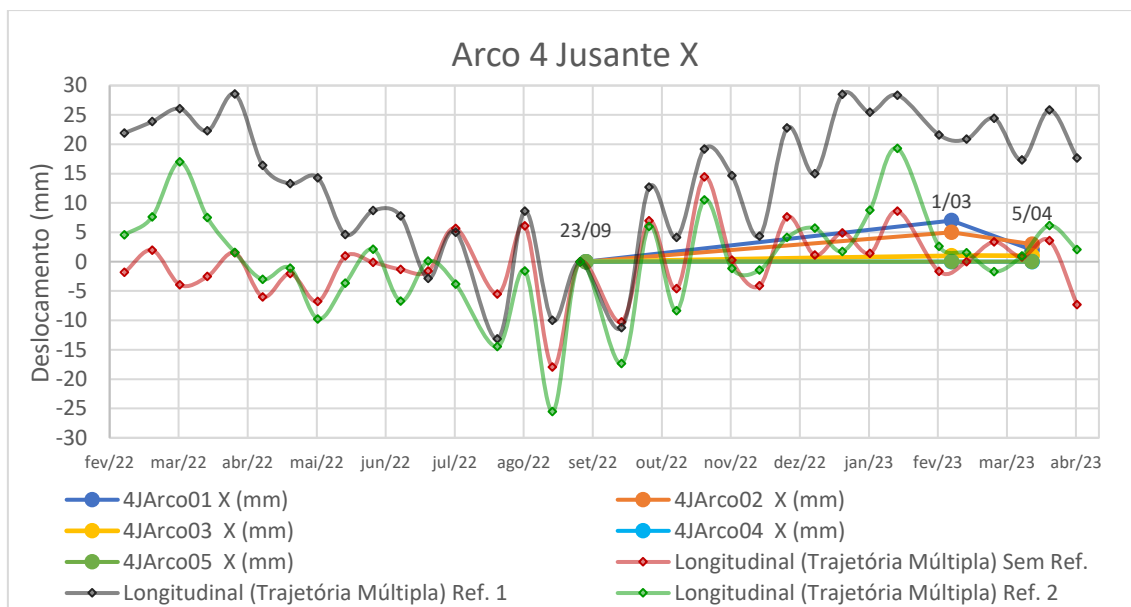


Figura 5.69 - Comparação arco 4 a jusante, deslocamento longitudinal, trajetória múltipla.

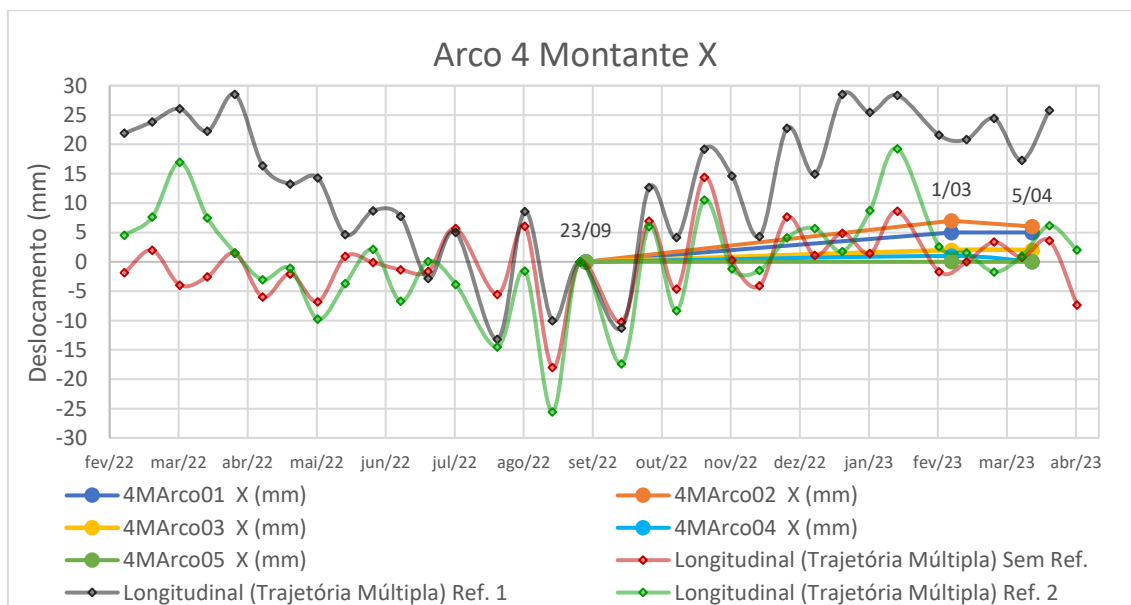


Figura 5.70- Comparação arco 4 a montante, deslocamento longitudinal, trajetória múltipla.

Para jusante (Figura 5.71) os dados *in situ* mostram que há um deslocamento vertical negativo de setembro a fevereiro de 2023, com recuperação até abril desse mesmo ano. Para montante (Figura 5.72) a tendência é igual, à parte o alvo 07 e 08 que se encontram sobre o pilar e não sobre o arco. No arco 5, a referência 1 é quem origina tendências e estimativas mais próximas do medido *in situ*.

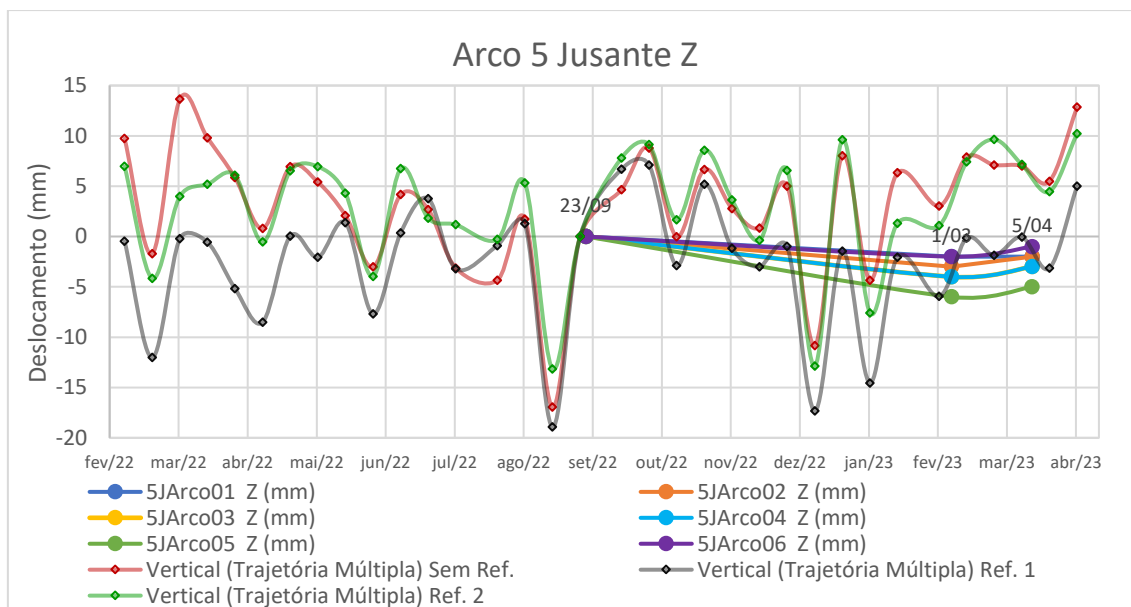


Figura 5.71- Comparação arco 5 a jusante, deslocamento vertical, trajetória múltipla.

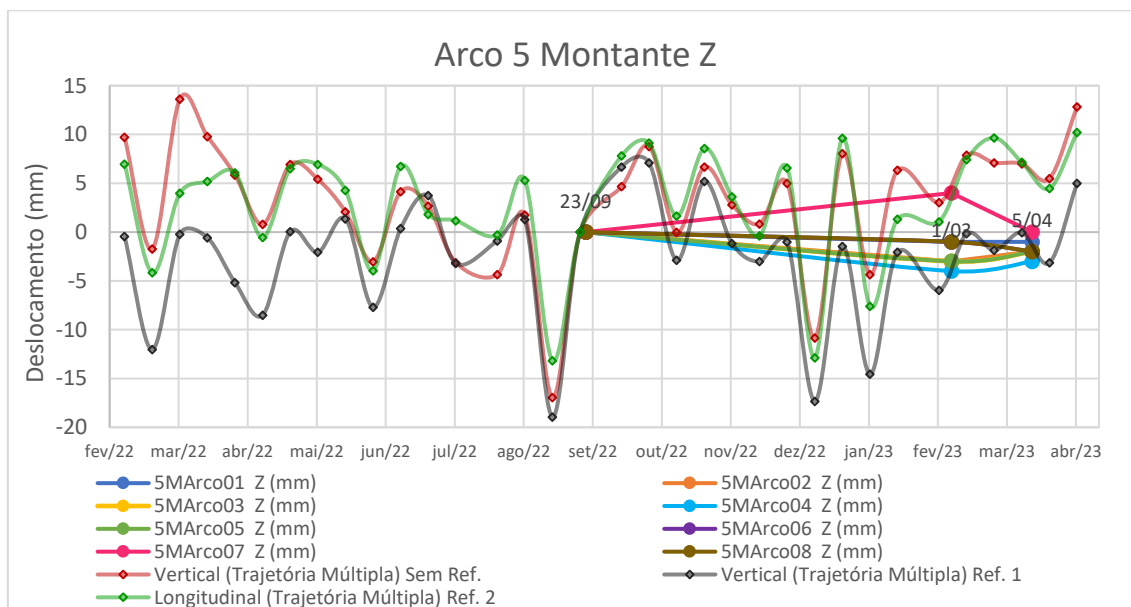


Figura 5.72 - Comparação arco 5 a montante, deslocamento vertical, trajetória múltipla.

Tanto para jusante (Figura 5.73) como para montante (Figura 5.74) os dados *in situ* mostram uma movimentação positiva sentido Santarém de setembro a fevereiro de 2023, estabilizando até abril desse mesmo ano com a exceção do alvo 07 e 08 sobre o pilar.

Já quanto aos deslocamentos na longitudinal do arco 5 as tendências correspondem com as estimativas da referência 1 mas é a referência 2 e o não uso que obtém valores mais próximos dos medidos *in situ*.

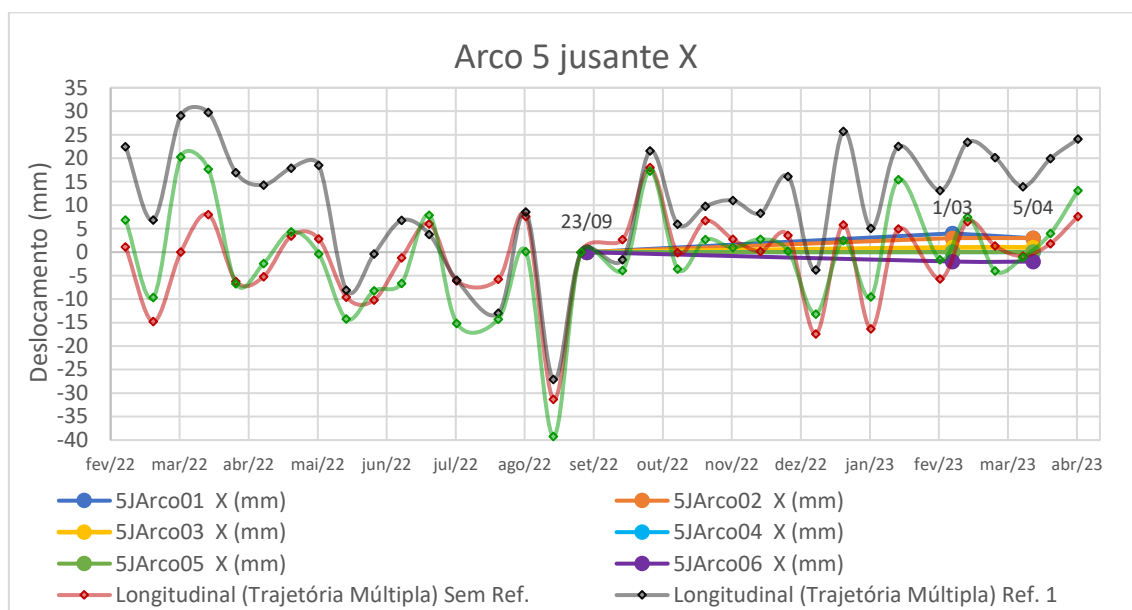


Figura 5.73 - Comparação arco 5 a jusante, deslocamento longitudinal, trajetória múltipla.

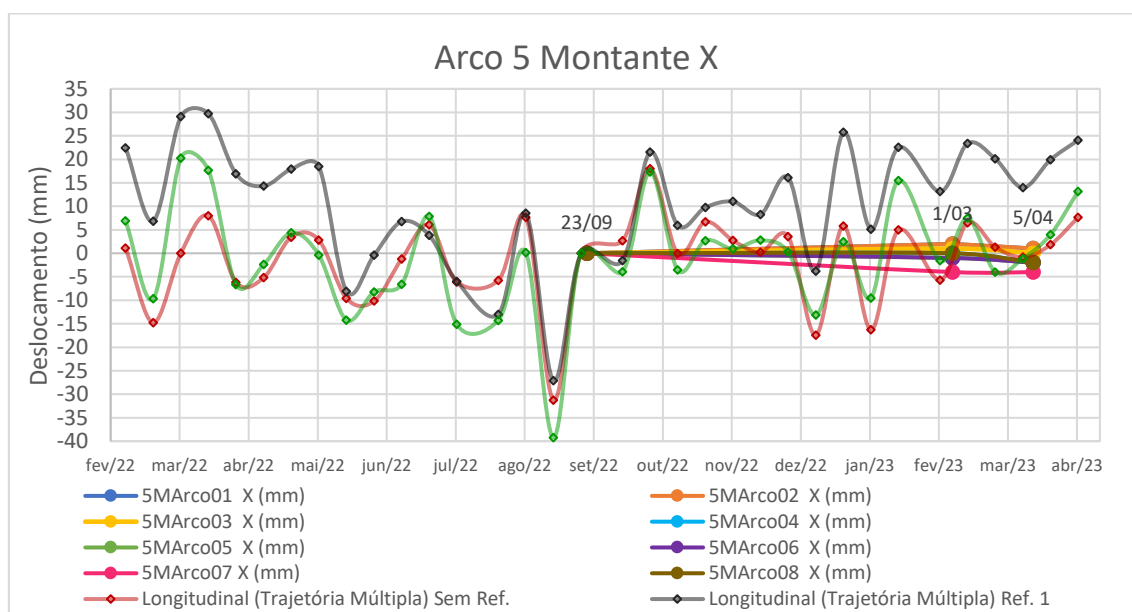


Figura 5.74 -- Comparação arco 5 a montante, deslocamento longitudinal, trajetória múltipla.

Na Figura 5.75 estão representadas as variações em todos os arcos comparados, isto é, médias das medições verticais por arco com estimativas verticais e médias das medições longitudinais por arco com estimativas longitudinais. Nesta análise foram apenas considerados os valores absolutos relativos às datas das aquisições mais próximas da data das medições *in situ*. Observando a figura e sendo a mediana a tendência central, não se verificam valores atípicos indesejados e a distribuição não tem simetria igual para todos os grupos de dados. Com a Ref. 1, os resultados verticais aproximam-se, mas aumenta consideravelmente a diferença nos longitudinais, sendo este comportamento contrário ao que foi registado para a Ref. 1 na Ponte D. Luís. Apesar de a Ref. 1 apresentar menos variabilidade na componente vertical, verifica-se uma assimetria negativa com uma tendência central superior quando comparado com a Ref. 2 (sobre a ponte D. Luís). Nessa mesma referência verifica-se uma aproximação às medições verticais e longitudinais *in situ* quando comparado com as restantes. Outro comportamento contrário à Ponte D. Luís é o facto de os dados longitudinais terem menor variabilidade que os verticais na Ref. 2. Geralmente foi verificada uma menor amplitude na diferença entre estimados e medidos *in situ* que na Ponte D. Luís. É também possível observar que em 50% das comparações, a variação é entre 3 e 6mm na componente vertical, e entre 2 e 3mm na componente longitudinal, quando usado a Ref. 2. Assim, recorrendo à Ref. 2, para 75% das comparações na componente vertical, a variação é no máximo de 6mm, e na componente longitudinal da ponte a variação máxima é de 3mm.

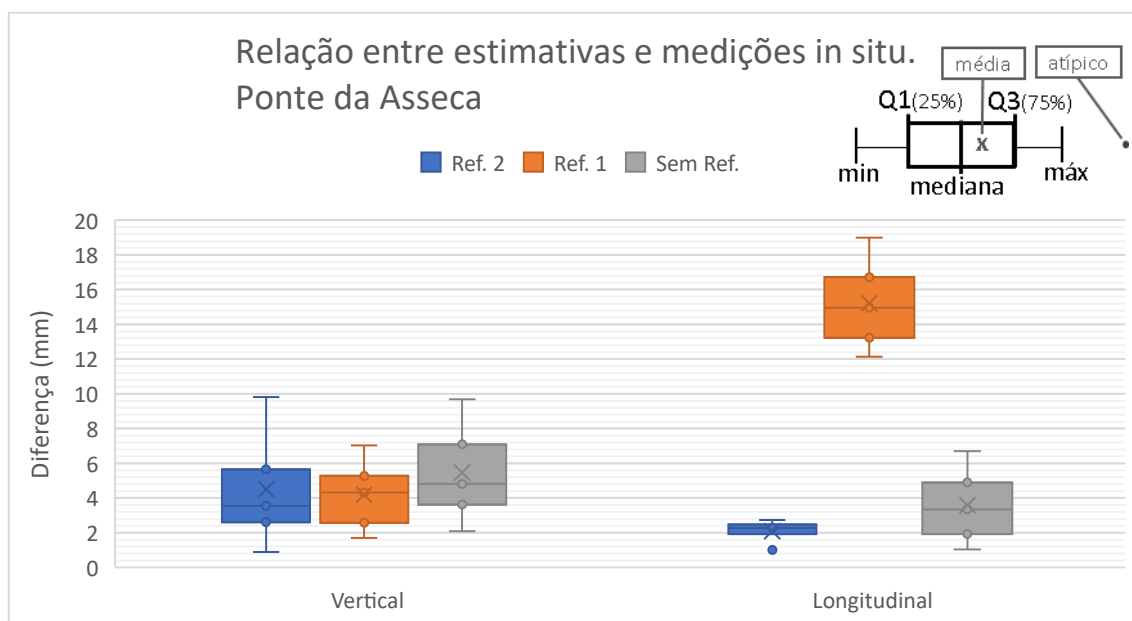


Figura 5.75 - Distribuição das diferenças entre estimativas e medições *in situ* para a ponte da Asseca

Não foram detetadas tantas inconsistências com a topografia como na Ponte D. Luís, sendo que a elevação de pontos correspondentes entre trajetórias varia menos. Relembra-se, no entanto que o dia de referência não é igual entre as estimativas e as medições *in situ* e que uma incorreta correspondência da data e hora pode provocar alterações em todo o gráfico (com valores superiores ou inferiores), com consequência na comparação dos valores que podem ficar mais ou menos ajustados..

Na trajetória descendente, que melhor definiria o deslocamento longitudinal na ponte D.Luís, os PS demonstram um desvio padrão em LOS na análise StaMPS menos consistente que em trajetória em ascendente, que é a trajetória menos sensível aos deslocamentos longitudinais nesta ponte. Os melhores resultados na longitude podem estar associados ao facto da trajetória que melhor define os deslocamentos longitudinais ser a ascendente, devido à orientação da ponte Asseca, quase perpendicular à órbita. Sendo que esta também é a trajetória com PS em LOS cuja análise StaMPS estima menores desvios padrões, como apresentado na Figura 5.76.

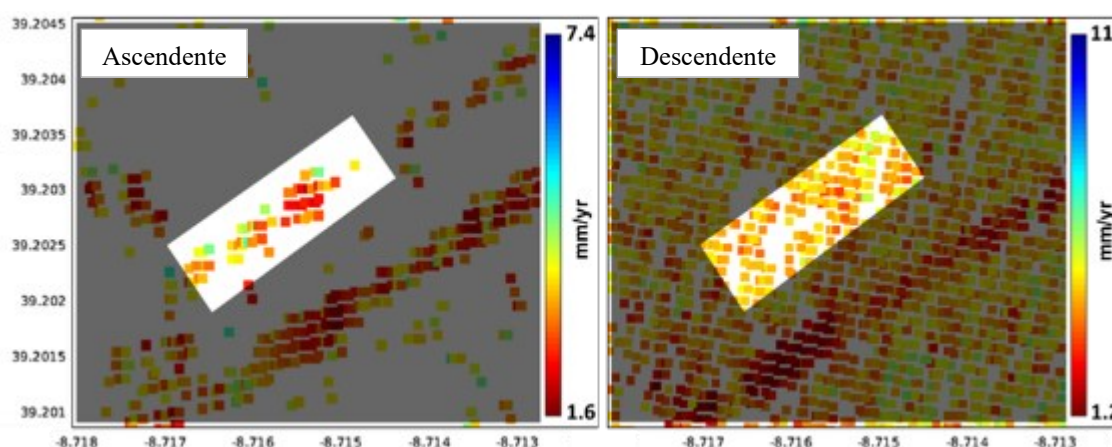


Figura 5.76 - Desvio padrão em LOS para ambas as trajetórias sobre a ponte da Asseca rodoviária (caso de estudo considerado) e sobre a ponte da Asseca ferroviária (próxima da anterior).

Com apenas 2 momentos a comparar e a mais de 5 km de ambas as referências, não é possível afirmar ou negar com certezas que as estimativas simulam as movimentações da ponte da Asseca. Da mesma forma não podemos afirmar que há melhor relação nos deslocamentos longitudinais como causa dos materiais que constituem as pontes estudadas. Mesmo assim é importante referir que as diferenças entre os valores estimados e os valores medidos *in situ* variam no máximo 6 mm para 75% dos valores na vertical e 2 mm para a longitudinal, com Ref. 2. Importa ainda dizer que estes valores estão dentro do intervalo referido para medições individuais absolutas (Nettis et al., 2023; Tre Altamira, n.d.).

5.7.3. Outras considerações sobre os Resultados

Os picos de deformação nas series temporais de vários difusores persistentes devem ser corrigidos (ex: por suavização) pois podem levar a efeitos indesejados e interpretações erradas, mas isso pode provocar uma subestimação de picos de deformação no verão e no inverno e por isso não foi realizada neste estudo.

Nas imagens radar usadas é possível observar que, pela amplitude, as estruturas em estudo não se impõem aos restantes elementos. Na Figura 5.77 destaca-se a zona urbana e parte da ponte D. Luís, mas não o viaduto. Na Figura 5.78 destaca-se a Ponte da Asseca ferroviária, que está próxima, mas não a rodoviária usada neste trabalho.

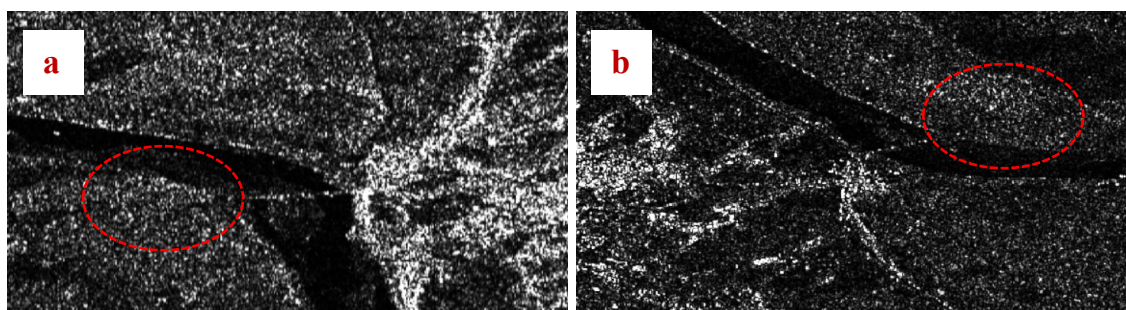


Figura 5.77 – Imagem radar da Ponte D. Luís, a – trajetória descendente, b – trajetória ascendente.

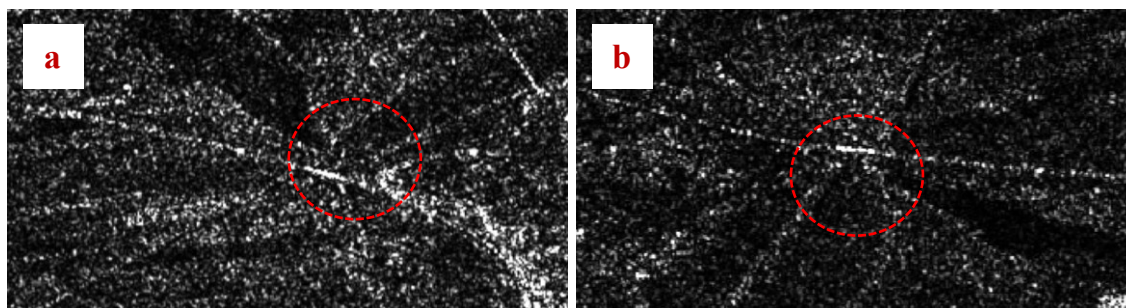


Figura 5.78 – Imagem radar da Ponte da Asseca, a – trajetória descendente, b – trajetória ascendente.

Atualmente é possível fazer a verificação visual da amplitude no *Copernicus Browser* e isso pode fazer a diferença na escolha das aquisições a selecionar, ao contrário do antigo *Copernicus Open Hub* usado no decorrer deste trabalho.

A partir da Tabela 5.1 e da Tabela 5.2 observamos as imagens para ascendente e descendente, respetivamente. Verificam-se coerências mais fracas após janeiro de 2023, Tendo-se posteriormente constatado uma relação desse facto com as medições conseguidas. Com efeito, na Figura 5.79 está representada a coerência apenas dos pares interferométricos ascendentes, descendentes e média, correspondentes às datas das medições *in situ* na ponte D. Luís (ilustradas no gráfico).

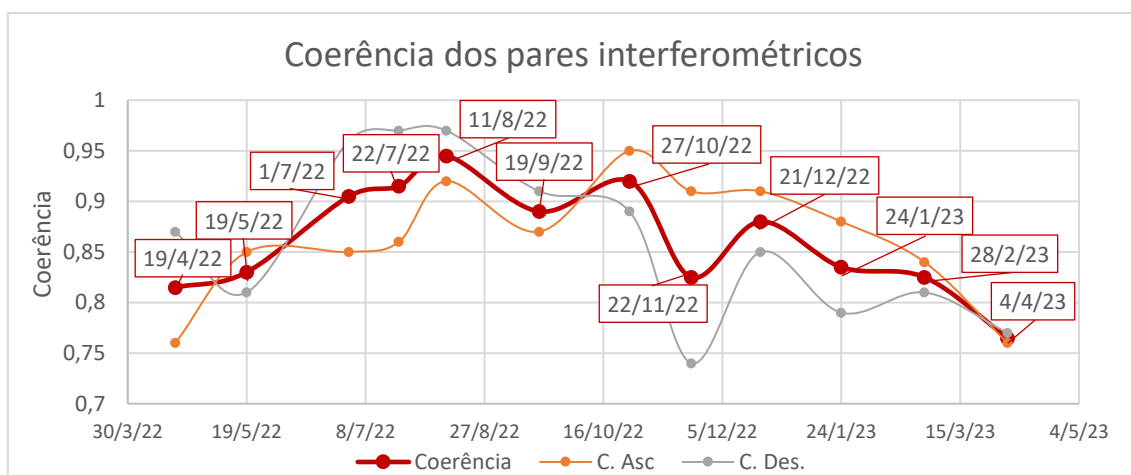


Figura 5.79 - Coerência dos pares interferométricos e datas correspondentes às medições *in situ* da ponte D. Luís

Na Figura 5.80, para cada data de medição *in situ* são apresentadas as variações entre essas mesmas medições verticais no topo dos pilares e respectivas estimativas. Na maior parte das datas de medições *in situ*, à exceção da data 19/04/22, verifica-se que, para Sem Ref. e sobretudo a Ref. 2, a coerência dos pares interferométricos de data correspondente, está relacionada com a variação dos valores dessas mesmas comparações. Ou seja, os resultados sugerem que, quanto melhor for a coerência do par interferométrico, menor será a variação entre o valor de deslocamento estimado e o efetivamente medido *in situ*.

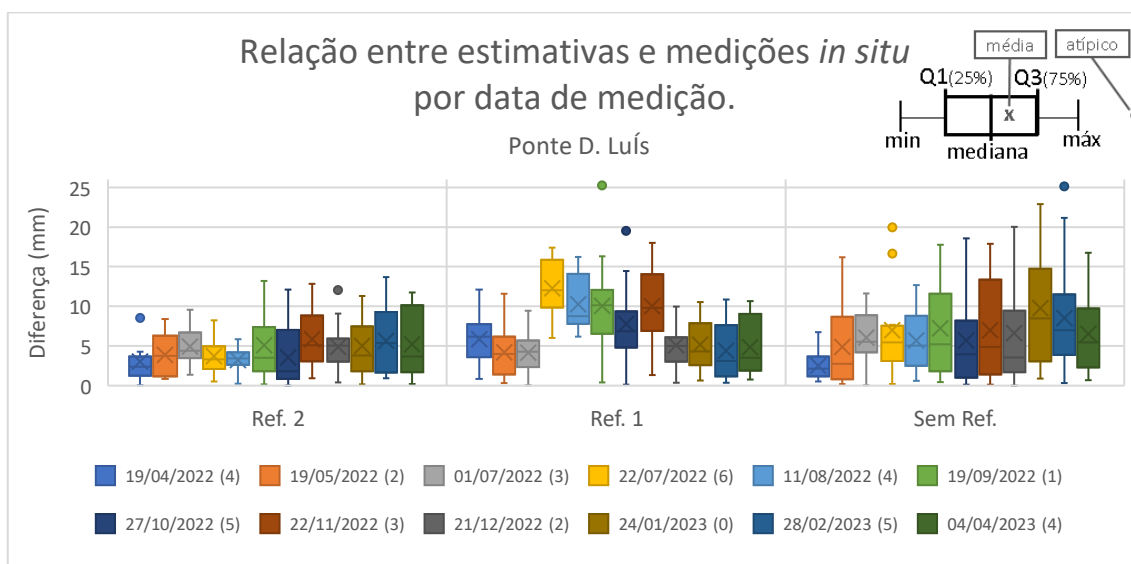


Figura 5.80 - Distribuição das diferenças entre estimativas verticais no topo e medições *in situ* para a ponte D. Luís

Neste gráfico, à frente de cada data de medição *in situ* segue entre parênteses o número de dias de diferença à média entre aquisições ascendente e descendentes. Isso é particularmente importante pois mostra que não apenas é suficiente que as imagens sejam próximas à data das medições (em caso de comparação), mas também é importante que os pares interferométricos tenham boa coerência.

6. CONCLUSÃO

As imagens que estão a ser periodicamente recolhidas por satélites de alta resolução espacial nos últimos anos podem ser processadas de forma a gerar alertas sobre movimentações relevantes de algumas estruturas (Nettis et al., 2023; Qin et al., 2019). Neste contexto, esta dissertação apresenta a aplicação de uma metodologia InSAR para cálculo de deslocamentos estruturais, com base em imagens recolhidas pelo Sentinel1A. O presente trabalho tem o intuito de testar o potencial do uso de dados InSAR como instrumento de monitorização remota de obras de arte. A metodologia desenvolvida conjuga a utilização de algumas aplicações informáticas existentes, como SIG, SNAP, StaMPS, para apoio ao processamento da grande quantidade de informação manipulada. A implementação do conjunto de procedimentos descritos no capítulo relativo à metodologia (capítulo 3), poderá tornar possível uma monitorização remota de estruturas em grandes áreas do território, que permitirá estimar deslocamentos ao longo do tempo sem a necessidade de deslocação ao local, o que será de grande utilidade para o acompanhamento de diversas estruturas envelhecidas. Métodos mais convencionais de inspeção com medições em pontes proporcionam informações limitadas e pontuais, normalmente reféns do tempo e poder laboral. A incorporação de metodologias InSAR em sistemas de gestão de pontes possibilitará a geração de alertas automáticos, podendo evitar possíveis acidentes futuros e trazendo assim uma vantagem relevante no âmbito da garantia da segurança estrutural.

O potencial dos dados InSAR para utilização no âmbito da engenharia civil será tanto maior quanto a fiabilidade dos resultados que se conseguirem obter, o que estará sempre vinculado à resolução temporal (tempo entre imagens) e espacial (tamanho do pixel) das imagens recolhidas por satélite.

A cadeia de processos apresentada permite uma continua monitorização de infraestruturas críticas, como as pontes, através da interferometria por imagens radar satélite e assim constitui um importante complemento aos sistemas de gestão de obras de arte. Algumas dezenas de estudos adaptados a pontes demonstram que o uso das imagens da missão Sentinel 1 ainda é escasso, mas com crescente implementação nas áreas urbanas.

Dentro da tecnologia InSAR foi optado por uma abordagem MTInSAR, mais especificamente PSI através do software StaMPS. As imagens radar usadas provém do programa Copernicus, capturadas pelo satélite Sentinel 1A.

No primeiro caso de estudo, um Quebra-Mar na foz do Rio Douro, foram usadas um total de 18 imagens em trajetória ascendente e 18 em descendente. A AOI tem cerca de 93 km² e foram identificados cerca de 541 mil pixels PS em ascendente e cerca de 528 mil pixels PS em descendente. Não foi selecionada uma área de referência, tornando a média de toda a área como referência.

Para as duas pontes de Santarém consideradas como casos de estudo, foram usadas 35 imagens em trajetória ascendente e 35 em descendente. A AOI tem cerca de 140km², e foram identificados cerca 300 mil pixels PS em ascendente e cerca de 268 mil pixels PS em descendente. Estes pixels identificados foram ajustados para mais duas referências além dos valores de base: Ref. 1 com base na seleção de uma área com menor probabilidade de deslocamentos anuais e Ref. 2 assente numa área da ponte com menores deslocamentos anuais. Os resultados a partir da Ref. 2 são geralmente parecidos ao Sem Ref., embora mais próximos às medições *in situ*, sobretudo para o pilar 9, 14, 19, 34, 45 na vertical e todos na longitudinal é exceção do 36 e 41. Por esses motivos, essa foi considerada a melhor referência e passou a ser usada na comparação mais analítica aos dados *in situ*.

Com a metodologia apresentada foram calculados deslocamentos para os casos de estudo considerados - quebra-mar e duas pontes - em períodos temporais de janeiro de 2021 a junho 2022 e março de 2022 a abril 2023, respetivamente. Esses resultados foram comparados com os registados por tecnologias tradicionais (ortofotomapas e topografia) para validação da metodologia apresentada.

A aplicação no quebra-mar foi sobretudo útil como trabalho exploratório de aprendizagem. Comparar valores da velocidade de deslocamento anual numa estrutura em que cada pixel contém vários blocos que se movem aleatoriamente pode induzir erros, pelo que os resultados não foram muito conclusivos. Contudo, esse caso de estudo permite retirar algumas lições, como a importância da avaliação da série temporal e do uso de um correto MDE.

Nas aplicações às pontes já foi possível obter uma melhor correspondência entre os dados estimados e os dados resultantes de medições por técnicas tradicionais. Na comparação dos deslocamentos verticais, foram estimados deslocamentos que diferem das medições tradicionais num máximo de 4 mm para 75% dos valores nos pilares da Ponte D. Luís cujo respetivos PS foram verificados. Na Ponte da Asseca essa diferença máxima foi de 6 mm. Constatou-se que em pontos da estrutura em que o PS tem uma correta topografia,

a metodologia consegue fazer uma estimativa dos deslocamentos verticais próxima da conseguida com os meios topográficos tradicionais, mas sobretudo corresponder na tendência de deslocamentos ao longo do tempo da análise.

A correspondência entre deslocamentos longitudinais, com diferenças máximas de 18 mm para 75% dos casos, ficou aquém do esperado na ponte de D. Luís, mas era expectável ser mais difícil, o mesmo foi concluído em (Schlögl et al., 2021). Parte dessa dificuldade está no baixo ângulo de incidência que limita a precisão da conversão de LOS para longitudinal especialmente em direções Norte-Sul paralelas à órbita (Qin et al., 2017). De facto, na ponte da D. Luís os valores longitudinais não estão tão categoricamente relacionados com medições *in situ*, o que vai ao encontro desta ideia. Por outro lado, a Ponte da Asseca apresentou resultados satisfatórios nas medições longitudinais. Nessa ponte, foram conseguidos deslocamentos longitudinais que diferem das medições tradicionais num máximo de 3 mm em 75% das comparações e a razão poderá estar na melhor reflexão para trajetória ascendente, a mais sensível a tais deslocamentos tendo em conta a orientação da estrutura.

Como referido em 5.7.1, as medições *in situ* por meios tradicionais na Ponte D. Luís tem uma tolerância de 6mm, pelo que pode verificar mais pilares do que aqueles que foram tidos como corretos. No entanto a diferença máxima encontra-se abaixo dessa tolerância para os pilares verificados. Para a ponte da Asseca, verifica-se que a variação máxima é de 6 mm entre as estimativas verticais e as medições *in situ*, que excede a tolerância de 3mm associada às medições *in situ* nessa ponte, referido em 5.7.2, no entanto, a variação máxima longitudinal encontra-se dentro dessa mesma tolerância.

Assim, os resultados obtidos são promissores e a técnica é mostrou-se adequada para estimativa de deslocamentos verticais desconhecidos. Para a referência escolhida (Ref. 2), na ponte D. Luis, 75% dos valores verticais estimados diferem num máximo de 4 mm dos valores correspondentes medidos por técnicas tradicionais, e para a ponte da Asseca essa diferença máxima é de 6mm alcançando assim precisões subcentimétricas. Quanto a variações nos valores longitudinais, 75% destas são no máximo de 3 mm na ponte da Asseca e 18 mm para a Ponte D. Luis, demonstrando a necessidade de mais estudos nesta questão.

De qualquer forma, o uso das tecnologias InSAR para monitorização e inspeção de estruturas existentes está numa fase inicial de desenvolvimento e serão ainda desejáveis mais alguns progressos, que facilitem a sua aplicação e melhorem a fiabilidade dos

resultados. Todavia, a técnica revela já interesse, sobretudo para gerar alertas de movimentações mais significativas nas partes de estruturas que forem observáveis do espaço, o que pode ter grande utilidade para recomendar inspeções especiais por meios tradicionais em algumas Obras de Arte. Para além disso, é de esperar que esta metodologia venha ainda a ter várias melhorias futuras, eventualmente resultantes do aumento da resolução das imagens dos satélites e da incorporação de IA, podendo vir a tornar-se ainda mais promissora para a gestão de obras de arte como pontes.

As aplicações da metodologia apresentada aos casos de estudo permitiram tirar ainda outras conclusões complementares que poderão ter utilidade para aplicações futuras. Em seguida será feita referência a algumas das limitações ao longo da cadeia de processos que poderão estar na origem das principais diferenças identificadas entre os valores estimados e os valores esperados. Posteriormente, serão também indicadas outras medidas que poderão contribuir para otimizar a fiabilidade dos resultados de metodologias de idêntica natureza, como recomendação para aplicações noutras Obras de Arte. A terminar serão sumariados os principais desenvolvimentos previstos para o futuro.

6.1. Causas para Eventuais limitações de algumas das estimativas obtidas

São muitos os fatores influenciadores das estimativas dos deslocamentos dos vários pontos ao longo do tempo e, por isso mesmo, muitos os erros que de alguma forma podem afetar os resultados. As estimativas podem ser afetadas em série (por consequência) e/ou paralelo, ao longo dos vários passos da cadeia dos processos, conforme se passa a referir.

O objeto e as escolhas de dados a processar

As dimensões das pontes neste trabalho são menores que as geralmente estudadas em artigos sobre esta tecnologia. Pontes maiores exibem melhores reflexões do sinal e isso torna-se mais fácil identificar pixels PS coerentes entre si. Todavia, as pontes de menores dimensões distribuídas pelo território até poderão carecer mais deste tipo de monitorização, uma vez que, em geral, as maiores até já poderão ser objeto de campanhas de inspeção mais rotineiras.

Todas as imagens em trajetória ascendente foram adquiridas pelas 18:27 horas, e todas as descendentes pelas 6:43 horas. Embora possamos considerar as pontes como estruturas

responsáveis por reflexão persistente ao longo do tempo, o mesmo não podemos fazer com o tráfego variável nessas pontes. Uma simples pesquisa pelos dados do tráfego no Google Maps classifica como *Rápido* o tráfego típico nas duas pontes para todos os dias da semana. É sensato pensar que, pela proximidade às horas de ponta nas ligações próximas às pontes, o número de veículos a atravessar a ponte é maior podendo causar inconstâncias nas reflexões.

O facto de atualmente estar em orbita apenas 1 satélite radar do programa Copernicus, o Sentinel 1A, causa receio na continuidade de uma produção estável e livre de adquirir de imagens radar. As análises com base em dados mais recentes ficam limitadas pelo uso de imagens em orbitas apenas deste satélite. Por outro lado, com os satélites Sentinel a lançar - 1C e 1D - não se prevê que consigam melhores resoluções.

Pilha interferométrica

Não há necessariamente uma referência de valor mínimo da coerência dos pares interferométricos, mas como demonstrado na Figura 5.79 e 5.80, no ponto 5.7.3, os valores das coerências estão associados às variações entre estimativas e medições in situ por data. Isto indicou, para este trabalho que, quanto maior a coerência de um certo par interferométrico, menor era a diferença entre as estimativas e medições in situ referentes à data desse mesmo par.

As limitações mais importantes aquando a formação das pilhas interferométricas prenderam-se com o uso dos MDE. Com o estudo no Quebra-Mar foi observado que a cadeia de processos, mais concretamente o *geocoding*, deixa de funcionar se o MDE tiver resolução superior ao dobro da resolução do pixel. Melhores MDE gratuitos que os atuais para território nacional são importantes para este tipo de abordagem, especialmente porque muitas pontes não estão incluídas, por dimensão pequena ou idade recente. É sensato que a correção da geolocalização com recurso à topografia deva ser aplicada antes de processos que envolvam variáveis espaciais, como a análise StaMPS, que está repleta de estimativas estatísticas espaciais. É discutível pensar que é um mal menor apenas corrigir antes do pós-processamento, quando o ideal seria verificar e corrigir se necessário, para as estruturas de interesse, aquando a injeção de candidatos para a análise StaMPS. Nesta problemática, para o estudo das pontes em Santarém foi usado um MDE com ambas as estruturas de interesse. Contudo, mais estudos são necessários no campo

da correção topográfica antes da análise StaMPS, isto porque foi observado, especialmente na área de estudo do Quebra-Mar, que em estruturas mais altas e isoladas, mesmo com um MDE correto, os pontos PS ficam mal posicionados.

Análise StaMPS

Com a análise padrão do StaMPS referente aos resultados dos operadores da formação da pilha interferométrica onde se usou as imagens radar escolhidas, o output não mostrou dados para as pontes que se queriam estudar. Não podemos considerar os parâmetros padrão uma limitação, mas na diferença entre ter dados e não ter, devemos considerar uma melhor adaptabilidade desses parâmetros. Foi optado sobretudo por descurar filtros de grelha relativos a coerência espacial, e dessa forma conseguir mostrar mais pontos para poderem ser analisados.

Um fator que não pode ser ignorado é a escolha da referência considerada, a área do pilar 32 da ponte D. Luís, sendo que o pilar 28 podia ser escolhido como referência por apresentar menores deslocamentos horizontais. Usar áreas com deslocamentos como referências é limitante da fiabilidade dos valores uma vez que todos os valores da AOI serão relativos à média nessa área. Também na questão das referências, importa saber que estas, sendo corretas, apresentam resultados nos PS mais fiáveis abaixo dos 5km de distância das mesmas (Nettis et al., 2023).

Pós-processamento

Os pontos PS estão em diferentes posições para cada órbita devido à geometria de observação e não podem ser comparados inequivocamente em relação à sua “verdadeira” posição, especialmente em casos de estruturas mais complexas como pontes.

Os alvos das medições *in situ* estão localizados por baixo dos arcos para a ponte Asseca e nos pilares sob o tabuleiro no caso da ponte D. Luís. Todavia, as estimativas são sobretudo feitas com base no objeto dominante dentro da célula de resolução, que pela geometria da observação do satélite podemos assumir ser a superfície. Por esta razão, é de esperar que daí também advenham pequenas diferenças entre os valores comparados.

Para combinação de trajetórias um fator limitante poderá ser a distância em tempo na combinação entre dois pares interferométricos. Apesar do não uso de interpolação

temporal e da possibilidade de melhor combinação entre datas, foram encontrados resultados satisfatórios. *Buffers* que agregam PS de forma direta como representantes de uma parte da estrutura podem descorrelacionar resultados.

Algumas das formas de atestar a fiabilidade de estimativas InSAR são redes de estações como a *The NOAA CORS Network* (NCN) e a *EUREF Permanent Network* (EPN), outra forma é redes de nivelamento como a Rede de Nivelamento Geométrico de Alta Precisão (RNGAP). Dois problemas, as estações na EPN e NCN são escassas e o acesso ao histórico das mais de 4500 marcas na RNGAP não é público. Isso torna difícil calibrar as estimativas.

Outro fator que não pode ser ignorado é a tolerância associada às próprias medições por meios tradicionais. A tolerância associada às medições na ponte D. Luís era de 6mm e a tolerância associada ao aparelho topográfico usado para fazer as medições na Ponte da Asseca é de 3mm.

6.2. Recomendações para futuras aplicações

Com base nas experiências e nas aprendizagens resultantes do trabalho desenvolvido, serão seguidamente sumarizadas algumas recomendações para aumentar a confiança dos resultados em aplicações futuras. Essas recomendações serão apresentadas pela ordem em que são consideradas na metodologia, tendo em conta o respetivo processo associado.

O objeto e as escolhas de dados a processar

Na captação, como apontado no capítulo 3 dos conceitos, devemos ter cuidado de observar se a nossa área de estudo não está sujeita sobretudo a distorções geométricas, como *foreshortening*, *lay-over*, *speckle*, sombra e reflexão especular dupla. Parte dessa observação também deve ter em conta se é possível observar se a estrutura em estudo se destaca.

Imagens com melhor resolução, que distinguem melhor as estruturas estudadas, são uma solução que melhora todos os aspetos da cadeia de processos. Pelo que a adoção de outras plataformas, eventualmente pagas, com melhores resoluções, poderá tornar este tipo de análises ainda mais promissoras.

Uma solução interessante é o uso de refletores artificiais, tanto passivos como ativos. A sua implementação certifica que se tornam o objeto dominante na célula de resolução, possibilitando a obtenção de deslocamentos do elemento a que estão conectados. Estes refletores devem ser instalados em LOS nos elementos das pontes que não produzem pixels PS, ou que não sejam certos como objeto dominante refletor. Importa ainda referir que o conhecimento da referenciação da estrutura e dos seus materiais, pode ainda ajudar a compreender o processo de deformação das pontes e posterior avaliação de riscos como parte de um sistema de gestão confiável com estimativas InSAR

Pilha interferométrica

A partir das coerências dos pares interferométricos é sensato optar por remover algumas das imagens com menores coerências, embora essa decisão não tenha sido tomada nas análises apresentadas para os casos de estudo. Por outro lado, as estimativas do erro do ângulo de vista melhoram com o aumento do número de interferogramas (A. Hooper et al., 2007). Também a análise da amplitude melhora com mais imagens (A. J. Hooper, 2006).

Nas escolhas para a interferometria, também deve ser escolhido um bom MDE, possivelmente com uma resolução o mais perto possível da resolução dos pixels das imagens radar, caso contrário poderá haver problemas com topografia e geolocalização e, conseqüentemente, todos os processos que envolvam fatores espaciais.

Análise StaMPS

Aplicar uma apropriada filtragem que reduza o ruído é importante para resultados mais viáveis. A razão de sinal-ruído da série temporal original, obtida por parâmetros padrão do StaMPS, foi diminuída após uma primeira análise e isso permitiu obter alguns PS sobre as estruturas em estudo, sobretudo na Ponte da Asseca, que previamente não existiam, o que torna ainda mais importante um pós-processamento nesses casos.

Para a monitorização de estruturas, para além de importar saber o deslocamento anual, pode importar conhecer as variações dos deslocamentos ao longo de

menores intervalos de tempo, de forma a perceber componentes sazonais ou periódicas e, sobretudo, movimentações pontuais mais bruscas.

Nesta etapa é também possível excluir os interferogramas que visualmente não estejam coerentes com os demais, como por exemplo apresentação de *fringes* nuns e noutros não.

É importante que, em vez dos valores serem relativos à média de toda a AOI, possamos calibrar com uma área conhecida como deslocação nula ao longo do tempo. No entanto, seria interessante estudar a introdução dos deslocamentos associado a uma referência escolhida objeto de medições *in situ* como calibração de AOI.

Pós-processamento

No pós-processamento, para conectar os deslocamentos em LOS às estruturas é necessário conhecer a área de estudo. Nesta etapa podem ocorrer erros sobretudo na identificação uma vez que os PS representam o vetor da soma dos sinais dos objetos dentro da resolução do pixel.

Dar importância a uma interpolação temporal tal como a espacial pode tornar os resultados mais detalhados e significativos. No caso de haver dados topográficos para atestar as estimativas de uma área em estudo, essa interpolação deverá ser feita.

Agregar PS em *buffers* para combinação de trajetórias deve ser mais cuidada e ter em conta variáveis que permitam deixar cair PS que não sejam representativos da parte da estrutura reamostrada.

Para ajudar na implementação de processos necessários à produção de resultados viáveis, recomenda-se a criação de ferramentas, como o Assistente de Análise desenvolvido, que permitam manipular e interpretar uma grande quantidade de dados.

6.3. Desenvolvimentos futuros

Há ainda um longo caminho a percorrer para efetivar o uso de InSAR em sistemas de gestão de pontes. A metodologia apresentada é de uso bastante pontual e difícil de

converter para análises contínuas sem fazer repetição da cadeia de processos. Para tal, algumas questões devem ser trabalhadas, tais como:

- Estudo de outro método de formação da pilha interferométrica, de forma a permitir análises continuadas.
- Automatização do processo de interferometria apresentado com gestão de diretórios, verificação e resolução de erros.

Sem um modelo digital de superfície (MDS) suficientemente pormenorizado que inclua a grande parte das estruturas e que esteja disponibilizado publicamente, resta criar um através de dados disponíveis. Com um melhor MDS, os processos de *geocoding* e remoção da fase topográfica devem ser executados de forma mais refinada e contextualizada a este tipo de estruturas.

Para facilitar a intenção de fazer análises PSI em grande quantidade de áreas de interesse, com o consequente aumento de dados, a extração de informação das várias análises do StaMPS deve ser dotada de verificação de erros. De qualquer das formas o objetivo será tornar o StaMPS uma opção na cadeia de processos, dando também lugar a outras técnicas.

Contudo, conseguindo valores em LOS, é importante facilitar a conversão, a visualização e comparação dos resultados à distância de um clique e para isso é necessário otimizar o *Assistente de Análise*. Nesse sentido, estão já as seguintes adições em curso:

- Otimizar a organização dos dados numa base de dados *PostgreSQL* e usar a variável data das aquisições ao longo dos processos em vez de número de aquisições.
- Permitir interpolação espacial com introdução de intervalos de altura para o caso de pontes com arcos e colunas.
- Dotar os processos de conversão dos valores em LOS em trajetória única e múltipla com mais metodologias e incluir cruzamento com variável do ângulo de incidência para cada pixel PS (ao contrário de um ângulo para toda a estrutura)
- Converter os valores verticais e longitudinais em dilatação térmica e deflexão de longo prazo, tal como em (Jung et al., 2019).
- Permitir a edição após processamento de pontos específicos.

- Implementar comparação automática no caso de resultados com dados medidos *in situ* com estatísticas que permitam visualização rápida.
- Implementar classes de deformação como indicador especificamente para pontes (Nettis et al., 2023) e outras obras de arte.

Para além disso, seria também interessante progredir no sentido de identificar todas as obras de arte a nível nacional e fazer as respetivas verificações de geolocalização, principais materiais e elementos constituintes, por cruzamento com outro tipo de dados tipo hiperespectral. O ideal seria conseguir aplicar abordagens DInSAR a todo o território nacional de forma periódica que, com o cruzamento com a identificação de infraestruturas permitisse publicar os resultados numa página Web interativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A

- Abo, H., Osawa, T., Sudi Parwata, I. N., Ge, P., Hiroki, S., & Ikemoto, R. (2023). Slope Displacement Monitoring with Corner Reflectors by PSInSAR Analysis Using Sentinel-1 SAR Data. *2023 8th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/APSAR58496.2023.10388604>
- Adam, N., Parizzi, A., Eineder, M., & Crosetto, M. (2009). Practical persistent scatterer processing validation in the course of the TerraFirma project. *Journal of Applied Geophysics*, 69(1), 59–65. <https://doi.org/10.1016/J.JAPPGEO.2009.07.002>
- Adey, B. T., Klatter, L., & Kong, J. S. (2010). *Overview of existing bridge management systems*. ETH Zurich.
- Alam, M. S., Kumar, D., & Chatterjee, R. S. (2022). Improving the capability of integrated DInSAR and PSI approach for better detection, monitoring, and analysis of land surface deformation in underground mining environment. *Geocarto International*, 37(12), 3607–3641.
- Alani, A. M., Tosti, F., Ciampoli, L. B., Gagliardi, V., & Benedetto, A. (2020). An integrated investigative approach in health monitoring of masonry arch bridges using GPR and InSAR technologies. *NDT & E International*, 115, 102288. <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2020.102288>
- Alaska Satellite Facility. (n.d.-a). *Basic SAR Concepts and Terminology*. Retrieved August 21, 2023, from <https://asf.alaska.edu/information/sar-information/sar-basics/>
- Alaska Satellite Facility. (n.d.-b). *How to Create an Interferogram Using ESA's Sentinel-1 Toolbox*. Alaska Satellite Facility. Retrieved April 11, 2024, from <https://asf.alaska.edu/how-to/data-recipes/create-an-interferogram-using-esas-sentinel-1-toolbox/>
- Alaska Satellite Facility. (n.d.). *Introduction to SAR*. Retrieved August 23, 2023, from https://hyp3-docs.asf.alaska.edu/guides/introduction_to_sar/
- Almeida, J. M. M. R. M. de O. (2003). *Gestão de Pontes Rodoviárias: um modelo aplicável em Portugal*.

- Almeida, J. O. (2013). *Sistema de gestão de pontes com base em custos de ciclo de vida*. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/72514>
- Almeida, J. O., Teixeira, P. F., & Delgado, R. M. (2015). Life cycle cost optimisation in highway concrete bridges management. *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(10), 1263–1276.
- Alonso, A. (2006). *Optimización conjunta de las políticas de mantenimiento y rehabilitación en puentes mediante algoritmos genéticos. Aplicación al sistema de gestión de puentes del estado de Chiapas (México)*.
- Anantrasirichai, N., Biggs, J., Albino, F., & Bull, D. (2019). The application of convolutional neural networks to detect slow, sustained deformation in InSAR time series. *Geophysical Research Letters*, 46(21), 11850–11858.
- Anantrasirichai, N., Biggs, J., Albino, F., Hill, P., & Bull, D. (2018). Application of machine learning to classification of volcanic deformation in routinely generated InSAR data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(8), 6592–6606.
- Anantrasirichai, N., Biggs, J., Kelevitz, K., Sadeghi, Z., Wright, T., Thompson, J., Achim, A. M., & Bull, D. (2020). Detecting ground deformation in the built environment using sparse satellite InSAR data with a convolutional neural network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(4), 2940–2950.
- Ansar, A. M. H., Din, A. H. M., Latip, A. S. A., & Reba, M. N. M. (2021). A SHORT REVIEW ON PERSISTENT SCATTERER INTERFEROMETRY TECHNIQUES FOR SURFACE DEFORMATION MONITORING. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVI. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W3-2021-23-2022>
- APAmbiente, nemus, & Procesl. (2003). *ESTUDO DE IMPACTE AMBIENTAL DAS OBRAS DE MELHORIA DE ACESSIBILIDADE E SEGURANÇA DA BARRA DO DOURO*. <https://siaia.apambiente.pt/AIADOC/AIA1103/RNT1103.pdf>
- Austroroads. (2002). Bridge Management Systems - The State of The Art. *Austroroads Publication*, No. AP-R198/02.

B

- Bakon, M., Perissin, D., Lazecky, M., & Papco, J. (2014). Infrastructure Non-linear Deformation Monitoring Via Satellite Radar Interferometry. *Procedia Technology*, 16, 294–300. <https://doi.org/10.1016/J.PROTCY.2014.10.095>
- Baptista, J. M. (1874). *Chorographia moderna do reino de Portugal: Vol. IV* (Issue vol. 1). Typographia da Academia Real das Sciencias.
- Bekaert, D. P. S., Walters, R. J., Wright, T. J., Hooper, A. J., & Parker, D. J. (2015). Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques. *Remote Sensing of Environment*, 170, 40–47. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2015.08.035>
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & 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), 2375–2383.
- Bianchini Ciampoli, L., Gagliardi, V., Calvi, A., D'Amico, F., & Tosti, F. (2019). Automatic network level bridge monitoring by integration of InSAR and GIS catalogues. 17. <https://doi.org/10.1117/12.2527299>
- Bien, J., Elfgrén, L., & Olofsson, J. (2007). *Sustainable bridges: assessment for future traffic demands and longer lives*. Dolnoslaskie Wydawnictwo Edukacyjne.
- Blasco, J. M. D., Fomelis, M., Stewart, C., & Hooper, A. (2019). Measuring Urban Subsidence in the Rome Metropolitan Area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS Persistent Scatterer Interferometry. *Remote Sensing 2019, Vol. 11, Page 129, 11(2)*, 129. <https://doi.org/10.3390/RS11020129>
- Braun, A. (2021). *InSAR Displacement Mapping with ERS data*. <http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20Stripmap%20Interferometry%20with%20ERS%20Tutorial.pdf>
- Brengman, C. M. J., & Barnhart, W. D. (2021). Identification of surface deformation in InSAR using machine learning. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(3), e2020GC009204.
- Brook, N. (n.d.). *Introduction to SAR Interferometry – Generating a Digital Elevation Model (DEM)*. Retrieved April 12, 2024, from https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/SAR%20Disasters%20Part%203_0.pdf

Brown, J. (2020). *SAR 101: An Introduction to Synthetic Aperture Radar - Capella Space*.
<https://www.capellaspace.com/sar-101-an-introduction-to-synthetic-aperture-radar/>

C

Cao, N., Lee, H., & Jung, H. C. (2015). A phase-decomposition-based PSInSAR processing method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(2), 1074–1090.

Capella Space. (n.d.). *Sentinel-1 Polarization*. 2022. Retrieved April 11, 2024, from <https://support.capellaspace.com/hc/en-us/articles/360044738831-Sentinel-1-Polarization>

Cardoso, A. (2012). *Cidadania RM - Rio Maior: O curso do rio Maior*. <https://rio-maior-cidadania.blogspot.com/2012/07/o-curso-do-rio-maior.html>

Casas, J. R., & Bien, J. (2007). *Updated inventory on condition assessment procedures for bridges: Sustainable Bridges SB D3. 2-Including an Appendix on Methods of railway bridge testing and evaluation in Poland*.

Cavalié, O., Doin, M. P., Lasserre, C., & Briole, P. (2007). Ground motion measurement in the Lake Mead area, Nevada, by differential synthetic aperture radar interferometry time series analysis: Probing the lithosphere rheological structure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B3), 3403. <https://doi.org/10.1029/2006JB004344>

Chen, Y., He, Y., Zhang, L., Chen, Y., Pu, H., Chen, B., & Gao, L. (2021). Prediction of InSAR deformation time-series using a long short-term memory neural network. *International Journal of Remote Sensing*, 42(18), 6919–6942.

Cigna, Dr. F., & Tapete, Dr. D. (2019). *Initiation imagerie radar (SAR)*. https://www.recovery-observatory.org/drupal/en/system/files/users/Agwilh%20Collet_253/20190504a_Initiation%20imagerie%20radar%20SAR.pdf

Cláudio, A. (n.d.). *As Duas Pontes - Câmara Municipal de Almeirim - Um concelho com futuro*. Retrieved May 9, 2024, from <https://www.cm-almeirim.pt/conhecer-almeirim/historia/item/186-as-duas-pontes>

Copernicus. (n.d.-a). *Geographical Coverage - Sentinel-1 - Sentinel Online - Sentinel Online*. Retrieved October 17, 2023, from

<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/satellite-description/geographical-coverage>

Copernicus. (n.d.-b). *Missions - Sentinel Online - Sentinel Online*. Retrieved October 15, 2023, from <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions>

Copernicus. (n.d.-c). *O Copernicus em resumo | Copernicus*. Retrieved October 10, 2023, from <https://www.copernicus.eu/pt-pt/acerca-do-copernicus/o-copernicus-em-resumo>

Copernicus. (n.d.-d). *Orbit - Sentinel-1 - Sentinel Handbook - Sentinel Online*. Retrieved October 16, 2023, from <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/satellite-description/orbit>

Copernicus. (n.d.-e). *Overview of Sentinel-1 Mission*. Retrieved October 15, 2023, from <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s1-mission#S1Mission-CalibrationandValidationActivitiesS1-Mission-Calibration-and-Validation-Activities>

Copernicus. (n.d.-f). *Sentinel-1 - Data Products - Sentinel Online - Sentinel Online*. Retrieved March 10, 2024, from <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/data-products>

Copernicus. (n.d.-g). *Sentinel-1 SAR Technical Guide*. Retrieved September 1, 2023, from <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar>

Copernicus. (n.d.-h). *Sentinel-1 SAR User Guide*. Retrieved September 28, 2023, from <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar>

Copernicus. (n.d.-i). *User Guides - Sentinel-1 SAR - Acquisition Modes - Sentinel Online - Sentinel Online*. Retrieved March 10, 2024, from <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes>

Copernicus. (n.d.-j). *User Guides - Sentinel-1 SAR - Extra Wide Swath - Sentinel Online - Sentinel Online*. Retrieved March 10, 2024, from <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/extra-wide-swath>

- Copernicus. (n.d.-k). *User Guides - Sentinel-1 SAR - Geophysical Measurement - Sentinel Online - Sentinel Online*. Retrieved October 16, 2023, from <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/product-overview/geophysical-measurements>
- Copernicus. (n.d.-l). *User Guides - Sentinel-1 SAR - Interferometric Wide Swath - Sentinel Online - Sentinel Online*. Retrieved March 10, 2024, from <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath>
- Copernicus. (n.d.-m). *User Guides - Sentinel-1 SAR - Level-1 - Sentinel Online - Sentinel Online*. Retrieved March 10, 2024, from <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/product-types-processing-levels/level-1>
- Copernicus. (n.d.-n). *User Guides - Sentinel-1 SAR - Level-2 - Sentinel Online - Sentinel Online*. Retrieved March 10, 2024, from <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/product-types-processing-levels/level-2>
- Copernicus. (n.d.-o). *User Guides - Sentinel-1 SAR - Stripmap - Sentinel Online - Sentinel Online*. Retrieved March 10, 2024, from <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/stripmap>
- Copernicus. (n.d.-p). *User Guides - Sentinel-1 SAR - Wave - Sentinel Online - Sentinel Online*. Retrieved March 10, 2024, from <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/wave>
- Costantini, M., Falco, S., Costantini, M., Malvarosa, F., & Minati Telespazio SpA, F. (2008). A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of SAR images. *Ieeexplore.Ieee.OrgM Costantini, S Falco, F Malvarosa, F MinatiIGARSS 2008-2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing, 2008•ieeexplore.Ieee.Org*. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2008.4779025>
- Crosetto, M., Crippa, B., & Biescas, E. (2005). Early detection and in-depth analysis of deformation phenomena by radar interferometry. *Engineering Geology*, 79(1–2), 81–91.

- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N., & Crippa, B. (2016). Persistent scatterer interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 78–89.
- Cruz, P. J. S. (2006). *Linhas orientadoras de uma política de manutenção, conservação e inspecção de pontes*.
- CSR. (n.d.). *Real Aperture Radar*. University of Texas. Retrieved August 29, 2023, from <https://www.csr.utexas.edu/projects/rs/whatissar/rar.html>
- Cusson, D., Rossi, C., & Ozkan, I. F. (2021). Early warning system for the detection of unexpected bridge displacements from radar satellite data. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11(1), 189–204. <https://doi.org/10.1007/S13349-020-00446-9/FIGURES/12>
- Cusson, D., Trischuk, K., Hébert, D., Hewus, G., Gara, M., & Ghuman, P. (2018). Satellite-Based InSAR Monitoring of Highway Bridges: Validation Case Study on the North Channel Bridge in Ontario, Canada, 2672(45), 76–86. <https://doi.org/10.1177/0361198118795013>

D

- Del Soldato, M., Tomás, R., Pont, J., Herrera, G., Lopez-Davalillos, J. C. G., & Mora, O. (2016). A multi-sensor approach for monitoring a road bridge in the Valencia harbor (SE Spain) by SAR Interferometry (InSAR). *Rendiconti Online Societa Geologica Italiana*, 41, 235–238. <https://doi.org/10.3301/ROL.2016.137>
- Devanthéry, N., Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., & Crippa, B. (2014). *An approach to persistent scatterer interferometry*. <https://www.mdpi.com/2072-4292/6/7/6662>
- Dong, J., Zhang, L., Tang, M., Liao, M., Xu, Q., Gong, J., & Ao, M. (2018). Mapping landslide surface displacements with time series SAR interferometry by combining persistent and distributed scatterers: A case study of Jiaju landslide in Danba, China. *Remote Sensing of Environment*, 205, 180–198.
- Du, Z., Ge, L., Li, X., & Ng, A. H.-M. (2016). Subsidence monitoring over the Southern Coalfield, Australia using both L-Band and C-Band SAR time series analysis. *Remote Sensing*, 8(7), 543.

Duro, J., Inglada, J., Closa, J., Adam, N., & Arnaud, A. (2004). High resolution differential interferometry using time series of ERS and ENVISAT SAR data. *FRINGE 2003 Workshop*, 550, 72.

E

Earth Data Nasa. (n.d.). *What is Synthetic Aperture Radar?* Retrieved August 22, 2023, from <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/what-is-sar>

ESA. (n.d.-a). *Acquisition segment archive - Sentinel-1 - Sentinel Online - Sentinel Online.* Retrieved March 10, 2024, from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/copernicus/sentinel-1/acquisition-plans-archive>

ESA. (n.d.-b). *ESA - ESA facts.* Retrieved October 10, 2023, from https://www.esa.int/About_Us/Corporate_news/ESA_facts

ESA. (n.d.-c). *ESA - ESA per Interrail.* Retrieved January 10, 2024, from https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/ESA_per_Interrail

ESA. (n.d.-d). *ESA - Factos e números.* Retrieved October 10, 2023, from https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Portugal/ESA_-_Factos_e_numeros

ESA. (n.d.-e). *ESA - Introducing Copernicus.* Retrieved October 10, 2023, from https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Introducing_Copernicus

ESA. (n.d.-f). *User Guides - Sentinel-1 SAR - Overview - Sentinel Online - Sentinel Online.* Retrieved August 10, 2023, from <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/overview>

ESA. (2007). *ASAR Product Handbook.* <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/ASAR-Product-Handbook.pdf>

ESA. (2023a). *ESA - developed Earth observation missions.* https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2019/05/ESA-developed_Earth_observation_missions

ESA. (2023b). *ESA - Sentinel-1C in the anechoic chamber.* https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2023/02/Sentinel-1C_in_the_anechoic_chamber

- ESA Earth Observation. (n.d.). *Earth Observation Identity and Access Management System*. Retrieved May 17, 2024, from <https://eoiam-idp.eo.esa.int/>
- eugostodesantarem.pt. (2015, December). *Santarém, ponte D. Luís, início do século XX - Eu Gosto De Santarém*. <http://www.eugostodesantarem.pt/imagens/outros-tempos/santarem-ponte-d-luis-inicio-do-seculo-xx>
- eugostodesantarem.pt. (2020, April). *Ponte D. Luís e embarcações na Ribeira de Santarém - Eu Gosto De Santarém*. <http://www.eugostodesantarem.pt/imagens/outros-tempos/ponte-d-luis-e-embarcacoes-na-ribeira-de-santarem>

F

- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., & Rocca, F. (2007). InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. *ESA Publications*. https://esamultimedia.esa.int/multimedia/publications/TM-19/TM-19_InSAR_web.pdf
- Ferretti, A., Novali Sitael, F., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., & Rucci, A. (2011). A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *Ieeexplore.Ieee.Org* A Ferretti, A Fumagalli, F Novali, C Prati, F Rocca, A RucciIEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011•ieeexplore.Ieee.Org. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2124465>
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8–20.
- FHWA. (2010). Bridge Management Questionnaire Report. *FHWA Office of Asset Management*.
- Fornaro, G., Reale, D., & Verde, S. (2013). Bridge thermal dilation monitoring with millimeter sensitivity via multidimensional SAR imaging. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(4), 677–681. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2218214>
- Fornaro, G., Verde, S., Reale, D., & Pauciuolo, A. (2014). CAESAR: An approach based on covariance matrix decomposition to improve multibaseline–multitemporal interferometric SAR processing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(4), 2050–2065.

Foumelis, M., Delgado Blasco, J. M., Desnos, Y. L., Engdahl, M., Fernández, D., Veci, L., Lu, J., & Wong, C. (2018). *ESA SNAP - StaMPS Integrated processing for Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry*. 2018.

G

Gagliardi, V., Tosti, F., Bianchini Ciampoli, L., Battagliere, M. L., D'Amato, L., Alani, A. M., & Benedetto, A. (2023). Satellite Remote Sensing and Non-Destructive Testing Methods for Transport Infrastructure Monitoring: Advances, Challenges and Perspectives. *Remote Sensing* 2023, Vol. 15, Page 418, 15(2), 418. <https://doi.org/10.3390/RS15020418>

GAMMA. (n.d.). *GAMMA Remote Sensing AG - Home*. Retrieved May 16, 2024, from <https://www.gamma-rs.ch/>

GAMMA. (2023). *GAMMA Software*. https://gamma-rs.ch/uploads/media/GAMMA_Software_information.pdf

GAMMA Remote Sensing AG. (n.d.). *Interferometric SAR Processing*. Retrieved April 11, 2024, from https://esdynamics.geo.uni-tuebingen.de/wiki/files/remote_sensing/pdf/Docu-InSAR_Processing.pdf

Garcia, C. (2012, June). *Ponte D.Luis-Tejo- Santarém | Ponte D.Luis Santarém A Ponte ... | Flickr*. <https://www.flickr.com/photos/cidagarcia/7419875380/in/photostream/>

Ge, L., Ng, A. H.-M., Li, X., Abidin, H. Z., & Gumilar, I. (2014). Land subsidence characteristics of Bandung Basin as revealed by ENVISAT ASAR and ALOS PALSAR interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 154, 46–60.

Giordano, P. F., Turksezer, Z. I., Previtali, M., & Limongelli, M. P. (2022). Damage detection on a historic iron bridge using satellite DInSAR data, 21(5), 2291–2311. <https://doi.org/10.1177/14759217211054350>

Giorgini, E., Orellana, F., Arratia, C., Tavasci, L., Montalva, G., Moreno, M., & Gandolfi, S. (2023). InSAR Monitoring Using Persistent Scatterer Interferometry (PSI) and Small Baseline Subset (SBAS) Techniques for Ground Deformation Measurement in Metropolitan Area of Concepción, Chile. *Remote Sensing*, 15(24), 5700.

Godart, B., & Vassie, P. R. (2001). Bridge management systems: Extended review of existing systems and outline framework for a European system. *BRIME PL97-2220*.

- Goel, K., & Adam, N. (2013). A distributed scatterer interferometry approach for precision monitoring of known surface deformation phenomena. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6679273/>
- Goulão, S. A. (2018). RADARES DE ABERTURA SINTÉTICA (SAR): Os fundamentos e potencialidades de uso na Marinha Portuguesa. *Escola Naval - Marinha*. <http://hdl.handle.net/10400.26/25113>
- Grassi, F., & Mancini, F. (2019, May). *Sentinel-1 data for ground deformation monitoring: the SNAP-StaMPS workflow*.

H

- Haghighi, M. H., & Motagh, M. (2017). Sentinel-1 InSAR over Germany: Large-scale interferometry, atmospheric effects, and ground deformation mapping. *ZfV-Zeitschrift Für Geodäsie, Geoinformation Und Landmanagement*, zfv 4/2017.
- Hakim, W. L., Achmad, A. R., & Lee, C.-W. (2020). Land subsidence susceptibility mapping in jakarta using functional and meta-ensemble machine learning algorithm based on time-series InSAR data. *Remote Sensing*, 12(21), 3627.
- Hetland, E. A., Musé, P., Simons, M., Lin, Y. N., Agram, P. S., & Dicaprio, C. J. (2012). Multiscale InSAR time series (MInTS) analysis of surface deformation. *Wiley Online Library* EA Hetland, P Musé, M Simons, YN Lin, PS Agram, CJ DiCaprio *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012•Wiley Online Library, 117(2), 2404. <https://doi.org/10.1029/2011JB008731>
- Hoeser, T. (2018). *Analysing the Capabilities and Limitations of InSAR using Sentinel-1 Data for Landslide Detection and Monitoring*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35085.59362>
- Hooper, A. (2008). A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35(16).
- Hooper, A. (2009). *A Statistical-Cost Approach to Unwrapping the Phase of InSAR Time Series*.
- Hooper, A., Bekaert, D., Hussain, E., & Spaans, K. (2018). *StaMPS/MTI Manual Version 4.1b*.

- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., & Arikan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514–517, 1–13. <https://doi.org/10.1016/J.TECTO.2011.10.013>
- Hooper, A. J. (2006). *PERSISTENT SCATTERER RADAR INTERFEROMETRY FOR CRUSTAL DEFORMATION STUDIES AND MODELING OF VOLCANIC DEFORMATION* [Stanford University]. https://web.stanford.edu/group/radar/people/Hooper_Thesis.pdf
- Hooper, A., Segall, P., & Zebker, H. (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research*, 112(B7), B07407. <https://doi.org/10.1029/2006JB004763>
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31(23).
- Hoppe, E. J., Novali, F., Rucci, A., Fumagalli, A., Conte, S. Del, Falorni, G., & Toro, N. (2019). Deformation Monitoring of Posttensioned Bridges Using High-Resolution Satellite Remote Sensing. *Journal of Bridge Engineering*, 24(12), 04019115. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001479](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001479)
- Huang, H., Huang, S.-S., & Pilakoutas, K. (2018). Modeling for Assessment of Long-Term Behavior of Prestressed Concrete Box-Girder Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 23(3), 04018002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001210](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001210)
- Huang, Q., Crosetto, M., Monserrat, O., & Crippa, B. (2017). Displacement monitoring and modelling of a high-speed railway bridge using C-band Sentinel-1 data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128, 204–211. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2017.03.016>
- Hussain, M. A., Chen, Z., Zheng, Y., Shoaib, M., Shah, S. U., Ali, N., & Afzal, Z. (2022). Landslide susceptibility mapping using machine learning algorithm validated by persistent scatterer In-SAR technique. *Sensors*, 22(9), 3119.

Infraestruturas de Portugal. (n.d.). Retrieved 29 May 2024, from <https://www.infraestruturasdeportugal.pt/>

IRMÃOS CAVACO, S. (n.d.). *Molhes do Douro*. Retrieved July 17, 2023, from <http://icsa.pt/client/documentos/001.FichasObras/001%20-%20FichasObraPDF.PT/NC-0099%20-%20Molhes%20do%20Douro%20-%20PT.pdf>

J

Jung, J., Kim, D. J., Vadivel, S. K. P., & Yun, S. H. (2019). Long-Term Deflection Monitoring for Bridges Using X and C-Band Time-Series SAR Interferometry. *Remote Sensing* 2019, Vol. 11, Page 1258, 11(11), 1258. <https://doi.org/10.3390/RS11111258>

K

Kampes, B. (2006). Radar interferometry: persistent scatterers technique. *The Netherlands: Springer*. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-1-4020-4723-7.pdf>

Karimzadeh, S., Matsuoka, M., & Ogushi, F. (2018). Spatiotemporal deformation patterns of the Lake Urmia Causeway as characterized by multisensor InSAR analysis. *Scientific Reports*, 8(1), 5357.

Klinghoffer, O., Goltermann, P., & Bassler, R. (2002). Smart Structures: Embeddable sensors for use in the integrated monitoring systems of concrete structures. *Proc. IABMAS*, 2.

L

Lanari, R., Reale, D., Bonano, M., Verde, S., Muhammad, Y., Fornaro, G., Casu, F., & Manunta, M. (2020). Comment on “Pre-Collapse Space Geodetic Observations of Critical Infrastructure: The Morandi Bridge, Genoa, Italy” by Milillo et al. (2019). *Remote Sensing* 2020, Vol. 12, Page 4011, 12(24), 4011. <https://doi.org/10.3390/RS12244011>

Lasri, O., Giordano, P. F., & Limongelli, M. P. (2023). Remote Structural Health Monitoring of Concrete Bridge Using InSAR: A Case Study. In S. Farhangdoust, A. Guemes, & F.-K. Chang (Eds.), *Structural Health Monitoring 2023: Designing SHM*

- for Sustainability, Maintainability, and Reliability - Proceedings of the 14th International Workshop on Structural Health Monitoring* (pp. 2561-2568). <https://doi.org/10.12783/shm2023/37027>
- Lazecky, M., Hlavacova, I., Bakon, M., Sousa, J. J., Perissin, D., & Patricio, G. (2017). Bridge Displacements Monitoring Using Space-Borne X-Band SAR Interferometry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(1), 205–210. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2587778>
- Lazecky, M., Perissin, D., Bakon, M., De Sousa, J. M., Hlavacova, I., & Real, N. (2015). Potential of satellite InSAR techniques for monitoring of bridge deformations. *2015 Joint Urban Remote Sensing Event, JURSE 2015*. <https://doi.org/10.1109/JURSE.2015.7120506>
- Lien, J. (2016). *PARTIALLY CORRELATED PERSISTENT SCATTERER THEORY AND TECHNIQUES FOR RADAR INTERFEROMETRY*. <http://purl.stanford.edu/xt344sj1364>
- Line-of-sight propagation*. (n.d.). IEEE Technology Navigator. Retrieved May 5, 2024, from <https://technav.ieee.org/topic/line-of-sight-propagation>
- Liu, X., Wang, P., Lu, Z., Gao, K., Wang, H., Jiao, C., & Zhang, X. (2019). Damage Detection and Analysis of Urban Bridges Using Terrestrial Laser Scanning (TLS), Ground-Based Microwave Interferometry, and Permanent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR). *Remote Sensing 2019, Vol. 11, Page 580*, 11(5), 580. <https://doi.org/10.3390/RS11050580>
- López-Quiroz, P., Doin, M., Tupin, F., ... P. B.-J. of A., & 2009, undefined. (2009). Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry. *Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985109000251>
- Luca, C. de, Cuccu, R., Elefante, S., Zinno, I., Manunta, M., Casola, V., Rivolta, G., Lanari, R., & Casu, F. (2015). An on-demand web tool for the unsupervised retrieval of earth's surface deformation from SAR data: The P-SBAS service within the ESA G-POD environment. *Remote Sensing*, 7(11), 15630–15650. <https://doi.org/10.3390/RS71115630>

Ly, X., Yazıcı, B., Zeghal, M., Bennett, V., & AbdounI, T. (2014). Joint-scatterer processing for time-series InSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6803041/>

M

Ma, P., Li, T., Fang, C., & Lin, H. (2019). A tentative test for measuring the sub-millimeter settlement and uplift of a high-speed railway bridge using COSMO-SkyMed images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 155, 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2019.06.013>

Macchiarulo, V., Milillo, P., Blenkinsopp, C., & Giardina, G. (2022). Monitoring deformations of infrastructure networks: A fully automated GIS integration and analysis of InSAR time-series. *Structural Health Monitoring*, 21(4), 1849–1878. https://doi.org/10.1177/14759217211045912/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_14759217211045912-FIG19.JPEG

Mancini, F., Grassi, F., & Cenni, N. (2021). A Workflow Based on SNAP–StaMPS Open-Source Tools and GNSS Data for PSI-Based Ground Deformation Using Dual-Orbit Sentinel-1 Data: Accuracy Assessment with Error Propagation Analysis. *Remote Sensing*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/rs13040753>

Mantas, V. G. (2012). A estrada romana de Olisipo a Scallabis. Traçado e vestígios. *Cira Arqueologia*. https://www.museumunicipalvfxira.pt/cmvmfxira/uploads/document/file/897/01_-_A_estrada_romana_de_Olisipo_a_Scallabis.pdf

Marinkovic, P., Ketelaar, G., Van Leijen, F., & Hanssen, R. (2007). *InSAR quality control: Analysis of five years of corner reflector time series*.

Markogiannaki, O., Xu, H., Chen, F., Mitoulis, S. A., & Parcharidis, I. (2022). Monitoring of a landmark bridge using SAR interferometry coupled with engineering data and forensics. *International Journal of Remote Sensing*, 43(1), 95–119. <https://doi.org/10.1080/01431161.2021.2003468>

MathWorks. (2021). *Squint angle for SAR data collection - MATLAB sarsquintang*. MathWorks - Help Center. <https://www.mathworks.com/help/radar/ref/sarsquintang.html>

Mendonça, I. (1997). *Ponte de Santarém / Ponte D. Luís*.
http://www.monumentos.gov.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=6261

Meyer, F. (2019). *THE SAR HANDBOOK - Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation* (First edition). SERVIR-Global .
<https://doi.org/10.25966/nr2c-s697>

Milillo, P., Giardina, G., Perissin, D., Milillo, G., Coletta, A., & Terranova, C. (2019). Pre-Collapse Space Geodetic Observations of Critical Infrastructure: The Morandi Bridge, Genoa, Italy. *Remote Sensing 2019, Vol. 11, Page 1403, 11*(12), 1403.
<https://doi.org/10.3390/RS11121403>

Mora, O., Mallorqui, J. J., & Broquetas, A. (2003). Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(10), 2243–2253.

N

Narayan, A. B., Tiwari, A., Dwivedi, R., & Dikshit, O. (2018). A novel measure for categorization and optimal phase history retrieval of distributed scatterers for InSAR applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(10), 5843–5849.

Nettis, A., Massimi, V., Nutricato, R., Nitti, D. O., Samarelli, S., & Uva, G. (2023). Satellite-based interferometry for monitoring structural deformations of bridge portfolios. *Automation in Construction*, 147, 104707.
<https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2022.104707>

Ng, A. H.-M., Ge, L., & Li, X. (2015). Assessments of land subsidence in the Gippsland Basin of Australia using ALOS PALSAR data. *Remote Sensing of Environment*, 159, 86–101.

Novellino, A., Cesarano, M., Cappelletti, P., Di Martire, D., Di Napoli, M., Ramondini, M., Sowter, A., & Calcaterra, D. (2021). Slow-moving landslide risk assessment combining Machine Learning and InSAR techniques. *Catena*, 203, 105317.

O

Onn, F., & Zebker, H. A. (2006). Correction for interferometric synthetic aperture radar atmospheric phase artifacts using time series of zenith wet delay observations from

a GPS network. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B9).
<https://doi.org/10.1029/2005JB004012>

P

Pacini, F. (n.d.). *Release of SNAPPING PSI service at Full Sensor Resolution on GEP - gep-blog - discuss@terradue*. Retrieved November 8, 2023, from
<https://discuss.terradue.com/t/release-of-snapping-psi-service-at-full-sensor-resolution-on-gep/1108>

Patrício, E. da G. R. (2018). *Avaliação da Tecnologia InSAR para Monitorização de Grandes Obras*. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/116691>

Peduto, D., Elia, F., & Montuori, R. (2018). Probabilistic analysis of settlement-induced damage to bridges in the city of Amsterdam (The Netherlands). *Transportation Geotechnics*, 14, 169–182. <https://doi.org/10.1016/J.TRGEO.2018.01.002>

Pereira, G. S. (2008). *Projecto de um quebramar destacado de protecção para a frente marítima de Espinho*. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/59143>

Perissin, D., & Ferretti, A. (2007). Urban-target recognition by means of repeated spaceborne SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(12). <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.906092>

Perissin, D., & Rocca, F. (2006). High-accuracy urban DEM using permanent scatterers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(11), 3338–3347. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.877754>

Perissin, D., & Wang, Z. (2012). Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers. *ISPRS Journal of Photogrammetry*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271612001256>

Perissin, D., Wang, Z., & Wang, T. (2011). *The SARPROZ InSAR tool for urban subsidence / manmade structure stability monitoring in China*. https://www.researchgate.net/publication/228878770_The_SARPROZ_InSAR_tool_for_urban_subsidencemanmade_structure_stability_monitoring_in_China

Piqueiro, F. (n.d.). *FotoEngenho*. Retrieved 29 May 2024, from
<https://www.fotoengenho.pt/>

Poças, R. de F. G. (2009). *Gestão do Ciclo de Vida de Pontes*.

Q

- Qin, X., Ding, X., Liao, M., Zhang, L., & Wang, C. (2019). A bridge-tailored multi-temporal DInSAR approach for remote exploration of deformation characteristics and mechanisms of complexly structured bridges. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 156, 27–50. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2019.08.003>
- Qin, X., Liao, M., Zhang, L., & Yang, M. (2017). Structural health and stability assessment of high-speed railways via thermal dilation mapping with time-series InSAR analysis. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(6), 2999–3010. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2719025>
- Qin, X., Zhang, L., Yang, M., Luo, H., Liao, M., & Ding, X. (2018). Mapping surface deformation and thermal dilation of arch bridges by structure-driven multi-temporal DInSAR analysis. *Remote Sensing of Environment*, 216, 71–90. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2018.06.032>

R

- Ranjgar, B., Razavi-Termeh, S. V., Foroughnia, F., Sadeghi-Niaraki, A., & Perissin, D. (2021). Land subsidence susceptibility mapping using persistent scatterer SAR interferometry technique and optimized hybrid machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 13(7), 1326.
- Rees, G. (2013). *Physical principles of remote sensing*. Cambridge university press.
- Reza Choudhury, J., & Hasnat, A. (2015). Bridge collapses around the world: Causes and mechanisms. *IABSE-JSCE*.
- Rheticus. (n.d.). *Rheticus - Monitoring the evolution of our Earth*. Retrieved May 16, 2024, from <https://www.rheticus.eu/>
- Roque, D., Fonseca, A. M., Henriques, M. J., & Falcão, A. P. (2014). A First Approach for Displacement Analysis in Lisbon Downtown Using PS-InSAR. *Procedia Technology*, 16, 288–293. <https://doi.org/10.1016/J.PROTCY.2014.10.094>
- Roque, D., Maria Fonseca, A., Vieira de Lemos, J., & Paula Falcão, A. (2016). DETERMINAÇÃO DE DESLOCAMENTOS COM GEODESIA INSAR PARA O CONTROLO DE SEGURANÇA DE ESTRUTURAS. *LNESC*.

http://repositorio.lnec.pt:8080/jspui/bitstream/123456789/1009002/2/Rel%20344_16%20dspace.pdf

- Roque, D., Perissin, D., Falcão, A. P., Fonseca, A. M., Henriques, M. J., & Franco, J. (2015). Dams regional safety warning using time-series insar techniques. *Second International Dam World Conference, Portugal, April, 21–24*.
- Rouet-Leduc, B., Jolivet, R., Dalaison, M., Johnson, P. A., & Hulbert, C. (2021). Autonomous extraction of millimeter-scale deformation in InSAR time series using deep learning. *Nature Communications*, 12(1), 6480.
- Ruiz-Armenteros, A. M., Bakon, M., Lazecky, M., Delgado, J. M., Sousa, J. J., Perissin, D., & Caro-Cuenca, M. (2016). Multi-Temporal InSAR Processing Comparison in Presence of High Topography. *Procedia Computer Science*, 100, 1181–1190. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2016.09.278>
- Ryall, M. J. (2001). *Bridge management*. Elsevier.

S

- Santos, I., Cláudia Teodoro, A., & Taveira Pinto, F. (n.d.). *ANÁLISE DA EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA DA RESTINGA DO RIO DOURO* *Analysys of Morphological Evolution of Douro River Sand Spit*. Retrieved July 17, 2023, from https://paginas.fe.up.pt/~shrha/publicacoes/pdf/JHRHA_5as/11_ISantos_An%C3%A1liseDaEvolu%C3%A7%C3%A3o.pdf
- SARPROZ. (n.d.). *Scientific Publications – SARPROZ*. Retrieved March 25, 2024, from <https://www.sarproz.com/scientific-publications/>
- Schindler, S., Hegemann, F., Koch, C., König, M., & Mark, P. (2011). *Radar interferometry based settlement monitoring in tunnelling: Visualisation and accuracy analyses*. <https://doi.org/10.1186/s40327-016-0034-x>
- Schlögl, M., Widhalm, B., & Avian, M. (2021). Comprehensive time-series analysis of bridge deformation using differential satellite radar interferometry based on Sentinel-1. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 172, 132–146. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2020.12.001>
- Schmidt, D. A., & Bürgmann, R. (2003). Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B9).

- Selvakumaran, S., Plank, S., Geiß, C., Rossi, C., & Middleton, C. (2018). Remote monitoring to predict bridge scour failure using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) stacking techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, 463–470. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2018.07.004>
- Serco Italia S.p.A. (2021). *StaMPS: Persistent Scatterer Interferometry Processing Case Study: Mexico City*. https://eo4society.esa.int/wp-content/uploads/2022/01/HAZA09_SNAP2StaMPS_MexicoCity_Tutorial.pdf
- Shamshiri, R., Nahavandchi, H., Motagh, M., & Hooper, A. (2018). Efficient ground surface displacement monitoring using Sentinel-1 data: Integrating distributed scatterers (DS) identified using two-sample t-test with persistent scatterers (PS). *Remote Sensing*, 10(5), 794.
- SNAP Online Help – STEP*. (n.d.). STEP - Scientific Toolbox Exploitation Platform. Retrieved April 11, 2024, from <https://step.esa.int/main/doc/online-help/?version=10.0.0>
- Sousa, J. J., & Bastos, L. (2013). Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(3), 659–667. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-659-2013>
- Sousa, J. J., Hooper, A. J., Hanssen, R. F., Bastos, L. C., & Ruiz, A. M. (2011). Persistent Scatterer InSAR: A comparison of methodologies based on a model of temporal deformation vs. spatial correlation selection criteria. *Remote Sensing of Environment*, 115(10), 2652–2663. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2011.05.021>
- Sousa, J. J. M., Lazecky, M., Hlavacova, I., Bakon, M., Patricio, G., & Perissin, D. (2015). Satellite SAR interferometry for monitoring dam deformations in Portugal. *Second International Dam World Conference, Portugal, April, 21–24*.
- Sousa, M. (2017). *Gestão de obras de arte sob tutela municipal : estudo de pontes em alvenaria*.
- Sousa, M., Almeida, J. O., & Costa, C. (2016). *A problemática da gestão de obras de arte sob tutela municipal*.
- Sutcliffe, A., Catalão, J., & Brito, A. C. (2016). Observação da Terra: uso de imagens SAR para a monitorização de águas costeiras e oceânicas. *Sophia*, 47p.

https://www.researchgate.net/publication/311102484_OBSERVACAO_DA_TERRA_uso_de_imagens_SAR_para_a_monitorizacao_de_aguas_costeiras_e_oceanicas

T

Torres, J. (2013, June). *Santarém ponte D.Luis | Olhares*. <https://olhares.com/santarem-ponte-dluis-foto5618870.html>

Tre Altamira. (n.d.). *InSAR Interferometric Synthetic Aperture Radar - TRE ALTAMIRA*. Retrieved November 6, 2023, from <https://site.tre-altamira.com/insar/>

Truckenbrodt, J., Freemantle, T., Williams, C., Jones, T., Small, D., Dubois, C., Thiel, C., Rossi, C., Syriou, A., & Giuliani, G. (2019). *Towards Sentinel-1 SAR analysis-ready data: a best practices assessment on preparing backscatter data for the Cube*. *Data* 4 (3), 93.

V

Vadivel, S. K. P., Kim, D. J., & Kim, Y. C. (2020). Time-series InSAR Analysis and Post-processing Using ISCE-StaMPS Package for Measuring Bridge Displacements. *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(4), 527–534. <https://doi.org/10.7780/KJRS.2020.36.4.3>

Valentino, G. (2021). *Introduction to Interferometric SAR*. https://eo4society.esa.int/wp-content/uploads/2021/03/2021-Malta_InSAR_Valentino_theory.pdf

van Natijne, A. L., Bogaard, T. A., van Leijen, F. J., Hanssen, R. F., & Lindenberg, R. C. (2022). World-wide InSAR sensitivity index for landslide deformation tracking. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 111, 102829.

Viana, M. (2009). Povoamento, geomorfologia e toponímia do baixo Tejo e do campo de Valada (1200-1350). *Academia.Edu*. [https://www.academia.edu/download/33664942/VIANA_\(M.\)_2009a.pdf](https://www.academia.edu/download/33664942/VIANA_(M.)_2009a.pdf)

W

Wan, C., Zhou, Z., Li, S., Ding, Y., Xu, Z., Yang, Z., Xia, Y., & Yin, F. (2019). Development of a Bridge Management System Based on the Building Information Modeling Technology. *Sustainability* 2019, Vol. 11, Page 4583, 11(17), 4583. <https://doi.org/10.3390/SU11174583>

Werner, C., Wegmuller, U., Wiesmann, A., & Strozzi, T. (2003). Interferometric point target analysis with JERS-1 L-band SAR data. *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No. 03CH37477)*, 7, 4359–4361.

Woodhouse, I. H. (2005). *Introduction to Microwave Remote Sensing* (1st ed.). CRC Press Taylor & Francis Group.

Woodward, R., Cullington, D. W., Daly, A. F., Vassie, P. R., Haardt, P., Kashner, R., Astudillo, R., Velando, C., Godart, B., & Cremona, C. (2001). *Bridge Management in Europe (BRIME)-Deliverable D14-Final Report*.

X

Xiong, S., Wang, C., Qin, X., Zhang, B., & Li, Q. (2021). Time-Series Analysis on Persistent Scatter-Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR) Derived Displacements of the Hong Kong–Zhuhai–Macao Bridge (HZMB) from Sentinel-1A Observations. *Remote Sensing 2021, Vol. 13, Page 546, 13(4)*, 546. <https://doi.org/10.3390/RS13040546>

Z

Zhao, J., Wu, J., Ding, X., & Wang, M. (2017). Elevation Extraction and Deformation Monitoring by Multitemporal InSAR of Lupu Bridge in Shanghai. *Remote Sensing 2017, Vol. 9, Page 897, 9(9)*, 897. <https://doi.org/10.3390/RS9090897>

Zhou, L., Yu, H., & Lan, Y. (2021). Artificial intelligence in interferometric synthetic aperture radar phase unwrapping: A review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 9(2), 10–28.

Zyl, J. Van, & Kim, Y. (2010). *JPL Space Science & Technology Book Series* (J. H. Yuen, Ed.; Vol. 2). Jet Propulsion Laboratory (JPL) - California Institute of Technology. https://descanso.jpl.nasa.gov/SciTechBook/series2/SAR_Polarimetry_compressed.pdf

ANEXOS

Anexo 1 – Nomenclatura e ferramentas de software aberto para SAR

Tabela A.1 - Propriedades dos sensores SAR a bordo de satélites. Fonte: (Meyer, 2019)

SENSOR	FORMAT	PRODUCT NAME	PRODUCT FILES	PROCESSING LEVEL	OPEN SOURCE TOOLS	APPLICATIONS
CURRENT SPACEBORNE SENSORS						
Seasat	HDF5	L1 Image	h5, xml, kml, jpg, qc_report	Amplitude	ASF MapReady, QGIS	Visualization; GIS-compatible
	GeotIFF	L1 GeoTIFF	tif, xml, kml, jpg, qc_report	Geocoded amplitude	QGIS; graphics software	Visualization; GIS-compatible
ERS-1&2	EOS	L0	D,L,P, kml, jpg	Raw	N/A	Production of higher-level products
Envisat						
Radarsat-1		L1 Image		Amplitude	ASF MapReady; S1TBX	Visualization, mapping, change detection
JERS-1						
ALOS-1	CEOS	L1.0	LED, IMG, VOL, TRL	Raw	N/A	Production of higher-level products
		L1.1 Complex		SLC	SNAP; DORIS; PolSARpro; GMTSAR	Interferometry
		L1.5		Amplitude	ASF MapReady; S1TBX; PolSARpro	Visualization, mapping, change detection
TerraSAR-X TanDEM-X	COSAR fomat	L1 SSC (Single Look Slant Range Complex)		SLC	SNAP; DORIS; PolSARpro; GMTSAR	Interferometry
	GeoTIFF	L1 MGD (Multi Look Ground Range Detected)		Amplitude	ASF MapReady; SNAP; PolSARpro	Visualization, mapping, change detection
	GeoTIFF	L1 GEC (Geocoded Ellipsoid Corrected)		Amplitude	ASF MapReady; SNAP; PolSARpro	Visualization, mapping, change detection
	GeoTIFF	L1 EEC (Enhanced ellipsoid corrected)		Amplitude	ASF MapReady; SNAP; PolSARpro	Visualization, mapping, change detection
Radarsat-2	GeoTIFF or NITF 2.1 with XML	L1 SLC		SLC	SNAP; DORIS; PolSARpro; GMTSAR	Interferometry
		L1 Ground Range (SGX; SGF; SCN; SCW; SCF; SCS)		Amplitude	SNAP; PolSARpro	Visualization, mapping, change detection

		L1 Geocorrected (SSG; SPG)		Amplitude	SNAP; PolSARpro	Visualization, mapping, change detection
COSMO - SkyMed	HDF5	L0 RAW		Raw		Production of higher-level products
		L1A		SLC	SNAP; ROI_PAC; DORIS; PolSARpro; GMTSAR	Interferometry
		L1B MDG (Multi-look Detected Ground Range)		Amplitude	SNAP; PolSARpro	Visualization, mapping, change detection
		L1C GEC		Amplitude	SNAP; PolSARpro	Visualization, mapping, change detection
		L1D GTC (Geocoded Terrain Corrected)		Amplitude	SNAP; PolSARpro	Visualization, mapping, change detection
		Various higher-level products				
ALOS-2 PALSAR-2		L1.1 SLC		SLC	SNAP; ROI_PAC; DORIS; Pol-SARpro; GMTSAR	Interferometry
		L1.5 (slant- range detected)		Amplitude	SNAP; PolSARpro	Visualization, mapping, change detection
		L2.1 GTC		Geocoded amplitude	SNAP; PolSARpro	Visualization, mapping, change detection
		L3.1 (Quality corrected L1.5)		Enhanced amplitude	SNAP; PolSARpro	Visualization, mapping, change detection
Sentinel- 1	SAFE	L0 raw data	tiff, xml, xsd, kml, html, png, pdf, safe	Raw	N/A	Production of higher-level products
		GeoTIFF L1 SLC		SLC	S1TBX; ROI_PAC; DORIS; PolSARpro	Interferometry
		GeoTIFF L1 Detected High-Res Single- & Dual-Pol		Georeferenced Amplitude	ASF MapReady; Google Earth Engine; S1TBX; PolSARpro	Visualization, mapping, change detection
		GeoTIFF L1 Detected Single- & Dual-Pol		Georeferenced Amplitude	ASF MapReady; Google Earth Engine; S1TBX; PolSARpro	Visualization, mapping, change detection

Anexo 2 – Resultados obtidos para as pontes estudadas - análise StaMPS – Trajetória Ascendente

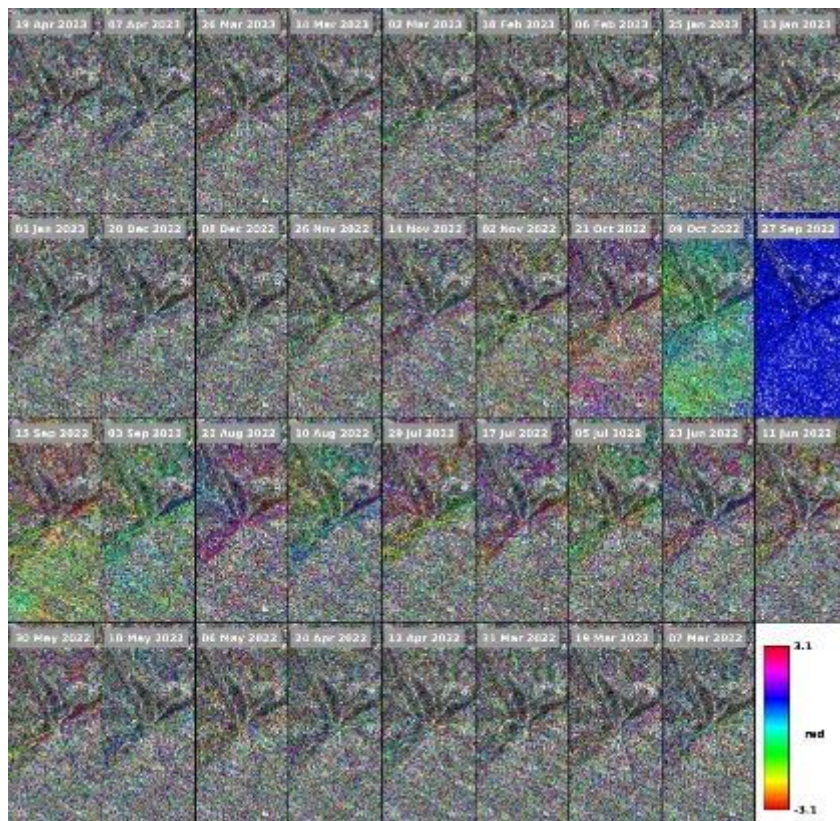


Figura A.1 - Resultado passo 1 StaMPS - Ascendente – Sobre a Ponte da Asseca

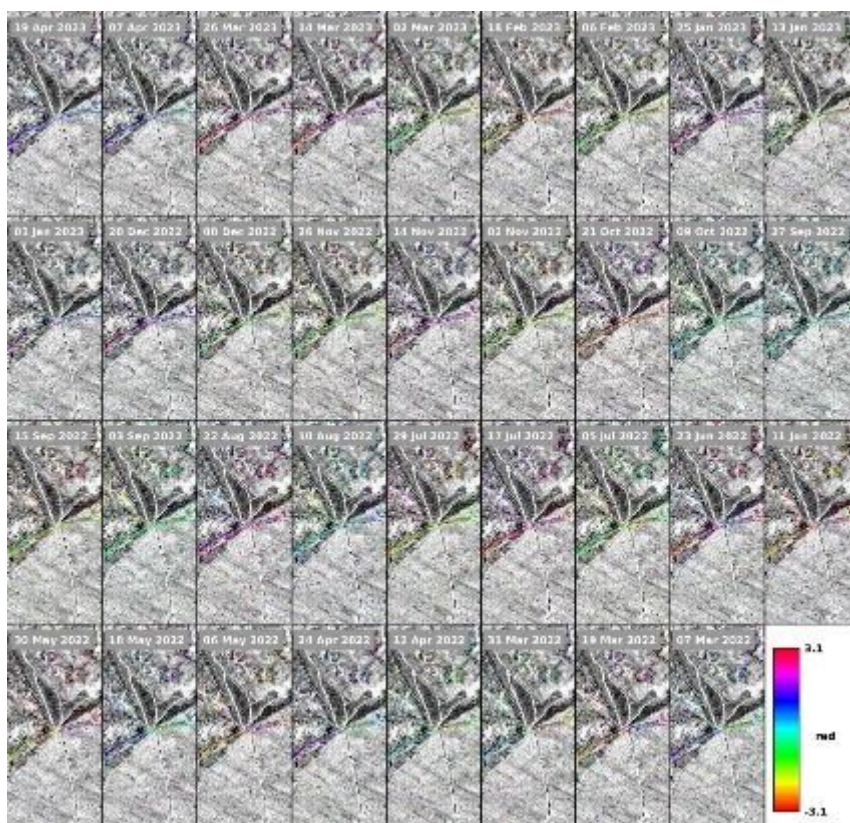


Figura A.2 - Resultado passo 5 StaMPS - Ascendente – Sobre a Ponte da Asseca

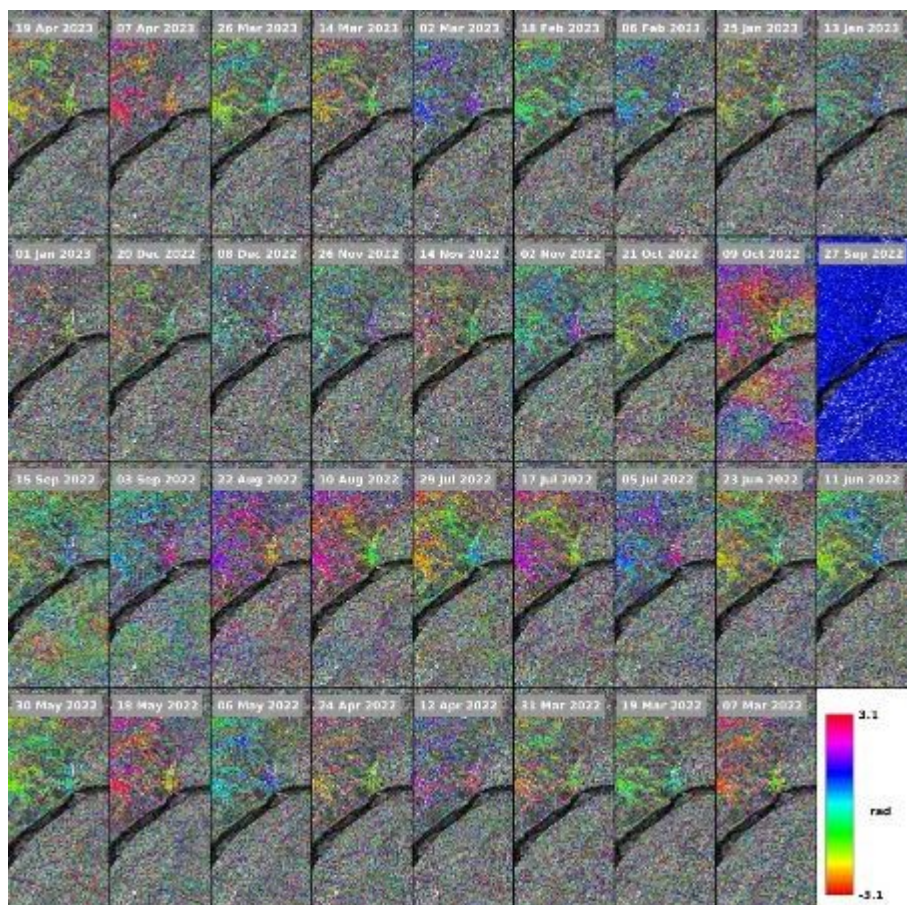


Figura A.3 - Resultado passo 1 StaMPS - Ascendente – Sobre a Ponte D. Luís

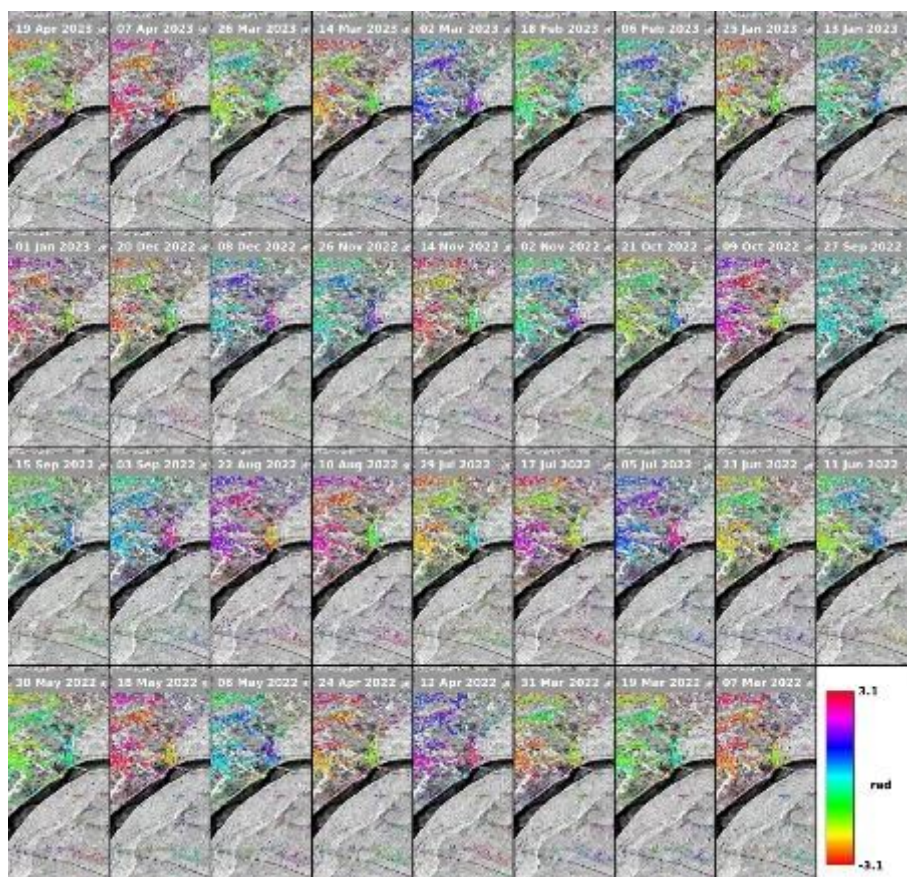


Figura A.4 - Resultado passo 5 StaMPS - Ascendente – Sobre a Ponte D. Luís



Figura A.5 - Resultado passo 6 StaMPS - Ascendente – Sobre AOI

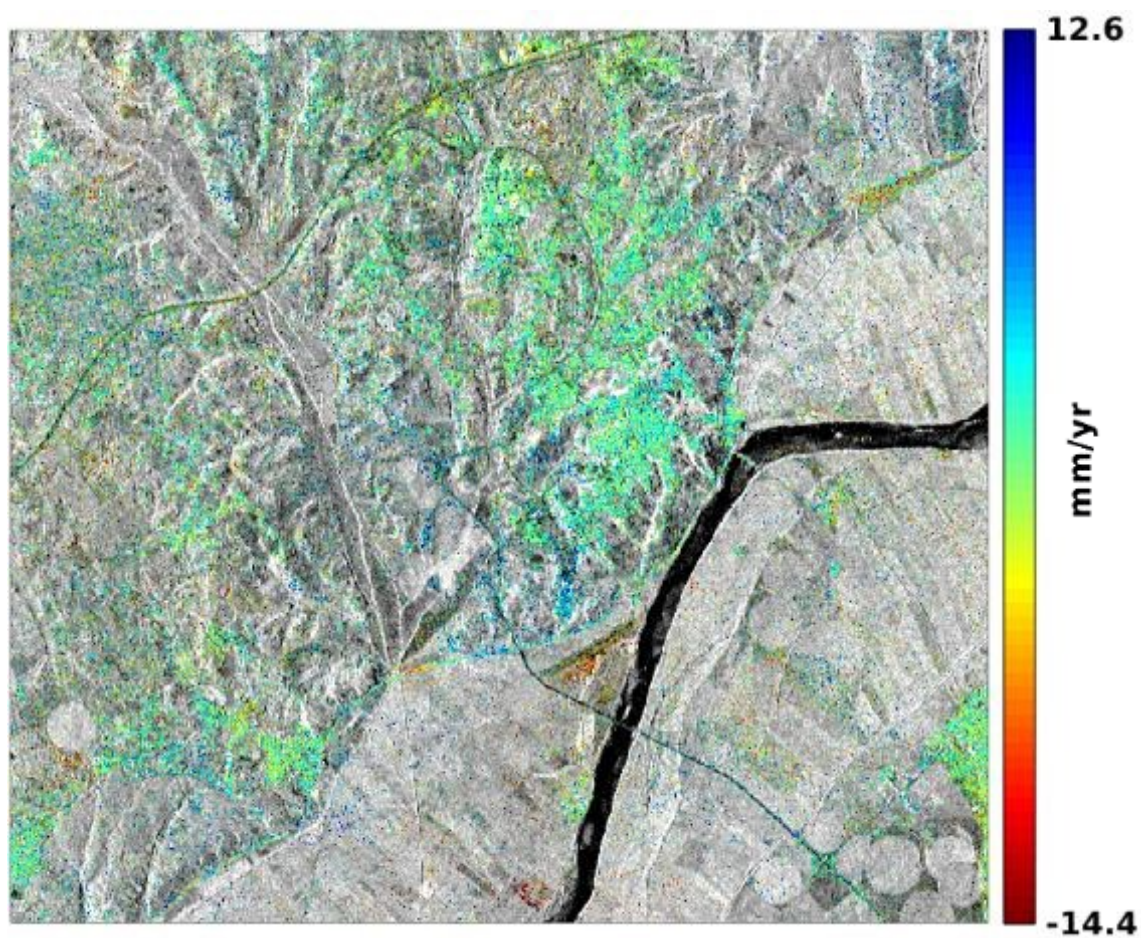


Figura A.6 - Resultado passo 8 StaMPS - Ascendente – Sobre AOI

Anexo 3 – Resultados obtidos para as pontes estudadas - análise StaMPS – Trajetória Descendente

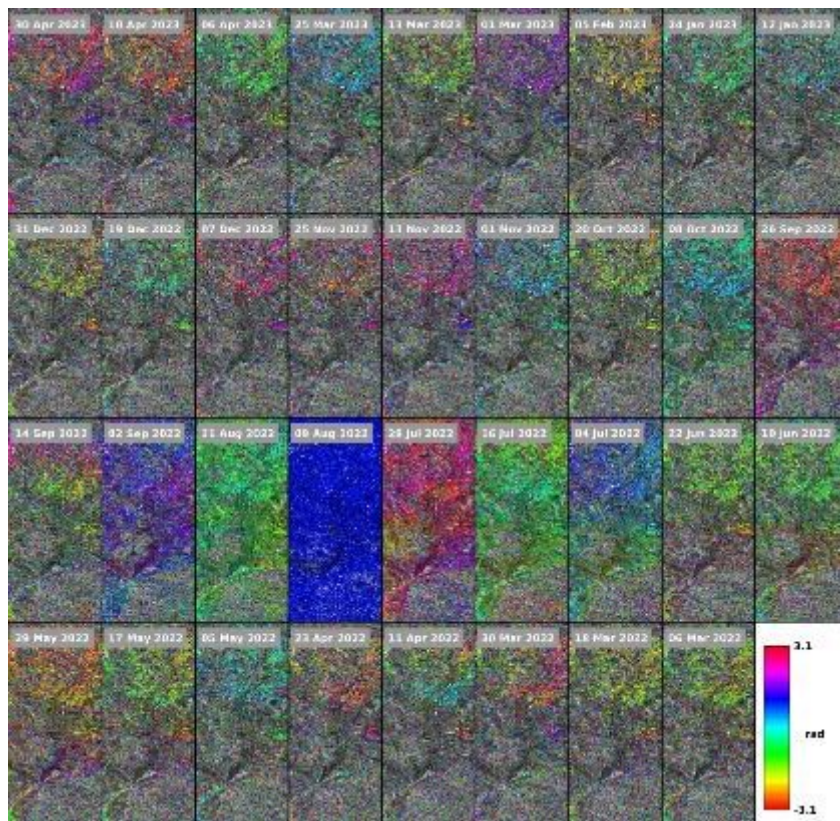


Figura A.7 - Resultado passo 1 StaMPS - Descendente – Sobre a Ponte da Asseca

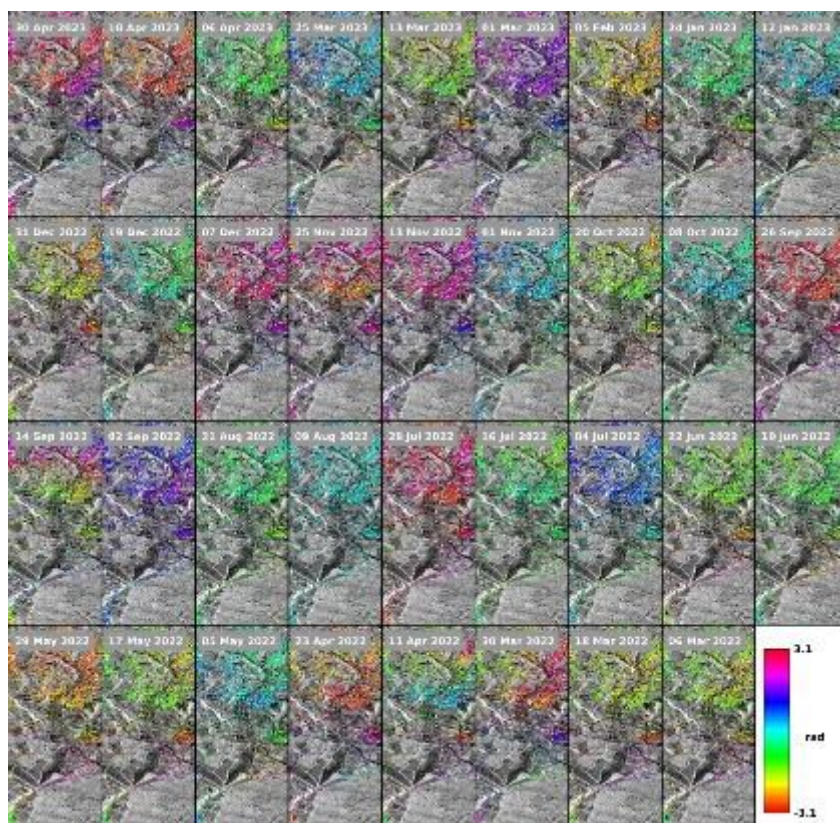


Figura A.8 - Resultado passo 5 StaMPS - Descendente – Sobre a Ponte da Asseca

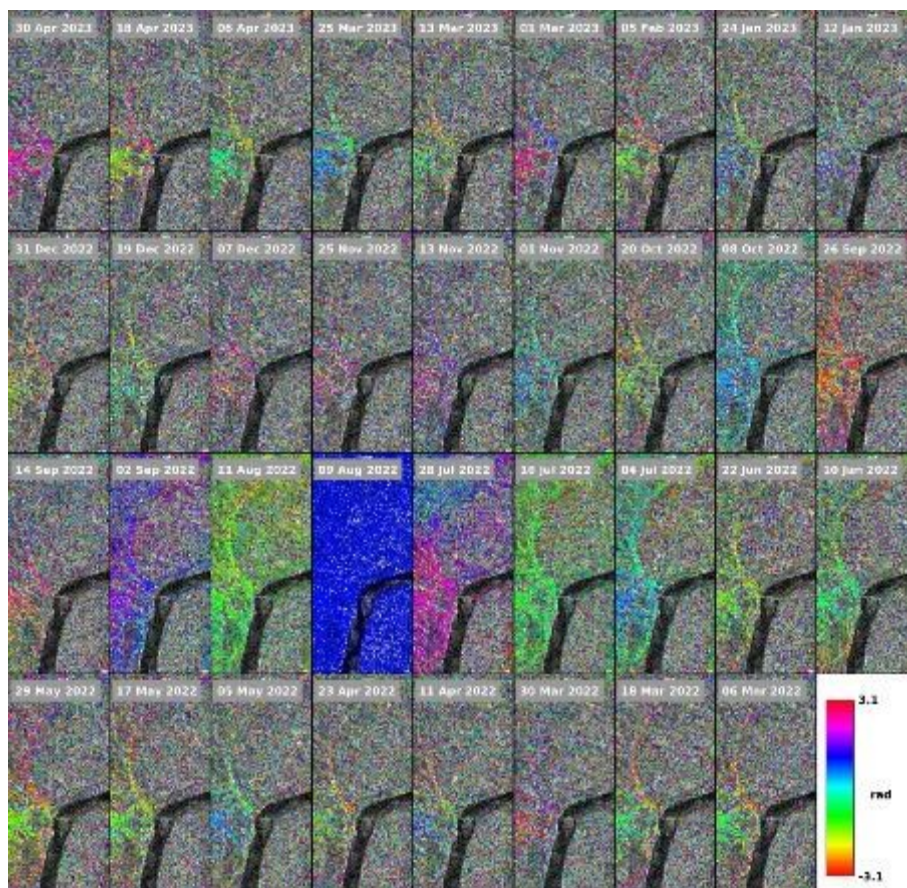


Figura A.9 - Resultado passo 1 StaMPS - Descendente – Sobre a Ponte D. Luís

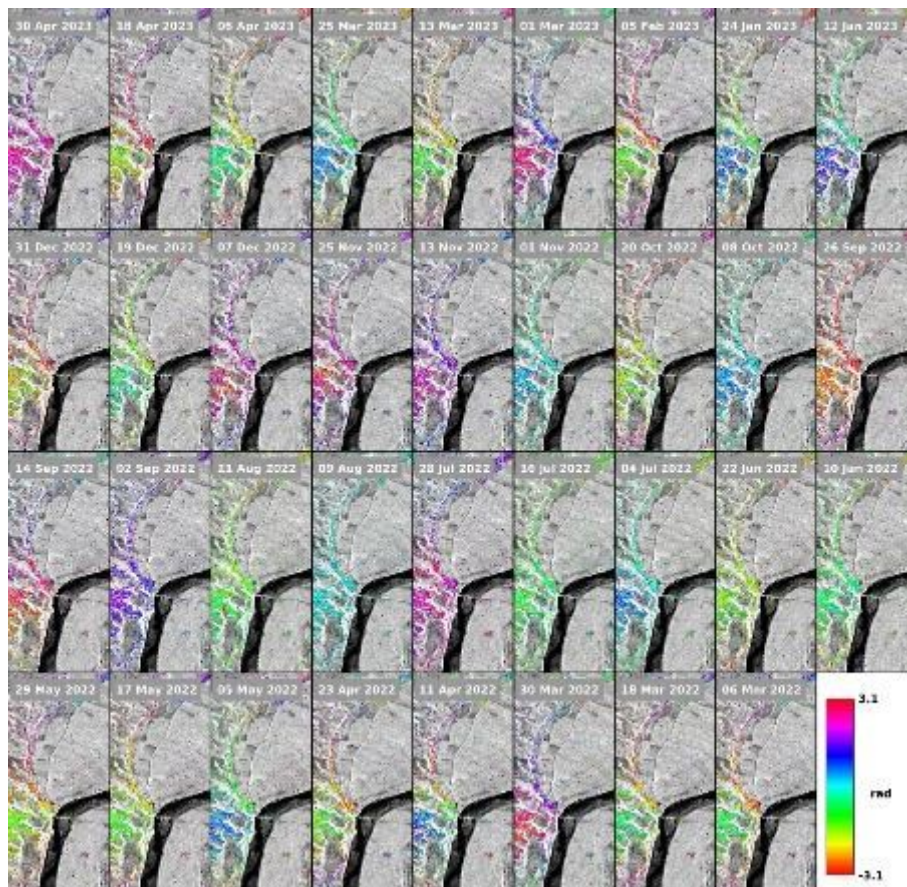


Figura A.10 - Resultado passo 5 StaMPS - Descendente – Sobre a Ponte D. Luís

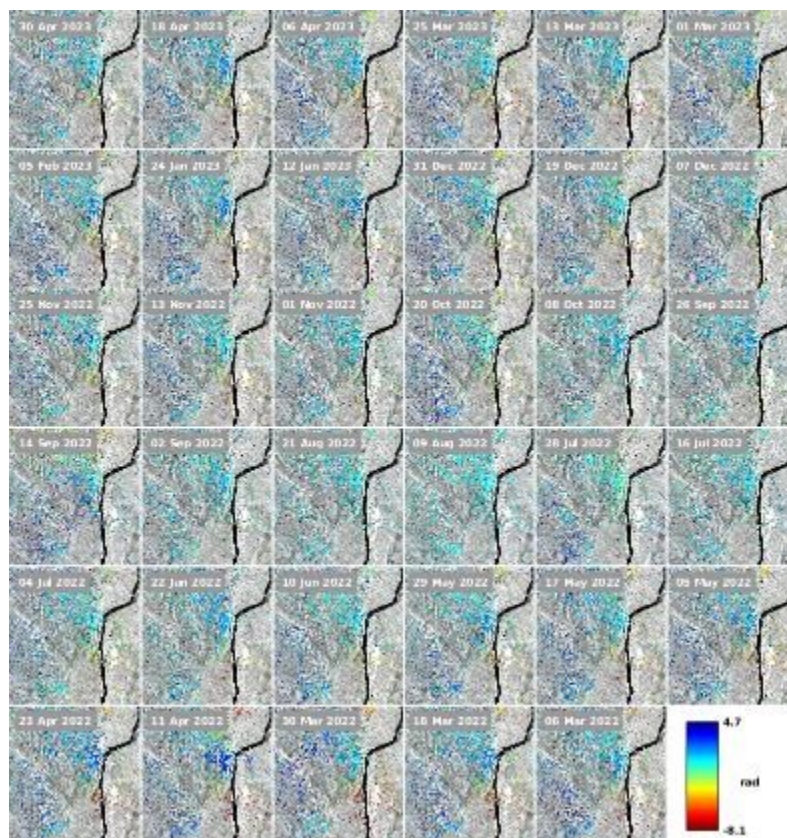


Figura A.11 - Resultado passo 6 StaMPS - Descendente – Sobre a AOI

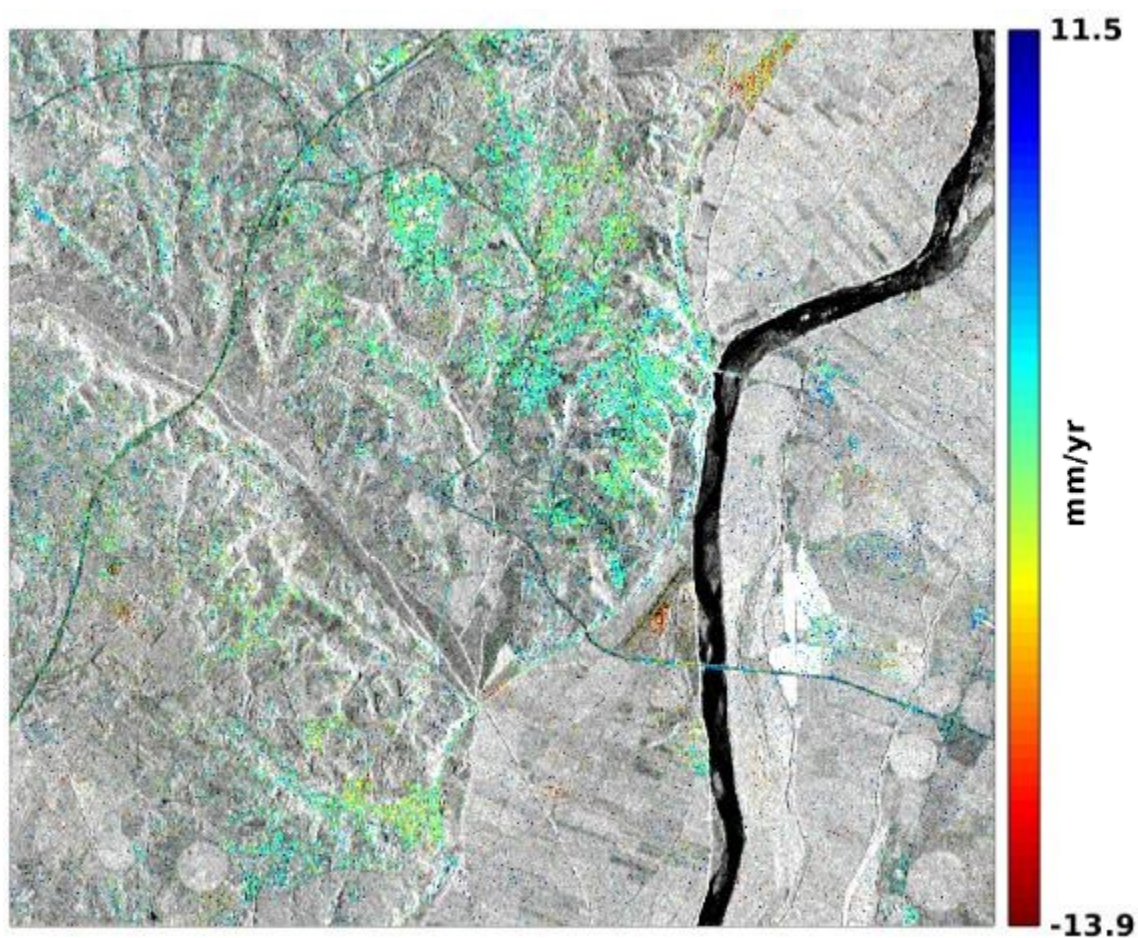


Figura A.12 - Resultado passo 8 StaMPS - Descendente – Sobre a AOI

Anexo 4 – Exemplos de programas desenvolvidos para o Assistente de Análise

União de pontos de diferentes trajetórias antes do cálculo de deslocamentos verticais e longitudinais

```
import sys
import json
import math
import numpy as np
script_dir = os.path.dirname(os.path.abspath(inspect.getfile(inspect.currentframe())))
script_dir = os.path.abspath(os.path.join(script_dir, "Estágio", "py"))
# armazenar as variáveis na mesma pasta
temp_file_path = os.path.join(script_dir, 'unir_pontos.json')
try:
    with open(temp_file_path, 'r', encoding='utf-8') as temp_file:
        variables = json.load(temp_file)
    if variables.get("direcao") == "Ascendente":
        trajetoria = "asc"
    elif variables.get("direcao") == "Descendente":
        trajetoria = "des"
    else:
        variables["trajetoria"] = "outra_opcao"

    camada_pontos_nome = variables.get("camada_origem")
    camada_poligonos_nome = variables.get("camada_destino")
    tipo_calc = variables.get("tipo_calculo")

    # Verificar as variáveis
    def funcao_secundaria():
        print("Variáveis recebidas:")
        print("Camada Origem:", variables.get("camada_origem"))
        print("Camada Destino:", variables.get("camada_destino"))
        print("Tipo de Cálculo:", variables.get("tipo_calculo"))
        print("Direção:", variables.get("direcao"))
    funcao_secundaria()

    projeto = QgsProject.instance()
    camada_pontos = projeto.mapLayersByName(camada_pontos_nome)[0]
    camada_poligonos = projeto.mapLayersByName(camada_poligonos_nome)[0]
    nomes_campos_pontos = [campo.name() for campo in camada_pontos.fields()]

    # Adicionar os campos da camada de pontos à camada de polígonos
    for nome_campo in nomes_campos_pontos:
        # Verificação se o campo já existe na camada de polígonos
        nome_campo = nome_campo.replace('field', trajetoria)
        if nome_campo not in camada_poligonos.fields().names():
            nome_camposf = nome_campo.replace('field', trajetoria)
            #camada_poligonos.dataProvider().addAttributes([camada_pontos.fields().field(nome_campo)])
            camada_poligonos.dataProvider().addAttributes([QgsField(nome_camposf, QVariant.Double)])
            camada_poligonos.updateFields()

    # Salvar as alterações
    camada_poligonos.commitChanges()
```

```

pontos_dentro_de_poligonos = {}
camada_pontos.startEditing()

# Percorrer os polígonos
for poligono in camada_poligonos.getFeatures():
    # Geometria do polígono
    #poligono_id = poligono.id()
    geometria_poligono = poligono.geometry()
    # Dicionário para armazenar a soma e a contagem de valores por campo
    soma_e_contagem_por_campo = {nome_campo: {'soma': 0, 'contagem': 0} for nome_campo in
nomes_campos_pontos}

    if tipo_calc == "Média":
        # Percorrer os pontos e verificar se cada ponto está dentro do polígono
        for ponto in camada_pontos.getFeatures():
            geometria_ponto = ponto.geometry()
            try:
                if geometria_poligono.contains(geometria_ponto):
                    for nome_campo in nomes_campos_pontos:
                        valor_do_campo = ponto[nome_campo]
                        soma_e_contagem_por_campo[nome_campo]['soma'] += valor_do_campo
                        soma_e_contagem_por_campo[nome_campo]['contagem'] += 1
                        print(f'Ponto ID {ponto.id()} dentro de Polígono ID {poligono.id()}')
            except Exception as e:
                print(f"Erro: {e}")
        # Calcular a média para cada campo e atualizar o campo correspondente do polígono
        for nome_campo in nomes_campos_pontos:
            soma = soma_e_contagem_por_campo[nome_campo]['soma']
            contagem = soma_e_contagem_por_campo[nome_campo]['contagem']
            nome_campo_atualizado = nome_campo.replace('field', 'trajetoria')
            if contagem > 0:
                media = soma / contagem
                #print(media)
                # Atualizar o campo correspondente do polígono com o valor da média
                #camada_poligonos.dataProvider().changeAttributeValues({poligono.id():
{camada_poligonos.fields().indexOfName(nome_campo): media}})
                camada_poligonos.dataProvider().changeAttributeValues({poligono.id():
{camada_poligonos.fields().indexOfName(nome_campo_atualizado): media}})

    if tipo_calc == "Média Ponderada":
        # Percorrer os pontos e verificar se cada ponto está dentro do polígono
        for ponto in camada_pontos.getFeatures():
            geometria_ponto = ponto.geometry()
            try:
                if geometria_poligono.contains(geometria_ponto):
                    ponto_central = geometria_poligono.centroid().asPoint()
                    distancia = math.sqrt((ponto.geometry().asPoint().x() - ponto_central.x())**2 +
(ponto.geometry().asPoint().y() - ponto_central.y())**2)
                    for nome_campo in nomes_campos_pontos:
                        valor_do_campo = ponto[nome_campo]
                        #peso = 1.0 / (distancia + 1e-10) # evitar divisão por zero
                        peso = distancia
                        soma_e_contagem_por_campo[nome_campo]['soma'] += (valor_do_campo * (1 /
math.pow(peso, 2)))
                        soma_e_contagem_por_campo[nome_campo]['contagem'] += (1 / math.pow(peso, 2))
                        print(f'Ponto ID {ponto.id()} a {round(distancia, 2)}m dentro do Polígono ID {poligono.id()}')
            except Exception as e:

```

```

        print(f"Erro: {e}")
    for nome_campo in nomes_campos_pontos:
        soma = soma_e_contagem_por_campo[nome_campo]['soma']
        contagem = soma_e_contagem_por_campo[nome_campo]['contagem']
        nome_campo_atualizado = nome_campo.replace('field', 'trajetoria')
        if contagem > 0:
            media = soma / contagem
            #print(media)
            # Atualizar o campo correspondente do polígono com o valor da média
            #camada_poligonos.dataProvider().changeAttributeValues({poligono.id():
{camada_poligonos.fields().indexFromName(nome_campo): media}})
            camada_poligonos.dataProvider().changeAttributeValues({poligono.id():
{camada_poligonos.fields().indexFromName(nome_campo_atualizado): media}})

    # Salvar as alterações
    camada_pontos.commitChanges()
    # Limpar a memória
    camada_pontos.triggerRepaint()
except Exception as e:
    print(f"Erro durante a leitura do arquivo temporário: {str(e)}")

```