



# Aplicação dos GNSS à avaliação da estabilidade de Radiómetros de Micro-ondas e de Modelos Atmosféricos Globais

Telmo André Pereira Vieira

Mestrado em Engenharia Geográfica

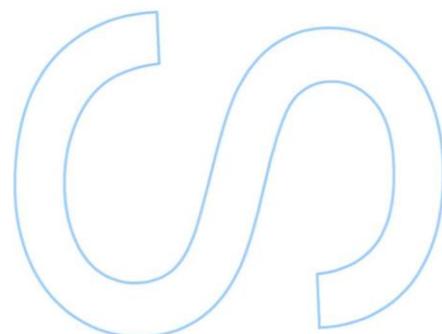
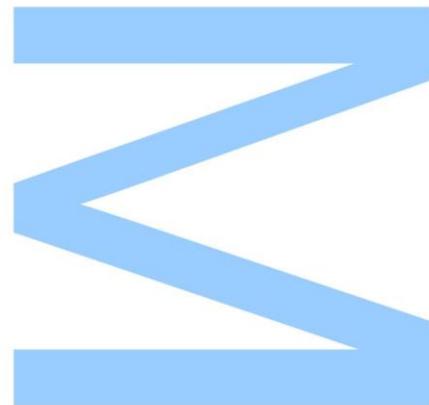
Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território  
2015

## **Orientador**

Maria Joana Afonso Pereira Fernandes, Professora Auxiliar,  
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

## **Coorientador**

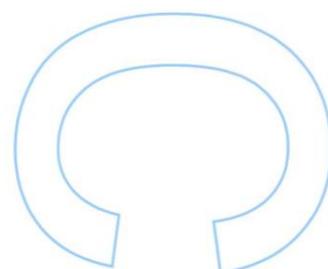
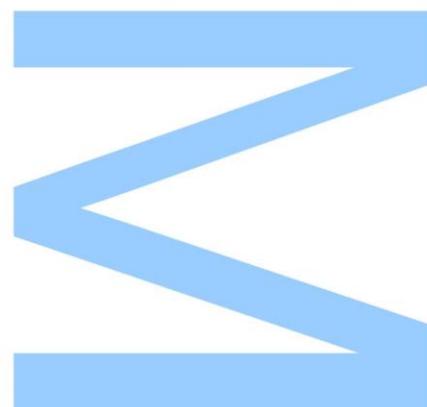
Maria Clara Gomes Quadros Lázaro da Silva, Professora Auxiliar,  
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto





Todas as correções determinadas pelo júri, e só essas, foram efetuadas. O Presidente do Júri,

Porto, \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_



# Agradecimentos

Este trabalho traduz-se na conclusão de uma etapa feliz e, simultaneamente, no princípio de um percurso cheio de ambição, sempre na companhia do gosto pela Engenharia Geográfica e tudo que a representa. A sua realização desperta o dever de agradecer a todas as pessoas que me acompanharam de alguma forma.

Às professoras Joana Fernandes e Clara Lázaro pela confiança e oportunidade de conhecer a Altimetria por Satélite. Ainda à professora Joana por todo o acompanhamento, paciência e orientação prestada ao longo de todo o trabalho.

Ao Nelson por toda a contextualização e ensinamentos iniciais.

A todos os professores que eficientemente me transmitiram o conhecimento em cinco anos de aprendizagem e evolução.

Aos colegas, amigos e companheiros de trabalho, nomeadamente a Eliana, o Óscar e a Ana, que igualmente percorreram esta caminhada e com os quais partilho a contemporaneidade académica.

Aos meus pais, irmã e toda a minha família pelo orgulho e admiração que sentem por mim e que sempre me acompanham e constituem parte da força e inspiração para seguir novas aventuras.

Um agradecimento especial aos meus tios Albertino e Emília e respetiva subfamília por me proporcionarem um ambiente familiar naquele que viria a ser o período mais interessante e desafiante da minha vida até então.

Por fim, à Raquel pelo gosto académico que inspira em mim e pela sua peculiar personalidade, que se traduz num sentimento de orgulho mútuo.

Os agradecimentos a alguém resultam também da forma como é inspiradora a sua presença em cada momento. Assim sendo, agradeço também a todas as pessoas, que estão permanente e ininterruptamente comigo, apesar da ausência física, mas cujo sentimento e lembrança jamais terminarão.

Obrigado!

# Resumo

A Altimetria por Satélite tem como principal objetivo a determinação e monitorização do nível do mar à escala global. As medidas efetuadas estão sujeitas a um conjunto de erros, que precisam ser devidamente corrigidos, tais como a correção devida à componente húmida da troposfera (*Wet Tropospheric Correction, WTC*). Devido à sua grande variação espaço-temporal, esta é ainda uma das maiores fontes de erro na Altimetria por Satélite. Por esse motivo, a forma mais precisa de modelar a WTC é através de medidas dos radiómetros de micro-ondas colocados a bordo dos satélites altimétricos. A WTC pode também ser determinada a partir de atrasos troposféricos zenitais (*Zenith Tropospheric Delays, ZTD*) estimados com GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), em estações costeiras, ou a partir de modelos atmosféricos globais, tal como o ERA Interim do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF).

A estabilidade das correções aplicadas às medidas de Altimetria por Satélite é crucial, uma vez que qualquer deriva nestas correções tem um impacto direto no valor da variação do nível do mar, determinado com esta técnica espacial. Assim sendo é importante garantir o rigor destas correções.

O objetivo deste estudo é a exploração dos ZTD estimados com GNSS na avaliação da estabilidade dos radiómetros de micro-ondas e dos modelos atmosféricos globais, como fonte de cálculo da WTC. O estudo é desenvolvido em três etapas fundamentais: cálculo e análise de ZTD num conjunto selecionado de estações costeiras com distribuição global (ZTD UPorto); comparação dos ZTD com os valores correspondentes do modelo atmosférico ERA Interim e, por fim, utilização dos GNSS na comparação com radiómetros de micro-ondas, a bordo de vários satélites altimétricos.

Os resultados mostram que os ZTD GNSS apresentam uma precisão de poucos milímetros (4-6 mm) e que, em processamentos em rede, a distribuição geográfica e o número de estações são parâmetros cruciais na precisão dos ZTD. A comparação ERA Interim-GNSS apresenta valores médios de desvio-padrão da ordem dos 10-13 mm e as diferenças ERA Interim-IGS apresentam uma tendência negativa significativa, o que não acontece com as diferenças ERA Interim-UPorto. A avaliação da estabilidade dos radiómetros de micro-ondas, a partir da WTC determinada com GNSS, não apresenta resultados totalmente conclusivos, no entanto são obtidas tendências semelhantes a outros estudos em curso, nomeadamente comparações entre diferentes radiómetros.

# Abstract

The main goal of Satellite Altimetry is to compute and monitor the sea level at global scale. The performed measurements are affected by a set of errors that need be properly corrected, such as the wet tropospheric correction (WTC). Due to its large spatial-temporal variability, this is still a major error source in Satellite Altimetry. For this purpose, the most accurate way to model the WTC is through microwave radiometer (MWR) measurements, which are instruments on board altimetry satellites. WTC can also be computed from the zenith tropospheric delays (ZTD) estimated from Global Navigation Satellite Systems (GNSS), at coastal stations, or from global atmospheric models, such as ERA Interim, a reanalysis model of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF).

The stability of the corrections applied to Satellite Altimetry measurements is a crucial step, since any drift in these corrections has a direct impact in the sea level variation, computed with this technique. Therefore, it is important ensure the accuracy and stability of these corrections.

The aim of this study is to analyse the feasibility of using ZTD estimated with GNSS, in the assessment of the stability of the microwave radiometers and global atmospheric models, all being different ways to estimate the WTC. The study is developed in three main steps: computation and analysis of the ZTD of a selected set of coastal stations, with global distribution (ZTD UPorto); comparison of the previous values with the corresponding ones from the atmospheric model ERA Interim and, finally, comparison between GNSS-derived WTC and those derived from microwave radiometers, on board of several altimetry satellites.

The results show that GNSS-derived ZTD have an accuracy of a few millimetres (4-6 mm) and, in the processing of a station network, the geographical distribution and the number of stations are crucial parameters which influence the accuracy of the estimated ZTD. The comparison between ERA Interim-and GNSS shows a mean standard deviation of the differences of 10-13 mm and the ERA Interim-IGS differences have a significant negative trend, which does not happen with ERA Interim-UPorto differences. So far, the assessment of the microwave radiometers stability, using the WTC estimated with GNSS, does not allow to reach results totally conclusive, but the trends obtained are similar to other ongoing studies, namely comparisons between different radiometers.

# Conteúdo

Agradecimentos.....	iii
Resumo .....	iv
Abstract .....	v
Índice de Figuras .....	viii
Índice de Tabelas .....	xi
Acrónimos.....	xii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento do Estudo .....	1
1.2. Objetivos .....	4
1.3. Estrutura do Estudo .....	4
2. Conceitos em Estudo.....	7
2.1. Atrasos troposféricos zenitais .....	7
2.1.1. GAMIT .....	9
2.1.2. International GNSS Service (IGS).....	9
2.1.3. EUREF Permanent Network (EPN) .....	10
2.2. Modelos Atmosféricos Globais.....	11
2.2.1. ERA Interim .....	12
2.3. Altimetria por Satélite.....	12
2.3.1. Missões Altimétricas .....	14
2.4. Diferentes fontes de informação .....	17
3. Cálculo e análise de atrasos troposféricos.....	18
3.1. Cálculo de ZTD para um conjunto de estações de referência.....	18
3.2. Comparação de diferentes soluções GNSS.....	20
3.2.1. Análise por estação .....	22
3.3. Comparação entre redes UPorto .....	27
4. Comparação de ZTD entre GNSS e Modelo Atmosférico .....	31
4.1. Diferenças entre ZTD ERA Interim e ZTD GNSS.....	31

4.1.1. Análise por estação .....	33
4.2. Comportamento das diferenças em função da latitude .....	37
4.3. Estabilidade dos ZTD ERA Interim .....	39
5. ZTD estimados por GNSS na monitorização dos Radiómetros de Micro-ondas...	42
5.1. Seleção de pontos junto à costa .....	42
5.2. Interpolação temporal .....	44
5.3. Diferenças em função da distância à costa.....	45
5.4. Diferenças em função da distância à estação.....	50
5.5. Diferenças em função da latitude.....	53
5.6. Estabilidade dos MWR ao longo do tempo .....	55
6. Conclusões .....	59
Referências .....	61
Anexo A.....	65
Anexo B.....	67
Anexo C.....	70

## Índice de Figuras

<b>Figura 2.1</b> – Estações IGS em agosto de 2015 (IGS, 2015).....	10
<b>Figura 2.2</b> – Estações EPN em agosto de 2015 (EPN, 2015) .....	11
<b>Figura 2.3</b> – Observações meteorológicas (ECMWF, 2015).....	12
<b>Figura 2.4</b> – Princípio básico da Altimetria por Satélite (Radar Altimetry Tutorial, 2015) .....	13
<b>Figura 2.5</b> – Satélite JASON-2 (JPL, 2015).....	15
<b>Figura 2.6</b> – Períodos de funcionamento das várias missões altimétricas.....	16
<b>Figura 2.7</b> – Extrato da representação espacial das três fontes de informação em análise .....	17
<b>Figura 3.1</b> – Primeira rede.....	19
<b>Figura 3.2</b> – Segunda rede.....	19
<b>Figura 3.3</b> – Terceira rede.....	20
<b>Figura 3.4</b> – Estimção dos ZTD no tempo por cada solução .....	21
<b>Figura 3.5</b> – Média das diferenças de ZTD entre soluções para as estações da primeira rede .....	22
<b>Figura 3.6</b> – Média das diferenças de ZTD entre soluções para as estações da segunda rede .....	23
<b>Figura 3.7</b> – Média das diferenças de ZTD entre soluções para as estações da terceira rede .....	23
<b>Figura 3.8</b> – Desvio-padrão das diferenças de ZTD entre soluções para as estações da primeira rede .....	24
<b>Figura 3.9</b> – Desvio-padrão das diferenças de ZTD entre soluções para as estações da segunda rede.....	24
<b>Figura 3.10</b> – Desvio-padrão das diferenças de ZTD entre soluções para as estações da terceira rede.....	24
<b>Figura 3.11</b> – Diferenças de ZTD entre UPorto e IGS para as estações FALE e BAKO .....	25
<b>Figura 3.12</b> – Diferenças de ZTD entre UPorto e IGS para as estações MAS1 e REYK .....	25
<b>Figura 3.13</b> – Diferenças de ZTD entre EPN e IGS para as estações MAS1 e REYK	26
<b>Figura 3.14</b> – Diferenças de ZTD entre UPorto e EPN para as estações MAS1 e REYK .....	26
<b>Figura 3.15</b> – Diferenças de ZTD UPorto3 IGS para as estações ALBH e TOW2 .....	27

<b>Figura 3.16</b> – EMQ das diferenças entre ZTD da mesma estação estimados em redes diferentes.....	28
<b>Figura 3.17</b> – Diferenças entre os ZTD da mesma estação estimados em redes diferentes.....	28
<b>Figura 3.18</b> – Número de observações e estações por dia da terceira rede.....	29
<b>Figura 3.19</b> – Diferenças de ZTD UPorto3 EPN para a estação RIGA .....	30
<b>Figura 3.20</b> – EMQ recalculado das diferenças entre ZTD da mesma estação estimados em redes diferentes .....	30
<b>Figura 4.1</b> – Média das diferenças de ZTD entre ERA Interim e GNSS para cada estação da primeira rede.....	33
<b>Figura 4.2</b> – Média das diferenças de ZTD entre ERA Interim e GNSS para cada estação da segunda rede.....	33
<b>Figura 4.3</b> – Média das diferenças de ZTD entre ERA Interim e GNSS para cada estação da terceira rede.....	34
<b>Figura 4.4</b> – Desvio-padrão das diferenças de ZTD entre ERA Interim e GNSS para cada estação da primeira rede.....	35
<b>Figura 4.5</b> – Desvio-padrão das diferenças de ZTD entre ERA Interim e GNSS para cada estação da segunda rede.....	35
<b>Figura 4.6</b> – Desvio-padrão das diferenças de ZTD entre ERA Interim e GNSS para cada estação da terceira rede.....	35
<b>Figura 4.7</b> – Diferenças de ZTD entre ERA Interim e IGS para as estações MAS1 e REYK.....	36
<b>Figura 4.8</b> – Diferenças de ZTD entre ERA Interim e UPorto para as estações ALRT e ALBH.....	37
<b>Figura 4.9</b> – Desvio-padrão das diferenças ERA Interim UPorto em função da latitude de cada estação .....	38
<b>Figura 4.10</b> – Desvio-padrão da WTC (em centímetros) extraído de (Fernandes, et al., 2013) .....	38
<b>Figura 4.11</b> – Diferenças suavizadas de ZTD entre ERA Interim e GNSS.....	40
<b>Figura 5.1</b> – Estações GNSS utilizadas e representação dos passes 2, 3, 4 e 5 do ciclo 3 do JASON-1.....	43
<b>Figura 5.2</b> – Pontos selecionados (a azul) para o ciclo 1 do ERS-2 numa parte da região da Europa em torno das estações GNSS (a preto) .....	43
<b>Figura 5.3</b> – EMQ por classes das diferenças de ZWD em função da distância à costa para o ERS-2.....	46
<b>Figura 5.4</b> – EMQ por classes das diferenças em função da distância à costa para o ENVISAT .....	46

<b>Figura 5.5</b> – EMQ por classes das diferenças em função da distância à costa para o JASON-1 .....	47
<b>Figura 5.6</b> – EMQ por classes das diferenças em função da distância à costa para o JASON-2 .....	47
<b>Figura 5.7</b> – EMQ por classes das diferenças em função da distância à costa para o SARAL/AltiKa .....	48
<b>Figura 5.8</b> – EMQ por classes das diferenças em função da distância à costa para o TOPEX/Poseidon.....	48
<b>Figura 5.9</b> – EMQ das diferenças de ZWD por classes das diferenças em função da distância à estação para o ERS-2.....	50
<b>Figura 5.10</b> – EMQ por classes das diferenças em função da distância à estação para o ENVISAT .....	51
<b>Figura 5.11</b> – EMQ por classes das diferenças em função da distância à estação para o JASON-1 .....	51
<b>Figura 5.12</b> – EMQ por classes das diferenças em função da distância à estação para o JASON-2 .....	52
<b>Figura 5.13</b> – EMQ por classes das diferenças em função da distância à estação para o SARAL/AltiKa.....	52
<b>Figura 5.14</b> – EMQ por classes das diferenças em função da distância à estação para o TOPEX/Poseidon.....	53
<b>Figura 5.15</b> – Diferenças de ZWD entre GNSS e radiómetro em função da latitude para o satélite ENVISAT .....	54
<b>Figura 5.16</b> – Diferenças de ZWD entre GNSS e radiómetro em função da latitude para o satélite JASON-1 .....	54
<b>Figura 5.17</b> - Diferenças filtradas de ZWD entre GNSS e radiómetros do ERS-2, ENVISAT e SARAL/AltiKa em função do tempo .....	55
<b>Figura 5.18</b> – Diferenças de ZWD entre GNSS e radiómetro em função do tempo das missões da parceria NASA CNES .....	56

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 2.1</b> – Missões altimétricas da parceria NASA CNES.....	15
<b>Tabela 2.2</b> – Missões altimétricas da ESA.....	15
<b>Tabela 3.1</b> – Estações permanentes usadas para a comparação de soluções GNSS. Para detalhes sobre o significado das cores consultar o texto. ....	21
<b>Tabela 5.1</b> – Declive da reta de ajuste pelos mínimos quadrados às diferenças filtradas de ZWD entre GNSS e radiómetros em milímetros por ano.....	57

# Acrónimos

CNES	Centre National D'Études Spatiales
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EMQ	Erro Médio Quadrático
ENVISAT	Environmental Satellite
EPN	EUREF Permanent Network
ERA Interim	ECMWF Reanalysis Interim
ERS	European Remote Sensing
ESA	European Space Agency
ETRS	European Terrestrial Reference Frame
GIPSY/OASIS	GNSS-Inferred Positioning System and Orbit Analysis Simulation Software
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPD	GNSS - derived Path Delay
GPT	Global Pressure and Temperatures
IGS	International GNSS Service
ISRO	Indian Space Research Organisation
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
JPL	Jet Propulsion Laboratory
MJD	Modified Julian Date
MSL	Mean Sea Level
MWR	Microwave Radiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OSTM	Ocean Surface Topography Mission
PPP	Precise Point Positioning
SARAL/AltiKa	Satellite with Argos and AltiKa
SLP	Sea Level Pressure
SSH	Sea Surface Height
STD	Slant Total Delay
TCWV	Total Column Water Vapor
TOPEX/Poseidon	Topographic Experiment/Poseidon
UTC	Universal Time Coordinated
VMF	Vienna Mapping Functions
WTC	Wet Tropospheric Delay
ZHD	Zenith Hydrostatic Delay

ZTD	Zenith Tropospheric Delay
ZWD	Zenith Wet Delay

## Capítulo I

### 1. Introdução

Neste primeiro capítulo faz-se a contextualização do trabalho desenvolvido nesta tese, fazendo referência à área de investigação em que o mesmo se insere. Depois de introduzir o estudo são referidos os objetivos do mesmo e, por fim, descreve-se brevemente a sua estrutura. Nesta primeira parte são referidos alguns conceitos que serão abordados de uma forma mais detalhada em capítulos seguintes.

#### 1.1. Enquadramento do Estudo

A dinâmica do planeta Terra é um fator que importa estudar por diversos motivos e cujo conhecimento é útil a um alargado leque de áreas de investigação. A determinação e monitorização do nível do mar e o mapeamento da superfície oceânica são exemplos concretos dos estudos que são realizados, com o objetivo de conhecer e prever o estado do oceano. Atualmente medidas de satélites artificiais, em órbita em torno da Terra, permitem a aquisição de informação geográfica à escala global. A Altimetria por Satélite é uma técnica espacial, que tem como principal objetivo a determinação da altura da água do mar relativamente a uma superfície de referência, no entanto outras medidas são também realizadas, tais como a altura significativa das ondas marinhas e a intensidade do sinal de retorno ou *backscatter* (Chelton, et al., 2001).

O princípio básico de funcionamento deste método de aquisição de informação Geoespacial, essencialmente dedicado ao oceano, é muito simples: o altímetro radar, a bordo do satélite altimétrico, envia um pulso na direção nadiral, que é refletido na superfície oceânica e recebido novamente pelo altímetro. Durante o seu percurso é calculado o tempo, que permite determinar a distância vertical entre o satélite e a superfície do mar em cada ponto, para o qual é conhecida a altura do satélite relativamente a uma superfície de referência (Chelton, et al., 2001). Conhecidas estas duas quantidades (distância medida entre o satélite e a superfície do mar e a distância conhecida entre o mesmo satélite e a superfície de referência) a altura

do nível do oceano relativamente à mesma superfície de referência é facilmente calculada, permitindo a determinação e monitorização do nível do mar à escala global e regional.

Associado às medidas altimétricas está um conjunto de erros que deve ser devidamente tomado em consideração, uma vez que o rigor das correções aplicadas em altimetria terá impacto direto, por exemplo, no nível médio do mar (*Mean Sea Level*, MSL) determinado com esta técnica. O nível de rigor com que atualmente se determina o MSL está diretamente dependente da precisão com que são modeladas as diversas correções, que devem ser devidamente aplicadas.

Uma das maiores fontes de erro a considerar nas medidas efetuadas no âmbito das várias missões altimétricas é o atraso devido à componente húmida da troposfera, causado nos sinais altimétricos ao atravessarem esta camada da atmosfera (Fernandes, et al., 2015). Esta fonte de erro traduz-se numa correção a considerar designada por *wet tropospheric correction* (WTC). Devido às características da troposfera, esta correção apresenta uma elevada variabilidade, tanto no espaço como no tempo e, por isso, a forma mais precisa de modelar este efeito é através de medidas de radiómetros de micro-ondas (*microwave radiometer*, MWR), instrumentos colocados a bordo dos satélites altimétricos, que determinam a WTC em cada ponto (Fernandes, et al., 2015).

No que diz respeito a oceano aberto, as medidas dos MWR apresentam grande precisão, cerca de 1 cm (Keihm, et al., 1995), no entanto em zonas costeiras a precisão dessas medidas é limitada pela contaminação da terra. Deste modo, a precisão das medidas de Altimetria por Satélite em zonas costeiras é reduzida devido a fatores tais como a degradação das medidas dos MWR, a dificuldade em modelar a maré oceânica e os efeitos do estado do mar. As diversas missões altimétricas foram desenvolvidas e pensadas para o oceano, na medida em que os algoritmos que determinam a WTC, com base nas medidas efetuadas pelos radiómetros de micro-ondas, assumem uma constante para a emissividade da superfície oceânica. Quando estão presentes outras superfícies na pegada (*footprint*) do MWR, como por exemplo terra ou gelo, a constante de emissividade para estas superfícies é diferente, o que torna as medidas do MWR inválidas em zonas costeiras e polares (Fernandes, et al., 2015). Esta contaminação da terra é tanto maior quanto maior o tamanho da pegada do radiómetro, que depende da frequência do instrumento (Fernandes, et al., 2013).

A WTC pode também ser obtida a partir de atrasos troposféricos zenitais (*zenith tropospheric delays*, ZTD) estimados com GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) e também a partir de modelos atmosféricos globais, nomeadamente nestas regiões do planeta, para as quais as medidas dos MWR são inválidas e não apresentam precisão suficiente. O ZTD pode ser separado em duas componentes: o atraso devido à componente hidrostática (*zenith hydrostatic delay*, ZHD) e o atraso devido à componente húmida (*zenith wet delay*, ZWD). O

ZHD apesar de corresponder a cerca de 90% do atraso troposférico total (~2.3 m ao nível do mar) é facilmente modulado com elevada precisão (melhor que 1 cm) através de modelos globais de pressão atmosférica à superfície. O ZWD, apesar de apresentar um valor absoluto inferior (< 0.5 m), apresenta uma elevada variabilidade espaço-temporal, o que o torna difícil de modelar (Fernandes, et al., 2013). A estimação dos ZTD com GNSS e os valores de ZHD obtidos com precisão a partir de modelos atmosféricos permitem determinar o ZWD, a partir do qual se obtém a WTC ( $WTC=ZWD$ ), correção importante para a Altimetria por Satélite.

A troposfera tem a característica de ser um meio não dispersivo para uma determinada zona do espectro eletromagnético (frequências inferiores a 15 GHz (Hay & Wong, 2000)), o que significa que os efeitos troposféricos nos sinais pertencentes a esta zona do espectro eletromagnético não dependem da frequência. Estando os sinais utilizados em GNSS e em Altimetria por Satélite nesta zona do espectro, as correções aplicadas são as mesmas, pelo que o ZWD estimado com GNSS pode também ser utilizado para corrigir as medidas de Altimetria por Satélite.

No âmbito do desenvolvimento de metodologias para a determinação da WTC para a altimetria costeira, usando ZTD estimados com GNSS, diversos estudos têm sido desenvolvidos com o objetivo de melhorar a estimação dos ZTD com GNSS à escala global (Fernandes, et al., 2013). Atualmente existem metodologias estabelecidas que utilizam os ZTD estimados com GNSS e modelos atmosféricos globais para determinar a WTC em zonas costeiras, em pontos para os quais as medidas dos radiómetros são inválidas (Fernandes, et al., 2010), (Fernandes, et al., 2015). O crescente número de estações GNSS, nomeadamente costeiras, que formam redes como a EPN (*EUREF Permanent Network*) ou o IGS (*International GNSS Service*), determinam os ZTD de forma contínua e sistemática. Atualmente estes atrasos são determinados, em cada estação, com a precisão de poucos milímetros (Pacione, et al., 2011).

Os modelos atmosféricos globais apresentam-se sob a forma de grelha com uma determinada resolução espacial, por exemplo  $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ , em que para cada nó da grelha estão disponíveis diversos parâmetros atmosféricos, que permitem determinar o ZTD em cada ponto. Estas grelhas são geradas com determinada frequência, por exemplo de 6 em 6 horas, o que define a resolução temporal desta fonte de informação.

Uma vez que os modelos atmosféricos são atualmente uma fonte de informação usada para complementar e melhorar a Altimetria por Satélite, assim como os ZTD estimados com GNSS, torna-se importante estudar e garantir a estabilidade destas fontes de informação, para que a combinação de dados seja vantajosa e confira melhor precisão aos produtos altimétricos finais.

Sendo a WTC uma correção importante a considerar no âmbito da Altimetria por Satélite é importante garantir a precisão e estabilidade das medidas dos radiómetros de micro-ondas. Tal como referido anteriormente, a lacuna destas medidas em zonas costeiras é resolvida com metodologias que usam outras fontes de informação. Ainda assim é necessário garantir a estabilidade a longo prazo das medidas dos MWR, sobretudo se usadas para estudos climáticos. A monitorização e o estudo da estabilidade dos MWR poderá ser feita através da comparação entre diferentes radiómetros ou utilizando a informação estimada com GNSS (Sibthorpe, et al., 2011). Estudos com radiómetros de algumas missões altimétricas mostram que estes instrumentos são sujeitos a uma pequena, mas sistemática calibração (Brown, et al., 2004). Comparações entre MWR e GNSS podem ser usadas para detetar derivas e saltos nas medidas dos instrumentos que determinam a WTC (Haines & Bar-Sever, 1998), (Desai & Haines, 2004). A estabilidade dos MWR é especialmente importante para manter a precisão das medidas altimétricas, na medida em que se torna essencial a sua análise, nomeadamente em comparações com informação independente, como o caso dos GNSS.

## 1.2. Objetivos

Sendo as estações GNSS e modelos atmosféricos globais fontes de informação utilizadas no âmbito da Altimetria por Satélite, nomeadamente em regiões costeiras, é importante garantir o rigor e a estabilidade desta informação, uma vez que terá impacto direto na precisão das medidas altimétricas.

Com este estudo pretende-se, por um lado, avaliar a precisão e estabilidade dos ZTD estimados a partir de GNSS, através da comparação de diferentes soluções e da comparação destas com um modelo atmosférico e, por outro, investigar a possibilidade de usar estes dados para avaliar a estabilidade dos radiómetros de micro-ondas, a bordo dos satélites altimétricos. Sendo estes instrumentos determinadores da WTC, uma das correções mais importantes no âmbito da Altimetria por Satélite, qualquer deriva instrumental introduzirá incerteza nas medidas altimétricas, com impacto direto na estimativa da variação do nível do mar.

## 1.3. Estrutura do Estudo

A primeira fase do estudo consiste em escolher um conjunto de aproximadamente 60 estações permanentes, para as quais são determinados os ZTD usando o software GAMIT (Herring, et al., 2010), de modo a constituírem os ZTD de referência (designados por ZTD UPorto). A escolha das estações baseou-se em diversos fatores, nomeadamente a extensão do período de observação, a distribuição geográfica e a distância à costa. Para este conjunto de estações faz-se a análise à qualidade dos ZTD a partir da comparação dos mesmos

atrasos fornecidos por soluções GNSS diferentes: IGS, EPN e UPorto. Esta análise faz-se também a partir da comparação entre diferentes processamentos no GAMIT.

A segunda etapa deste trabalho passou pela comparação dos ZTD obtidos com GNSS (estimados e analisados na primeira fase do estudo) com os valores correspondentes derivados a partir de um modelo atmosférico global: o ERA Interim do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Dadas as diferentes características das duas fontes de informação a serem comparadas (resolução temporal e espacial, etc.), esta análise inclui interpolação no espaço e no tempo. Nesta etapa são analisados os parâmetros estatísticos e a tendência das diferenças entre o modelo e GNSS (UPorto e IGS) ao longo do tempo.

A terceira e última fase do estudo consistiu em comparar a informação estimada pelos GNSS com a correspondente informação determinada pelos radiómetros de micro-ondas. Com esta última análise pretende-se perceber o comportamento da informação obtida pelos radiómetros em regiões costeiras, quando comparada com a informação dos GNSS. Esta comparação pretende detetar eventuais saltos e/ou deriva nas diferenças em função do tempo, verificando a estabilidade das medidas dos radiómetros em comparação com a informação estimada por GNSS. Para além disso pretende-se perceber o comportamento das diferenças em função da distância à costa de modo a determinar a distância para a qual as diferenças entre GNSS e MWR são mínimas, ou seja, concluir relativamente ao rigor das medidas dos MWR a bordo das várias missões altimétricas em regiões costeiras.

Uma grande parte do trabalho apresentado é caracterizada por uma extensiva análise estatística, no que toca a comparação de valores obtidos por fontes de informação distintas. Parâmetros estatísticos como a média, desvio-padrão e erro médio quadrático (EMQ) são largamente utilizados para caracterizar de forma objetiva as comparações realizadas. No domínio do Processamento de Sinal são utilizados filtros e regressões lineares para o estudo da tendência nos dados em análise. A programação desenvolvida ao longo do estudo foi feita maioritariamente em MATLAB, sendo apenas uma parte muito pequena em Fortran. Também foi utilizado o Surfer 11 para a visualização da distribuição geográfica das estações GNSS em estudo e outra informação geográfica.

Em suma, no segundo capítulo faz-se uma introdução teórica e abordagem inicial aos conceitos em estudo. No terceiro capítulo descrevem-se os procedimentos para o cálculo dos ZTD UPorto e as diversas comparações para avaliar o rigor dos mesmos. No quarto capítulo os ZTD da seção anterior são comparados com os correspondentes obtidos a partir do modelo atmosférico de reanálise ERA Interim, para verificar o comportamento das diferenças ao longo do tempo e detetar possíveis erros nos ZTD determinados com GNSS. No capítulo 5 os ZTD estimados com GNSS são utilizados para estudar a estabilidade da informação dos

radiómetros de micro-ondas e por fim, no último capítulo, referem-se as principais conclusões do estudo, as considerações finais e orientações futuras.

## Capítulo II

### 2. Conceitos em Estudo

Com o avanço tecnológico verificado nas técnicas usadas na Engenharia Geográfica, nomeadamente na Detecção Remota, a Altimetria por Satélite apresenta-se como uma forma de aquisição de Informação Geográfica à escala global. Os satélites de observação da Terra configuram uma mudança de paradigma na forma como o Homem adquire informação georreferenciada, observa e estuda o planeta Terra. Os GNSS permitem também a aquisição de informação Geoespacial, com base numa constelação de satélites artificiais em órbita da Terra.

O conteúdo deste capítulo desenvolve-se em torno dos conceitos e definições abordados e relacionados com o tema em questão. Os atrasos troposféricos são referidos no âmbito da Altimetria por Satélite e dos GNSS, assim como as suas diversas proveniências.

Neste capítulo são também referidas e caracterizadas brevemente todas as fontes de informação utilizadas ao longo de todo o estudo, tais como as redes de estações permanentes (IGS e EPN), o modelo atmosférico e as missões altimétricas.

#### 2.1. Atrasos troposféricos zenitais

A atmosfera tem um papel fulcral para a vida no planeta Terra. No entanto, para as técnicas espaciais de aquisição de informação geográfica, em que se pretendem efetuar medidas com o máximo rigor, a sua presença torna-se indesejável (Niell, et al., 2000). Por outro lado, uma vez que as medidas são afetadas pela atmosfera, as mesmas técnicas espaciais permitem determinar as suas propriedades (Niell, et al., 2000).

Entre os diversos efeitos sobre os sinais que atravessam a atmosfera, destaca-se o atraso provocado nas ondas rádio na mais baixa camada da atmosfera terrestre: a troposfera. O atraso total causado pela troposfera na direção do zénite, o atraso troposférico zenital (ZTD), pode ser separado em duas componentes, a componente seca (ou hidrostática) e a componente húmida. Esta relação é representada pela seguinte expressão:

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (1)$$

onde o ZTD é o *Zenith Tropospheric Delay*, o ZHD é o *Zenith Hydrostatic Delay* e o ZWD é o *Zenith Wet Delay* (Fernandes, et al., 2013).

A componente seca, que corresponde a cerca de 90% do atraso total, tem um valor médio ao nível do mar de 2.3 metros e é modelada com elevada precisão (Fernandes, et al., 2013). Esta componente é causada por gases secos presentes na troposfera e varia com a temperatura e a pressão atmosférica. A componente húmida, apesar de corresponder a apenas 10% do atraso troposférico total, apresenta uma variabilidade elevada e por isso é difícil de modelar (Fernandes, et al., 2013). Esta componente é causada pelo vapor de água e pelas nuvens e depende das condições meteorológicas, podendo apresentar valores até 0.5 metros (Sibthorpe, et al., 2011), (Keihm, et al., 1995).

Os atrasos troposféricos estimados com GNSS tornaram-se nos últimos anos um produto sistemático fornecido pelos centros de análise que fazem parte das diversas redes de estações permanentes. Atualmente os ZTD são determinados em cada estação com a precisão de poucos milímetros (Niell, et al., 2000), (Pacione, et al., 2011).

Entre as diversas aplicações destes valores obtidos com GNSS destacam-se aquelas que são contempladas neste estudo: a monitorização de radiómetros de micro-ondas a bordo de satélites altimétricos (Sibthorpe, et al., 2011), (Desai & Haines, 2004) e a sua utilidade na altimetria costeira (Fernandes, et al., 2010) e também aplicações no domínio da meteorologia, como os modelos atmosféricos globais.

A modelação do atraso troposférico utilizando os GNSS é feita de acordo com a equação seguinte:

$$STD(E) = ZHDMf_h(E) + ZWDMf_w(E) \quad (2)$$

onde o STD é o *Slant Total Delay*, E é o ângulo de elevação do satélite e  $mf_h$  e  $mf_w$  são as funções de mapeamento para a componente seca e húmida, respetivamente.

Quando um sinal viaja de um satélite, com um determinado ângulo de elevação E, até um recetor sofre um atraso na troposfera, designado por STD. Sendo este atraso também uma fonte de erro no posicionamento GNSS, torna-se necessária a sua estimação adequada, pelo que os valores dos atrasos atmosféricos são estimados nos processamentos GNSS.

Uma vez que a maioria das observações não são feitas na direção do zénite, na prática o que é medido é o STD, sendo que os valores de ZTD são obtidos a partir das funções de mapeamento que relacionam as duas variáveis em função do ângulo de elevação. Tal como se pode verificar na equação (2), as funções de mapeamento dependem do ângulo de

elevação e não do azimute, sendo assumido que a troposfera é simétrica em torno de cada estação (Boehm, et al., 2006).

### 2.1.1. GAMIT

O cálculo dos ZTD a partir de medidas GNSS é feito através do uso de um software adequado. Entre os diversos softwares disponíveis para o processamento GNSS de redes pré-estabelecidas, cujo objetivo no contexto deste estudo é a determinação dos parâmetros atmosféricos, nomeadamente os que dizem respeito à troposfera, destaca-se neste trabalho o GAMIT (Herring, et al., 2010). Este software *open-source* permite o processamento simultâneo de um conjunto qualquer de estações GNSS, ou seja, faz o processamento em rede. Este aspeto levanta a necessidade de tomar em consideração algumas questões pertinentes.

Para a determinação dos parâmetros troposféricos deve ser usada uma diversificada gama de ângulos de elevação dos satélites (Niell, et al., 2000). No caso em que a rede estabelecida apresenta uma configuração regional, ou seja, as estações estão muito próximas e limitadas a uma pequena região do globo, todas elas observam os mesmos satélites com ângulos de elevação muito semelhantes. Consequentemente, os correspondentes atrasos troposféricos estarão altamente correlacionados. Para evitar este problema, as redes escolhidas devem incluir estações com uma boa distribuição global para fornecer estabilidade às soluções (Fernandes, et al., 2010). Tratando-se de um processamento em rede, que levanta questões como a distribuição geográfica e o número de estações, o GAMIT não é um software adequado para o processamento de redes com poucas estações ou cuja distribuição geográfica seja regional.

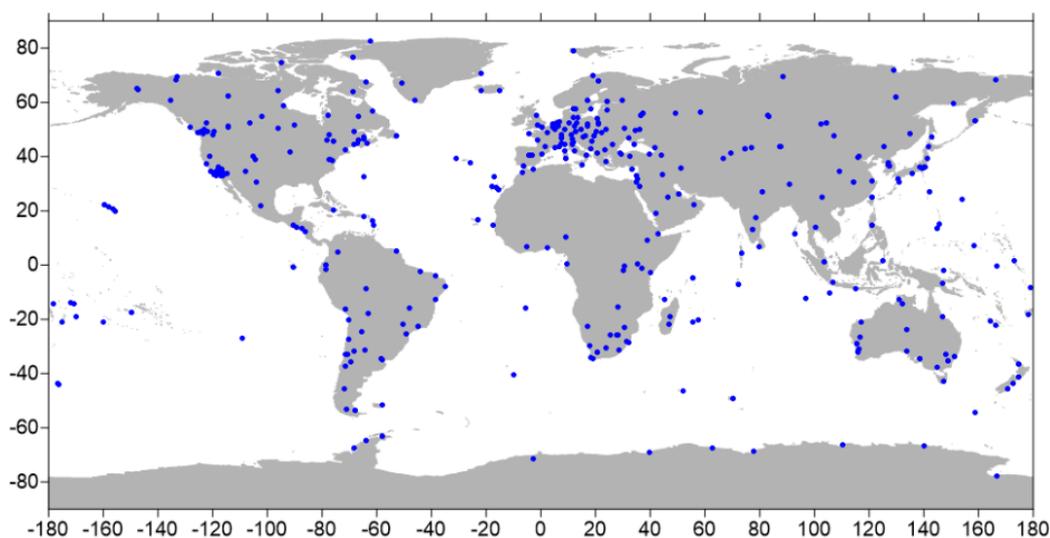
Outros softwares, como o GIPSY/OASIS II (Zumberge, et al., 1997) ou o Bernese (Dach, et al., 2007), (Dach, et al., 2009), podem também ser usados para estimar os atrasos troposféricos zenitais. Estes softwares são utilizados, respetivamente, pelo IGS e pela EPN para o cálculo dos ZTD disponibilizados por cada um. No caso do primeiro software é utilizado posicionamento PPP (*Precise Point Positioning*) o que o torna adequado para o processamento de estações individuais, evitando a necessidade de estabelecer uma rede de estações.

### 2.1.2. International GNSS Service (IGS)

O *International GNSS Service* (IGS) é uma organização voluntária com mais de 200 agências (universidades, instituições de investigação, etc.) espalhadas em mais de 100 países, que reúne informação das estações permanentes GNSS para gerar diversos produtos precisos (IGS, 2015).

Fornecer gratuitamente os seus produtos, nomeadamente para a comunidade científica, sendo que os mesmos apresentam um vasto leque de aplicações para milhões de utilizadores em todos os segmentos da economia global (IGS, 2015).

Atualmente fazem parte quase 500 estações distribuídas por todo o planeta (Figura 2.1), que entre os diversos fins para a informação adquirida são utilizadas para a realização do Referencial Terrestre Internacional (*International Terrestrial Reference Frame, ITRF*).



**Figura 2.1** – Estações IGS em agosto de 2015 (IGS, 2015)

O IGS começou a elaborar os produtos dos atrasos troposféricos em 1997, combinando as contribuições dos diversos centros de análise (Byun & Bar-Sever, 2008). A resolução temporal destes produtos é de 5 minutos e são disponibilizados ficheiros *online* a cada dia e por estação com uma latência de, aproximadamente, 3 semanas.

Entre os diversos produtos fornecidos por esta instituição, incluindo a estimativa dos atrasos troposféricos, incluem-se muitos outros, designadamente parâmetros de rotação da Terra, monitorização da posição e velocidade das estações permanentes e mapas globais da ionosfera (IGS, 2015).

### 2.1.3. EUREF Permanent Network (EPN)

A EUREF *Permanent Network* (EPN) é uma instituição com objetivos comuns ao IGS mas apenas com domínio na região da Europa. É também uma organização voluntária, tendo mais de 100 instituições espalhadas em mais de 30 países. É a organização que mantém o *European Terrestrial Reference System 89* (ETRS89), o sistema de referência atualmente em uso na Europa (EPN, 2015). Atualmente fazem parte desta rede europeia mais de 250 estações permanentes (EPN, 2015), tal como se pode visualizar na Figura 2.2.

Os produtos troposféricos resultantes da combinação dos diversos centros de análise desta rede têm uma resolução temporal de uma hora e são disponibilizados *online* em ficheiros semanais, com uma latência de, aproximadamente, 4 semanas.

A acrescentar à manutenção do ETRS89 e à estimação de atrasos troposféricos, os diversos produtos da EPN apresentam um alargado leque de aplicações, nomeadamente a monitorização de deformações terrestres e do nível do mar, modelos de previsão do tempo, entre outras (EPN, 2015).



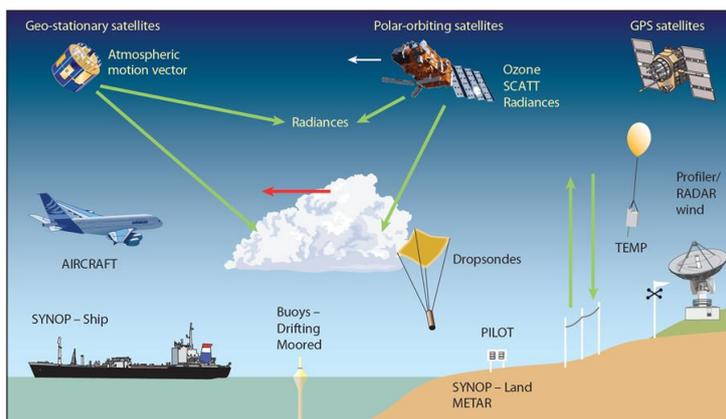
**Figura 2.2** – Estações EPN em agosto de 2015 (EPN, 2015)

Em qualquer rede de estações GNSS permanentes, o número de estações vai-se alterando ao longo do tempo, uma vez que novas estações vão sendo implementadas e outras desativadas, no entanto a tendência é que o número venha a aumentar ao longo do tempo.

## 2.2. Modelos Atmosféricos Globais

O ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) assume-se como o líder mundial na previsão meteorológica global de médio alcance. No âmbito dos modelos atmosféricos globais, esta instituição desenvolve métodos e produz diversos modelos de previsão a partir de observações meteorológicas.

Para fazer previsões meteorológicas é necessário conhecer o estado atual da atmosfera e da superfície terrestre (terra e mar) (ECMWF, 2015). Este conhecimento resulta das observações meteorológicas feitas ao longo do tempo por diversos sensores, tais como instrumentos a bordo de satélites, estações meteorológicas em terra, navios, boias, entre outros componentes (Figura 2.3). Os satélites fornecem a grande parte dos dados, no entanto outras observações tradicionais são importantes (ECMWF, 2015).



**Figura 2.3** – Observações meteorológicas (ECMWF, 2015)

Feitas as observações pelas múltiplas técnicas enunciadas anteriormente, formando assim um diversificado conjunto de dados, surge a necessidade de conjugar e assimilar toda a informação com origem diferente.

O objetivo deste passo é determinar o melhor estado atmosférico possível usando as diversas observações e previsão de curto alcance. Dada a natureza caótica da atmosfera, este procedimento não é exato, sendo-lhe atribuído um determinado grau de incerteza.

Quando a assimilação dos dados é feita com base em observações passadas, para monitorização das mudanças climáticas, toma o nome de reanálise.

### 2.2.1. ERA Interim

O ERA Interim é o mais recente modelo atmosférico global de reanálise produzido pelo ECMWF (Dee, et al., 2011). Este modelo, assim como outros, é um conjunto de dados que permitem descrever e caracterizar a atmosfera ao longo do tempo. Contém, entre outros, estimação de parâmetros atmosféricos, tais como temperatura, pressão e vento a diferentes altitudes. Estes parâmetros são estimados com uma resolução espacial e temporal regulares e abrangem um longo período (desde 1979 até ao presente). A resolução temporal é de 6h (uma grelha às 00, 06, 12 e 18 UTC) e a resolução espacial de 0.75°.

Os diversos parâmetros atmosféricos estimados pelo ERA Interim permitem obter os atrasos troposféricos zenitais com o mesmo intervalo de amostragem e a mesma resolução espacial.

## 2.3. Altimetria por Satélite

Desde o início dos anos 90 do século passado, o nível do mar tem sido monitorizado por diversas missões espaciais altimétricas (Legeais, et al., 2014), cujas órbitas são escolhidas de modo a permitir uma amostragem diferente e complementar da superfície terrestre (Fernandes, et al., 2015). Desde esse momento, os satélites altimétricos têm sido usados para mapear com precisão a superfície topográfica oceânica (Brown, 2010).

Uma missão altimétrica consiste num satélite em órbita da Terra, com determinados parâmetros orbitais (altitude, inclinação, etc.), cujo principal objetivo é a determinação e monitorização do nível da água do mar à escala global e regional. O satélite altimétrico suporta diversos instrumentos, nomeadamente o altímetro radar e o radiómetro de micro-ondas. Cada instrumento apresenta determinadas funções, sendo que variam de acordo com os objetivos específicos de cada missão.

O princípio da Altimetria por Satélite é muito simples. O altímetro radar, que é um instrumento ativo, emite um sinal radar na direção nadiral até à superfície oceânica, na qual é refletido e posteriormente recebido pelo altímetro (Chelton, et al., 2001). Neste percurso é medido o tempo  $t$  que, juntamente com a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas  $c$  (que é conhecida), permitem determinar a distância percorrida pelo sinal. A altura do satélite relativamente à superfície da água,  $RANGE$ , corresponde a metade desta distância. Na equação 3 representa-se a relação entre as quantidades referidas, que se traduz no princípio básico da Altimetria por Satélite.

$$RANGE = \frac{1}{2}ct \quad (3)$$

Na Figura 2.4 representam-se as diversas quantidades em análise, onde a altura do satélite relativamente à superfície da água está identificada como  $RANGE$ . Em cada momento é conhecida a altura do satélite altimétrico relativamente a uma superfície de referência, tal como o elipsoide. Na imagem da mesma figura esta quantidade está identificada como  $SATELLITE ALTITUDE$ .

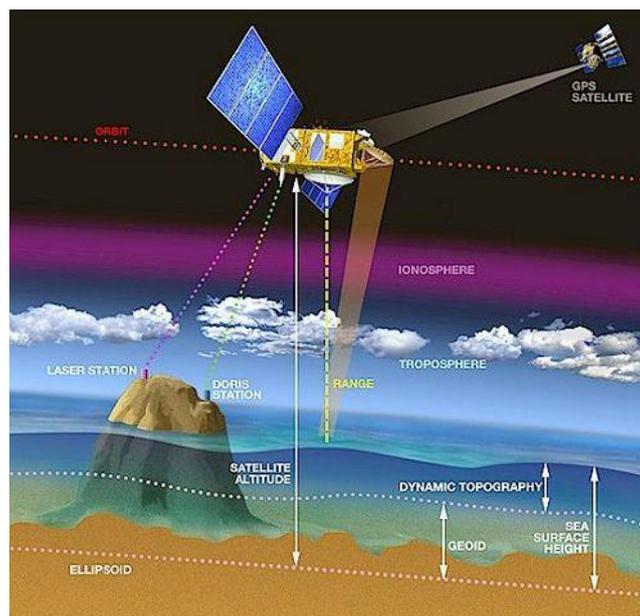


Figura 2.4 – Princípio básico da Altimetria por Satélite (Radar Altimetry Tutorial, 2015)

A diferença entre a altitude do satélite relativamente à superfície de referência e a altura do mesmo relativamente à superfície oceânica permite determinar a altura da superfície do mar (*Sea Surface Height*, SSH) relativamente à mesma superfície de referência.

$$SSH = \text{SATELLITE ALTITUDE} - \text{RANGE} \quad (4)$$

Na equação 4 representa-se a forma como é determinada a SSH, que é a quantidade fundamental para estudos tais como a determinação e monitorização do nível da água do mar. Estes procedimentos estão afetados de diversas fontes de erros, que afetam e introduzem incerteza no valor estimado do SSH e, por exemplo, no valor do nível médio do mar (*Mean Sea Level*, MSL) determinado.

Entre os diversos erros a considerar, destaca-se o atraso troposférico devido à componente húmida da troposfera, verificado nas medidas do altímetro. A correção devida a este atraso (WTC) é estimada pelo radiómetro de micro-ondas a bordo do satélite altimétrico. O rigor desta estimação terá impacto direto na precisão do MSL determinado por esta técnica, pelo que as medidas dos MWR devem ser devidamente avaliadas, para garantir a sua estabilidade. Os radiómetros apresentam uma deriva no tempo que afetam a estabilidade a longo prazo da WTC, que se estima ser da ordem dos  $\pm 0.3$  mm/ano (Ablain, et al., 2009).

### 2.3.1. Missões Altimétricas

No que diz respeito à Altimetria por Satélite, existem diversas missões altimétricas mantidas e desenvolvidas por vários organismos. Algumas já terminaram a sua operação, outras estão atualmente a medir e a fornecer dados e outras estão a ser pensadas e desenvolvidas para o futuro. Esta diversidade de missões pretende a continuidade e permanência das medidas altimétricas, que fornecem informação para um alargado leque de aplicações.

Em diferentes aspetos, a órbita de um satélite altimétrico é um compromisso, mas a questão que merece especial atenção é o equilíbrio entre resolução espacial e resolução temporal (Radar Altimetry Tutorial, 2015). A aquisição de informação no tempo e no espaço tem que ser equilibrada, uma vez que não é possível obter simultaneamente o melhor das duas componentes. Por um lado o satélite revisita o mesmo ponto com elevada frequência (alta resolução temporal) e abrange poucos pontos (baixa resolução espacial) ou, por outro lado, o satélite altimétrico mede em muitos pontos (alta resolução espacial) e demora muito tempo a visitar o mesmo ponto (baixa resolução temporal). Uma forma de contornar este problema é a combinação de missões, ou seja, colocar vários satélites altimétricos a operar em simultâneo de modo a complementarem-se entre si.

Até ao presente, várias missões altimétricas foram sendo desenvolvidas. Uma parceria entre a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e o CNES (*Centre National D'Études Spatiales*) criou três missões consecutivas e com alguma sobreposição temporal, designadas

por missões de referência: TOPEX/Poseidon, Jason-1 e Jason-2/OSTM (*Ocean Surface Topography Mission*) (JPL, 2015).

Missão	Início	Fim
<b>TOPEX/Poseidon</b>	10 de Agosto de 1992	5 de Janeiro de 2006
<b>Jason-1</b>	7 de Dezembro de 2001	1 de Julho de 2013
<b>Jason-2/OSTM</b>	20 de Junho de 2008	*

**Tabela 2.1** – Missões altimétricas da parceria NASA CNES

Na Tabela 2.1 estão registados os períodos de funcionamento de cada uma das missões altimétricas resultantes da parceria NASA CNES. Todos estes satélites altimétricos têm os mesmos parâmetros orbitais. A inclinação é de 66°, que determina uma cobertura global entre as latitudes 66°N e 66°S, a altitude é de 1336 km e o ciclo de repetição é de 10 dias, ou seja, cada satélite precisa deste período para voltar a passar pelos mesmos pontos, com uma precisão de ±1km. No equador, a distância entre traços consecutivos é de 315 km (Fernandes, et al., 2015).

A Figura 2.5 corresponde a uma imagem do terceiro satélite altimétrico da parceria NASA CNES, o JASON-2.



**Figura 2.5** – Satélite JASON-2 (JPL, 2015)

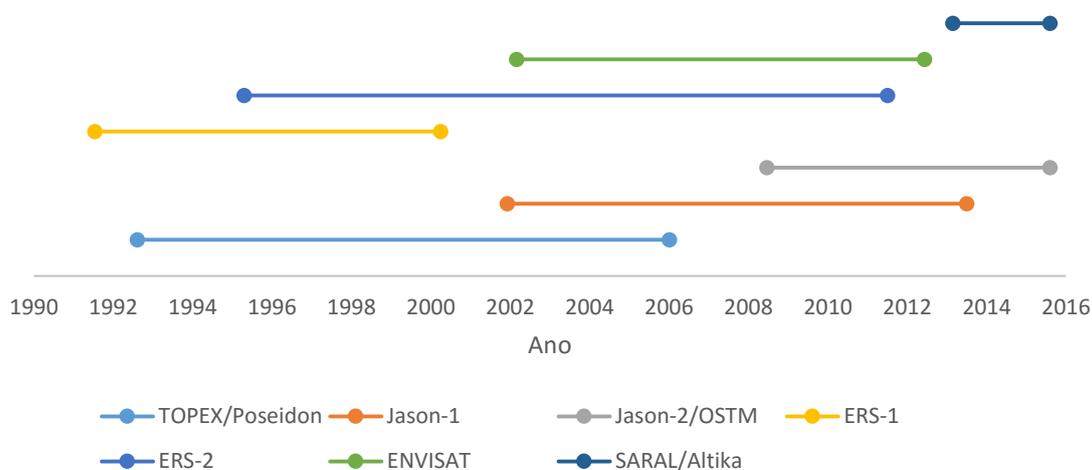
A Agência Espacial Europeia (*European Spatial Agency, ESA*) desenvolveu também satélites com aplicação na Altimetria por Satélite: dois satélites *European Remote Sensing* (ERS-1 e ERS-2) e o ENVISAT (*Environmental Satellite*). Na Tabela 2.2 registam-se os períodos de funcionamento de cada um destes satélites, nenhum deles em operação atualmente.

Missão	Início	Fim
<b>ERS-1</b>	17 de Julho de 1991	31 de Março de 2000
<b>ERS-2</b>	21 de Abril de 1995	6 de Julho de 2011
<b>ENVISAT</b>	1 de Março de 2002	8 de Junho de 2012

**Tabela 2.2** – Missões altimétricas da ESA

Os satélites ERS e o ENVISAT foram colocados na mesma órbita, cuja altitude é de 785 km, inclinação de 98.52° e um ciclo de 35 dias (no caso do ERS-1 apenas durante parte da missão). A distância entre traços consecutivos no equador é de 80 km (Fernandes, et al., 2015).

A 25 de Fevereiro de 2013 uma parceria entre o CNES e o ISRO (*Indian Space Research Organisation*) colocou na mesma órbita do ENVISAT o satélite SARAL/AltiKa, cuja missão é a medição da topografia da superfície oceânica. Entre os diversos instrumentos, este satélite tem a bordo o instrumento AltiKa que incorpora um altímetro e um radiómetro (CNES, 2015), (ISRO, 2015).



**Figura 2.6** – Períodos de funcionamento das várias missões altimétricas

Tal como referido anteriormente, a combinação de missões permite resolver o problema do compromisso entre resolução espacial e resolução temporal. Na Figura 2.6 representa-se numa escala de tempo (deste 1990 até ao presente), os períodos de operação de cada uma das missões em análise. Em grande parte do período verificam-se 3 ou 4 missões simultâneas. Atualmente apenas duas missões estão a operar: Jason-2/OSTM e SARAL/AltiKa.

No que diz respeito às características dos instrumentos de cada missão altimétrica, dois tipos de radiómetros são utilizados nos satélites altimétricos. Nos satélites da ESA e no SARAL/AltiKa os radiómetros apresentam duas bandas, enquanto os radiómetros das missões de referência (TOPEX/Poseidon, JASON-1 e JASON-2) efetuam medidas em três bandas. Todos eles apresentam uma banda entre 21 e 23.8 GHz e os radiómetros de dupla frequência apresentam a segunda banda entre 34 e 37 GHz. A terceira banda (18-18.7 GHz) dos radiómetros das missões da parceria NASA CNES tem uma baixa sensibilidade às nuvens o que melhora a estimação da WTC (Fernandes, et al., 2015). As missões de cada um dos dois conjuntos anteriores apresentam aspetos semelhantes entre si, nomeadamente no que

toca às características instrumentais comuns dos radiómetros e às órbitas dos respetivos satélites.

O tamanho da pegada dos radiómetros é uma consequência das suas características instrumentais, uma vez que depende do instrumento e da frequência. Este valor é da ordem dos 20-45 km, à exceção do SARAL/AltiKa, cuja pegada tem um tamanho de 10 km.

## 2.4. Diferentes fontes de informação

Uma vez que esta tese trata da comparação de dados obtidos por fontes de informação distintas, com características diferentes, nomeadamente a resolução temporal e espacial, é importante perceber o domínio de cada uma destas fontes de informação, que são utilizadas em conjunto com o objetivo de obter produtos mais precisos.

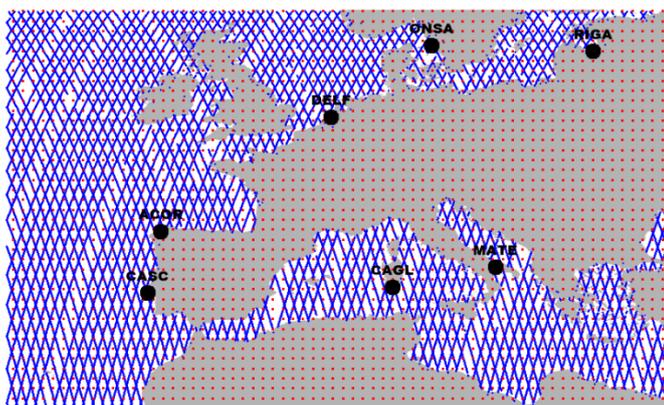


Figura 2.7 – Extrato da representação espacial das três fontes de informação em análise

Na Figura 2.7 apresenta-se uma pequena zona do globo terrestre (uma parte da Europa) com a representação das três fontes de informação utilizadas neste estudo. A preto são representadas algumas estações permanentes GNSS, os pontos a vermelho correspondem à grelha 0.75°x0.75° do modelo atmosférico ERA Interim e a azul correspondem os pontos do ciclo 1 do ERS-2, nos quais o radiómetro determina o ZWD. Esta figura é apenas um exemplo que mostra as resoluções espaciais de cada uma das fontes de informação (GNSS, modelo atmosférico e missões altimétricas). Todo o estudo é desenvolvido em zonas costeiras, uma vez que são estas regiões que apresentam simultaneamente informação das três fontes, na medida em que por um lado, os radiómetros não medem em terra e, por outro lado, não existem estações permanentes em água. No que toca ao modelo atmosférico a informação é global.

## Capítulo III

### 3. Cálculo e análise de atrasos troposféricos

Uma vez apresentadas e caracterizadas as diversas fontes de informação em análise, este capítulo pretende descrever as diversas metodologias adotadas a fim de calcular os atrasos troposféricos zenitais (ZTD) para um conjunto de estações selecionadas previamente, de modo a servirem como ZTD de referência. Pretende-se assim possuir um conjunto de ZTD estimados usando metodologias estado da arte, que sirvam de referência para avaliar a precisão e estabilidade dos ZTD fornecidos por centros, tais como o IGS e a EPN. Depois de estimados estes atrasos, designados por ZTD UPorto, são comparados com os correspondentes fornecidos pelas duas redes de estações permanentes.

Dispondo de diferentes soluções GNSS (IGS, EPN e UPorto), processadas em centros diferentes, torna-se importante perceber e analisar o seu rigor através da comparação entre elas e com estimativas independentes. Esta comparação permite determinar indicadores da qualidade dos atrasos troposféricos zenitais estimados com GNSS. Nesta seção fazem-se as comparações de ZTD EPN-IGS, EPN-UPorto e UPorto-IGS para as estações selecionadas.

#### 3.1. Cálculo de ZTD para um conjunto de estações de referência

O primeiro procedimento deste estudo passa pelo cálculo dos atrasos troposféricos zenitais (ZTD UPorto) para um conjunto de estações selecionadas previamente. A seleção do conjunto de estações a serem processadas com o software GAMIT e para as quais é feita a avaliação do rigor das soluções GNSS passa por várias fases. Este procedimento apresenta-se de certo modo ambíguo, na medida em que é necessário estabelecer o equilíbrio entre os vários critérios definidos. Os critérios principais foram a escolha de estações permanentes cujos períodos de observação fossem mais longos e que a rede escolhida tivesse uma boa distribuição geográfica. Também foi dada prioridade às estações que integrassem o *Reference Frame* do IGS (IGS, 2015). Para além disso, é importante que se tratem de estações junto à costa, uma vez que só estas são usadas na estimativa da WTC para medidas de Altimetria por Satélite.

Estabelecendo o equilíbrio entre os diversos fatores, de um modo geral são escolhidas as estações com períodos de observação maiores e junto à costa, de modo a que o conjunto final tenha uma boa distribuição geográfica.

Feita a escolha de um conjunto de cerca de 60 estações distribuídas mundialmente, são divididas em 3 redes com cerca de 20 estações cada. Esta divisão baseia-se nos mesmos critérios: agrupar as estações de acordo com o período de observação, não esquecendo também a questão da distribuição geográfica em cada rede. Mais uma vez este procedimento apresenta-se bastante subjetivo, uma vez que se torna difícil a conciliação dos diversos fatores.

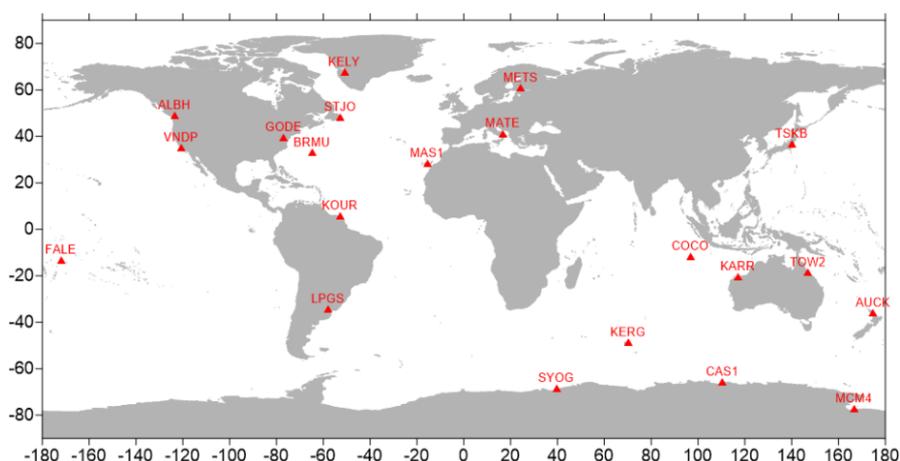


Figura 3.1 – Primeira rede

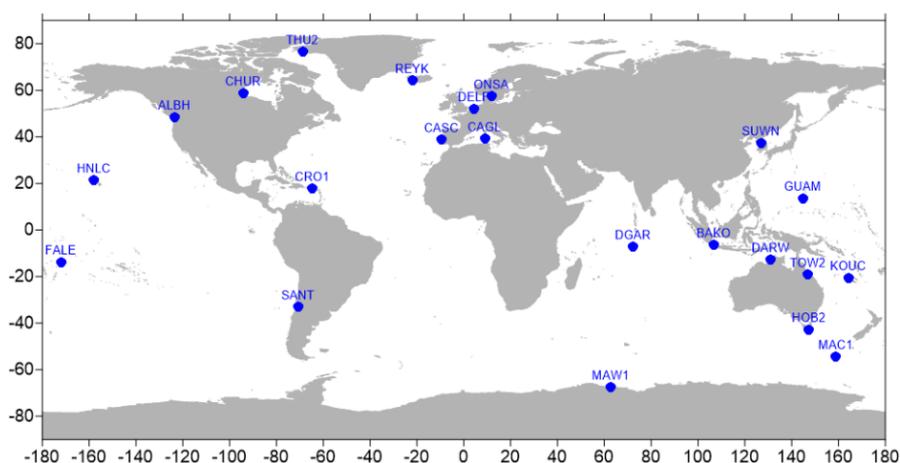


Figura 3.2 – Segunda rede

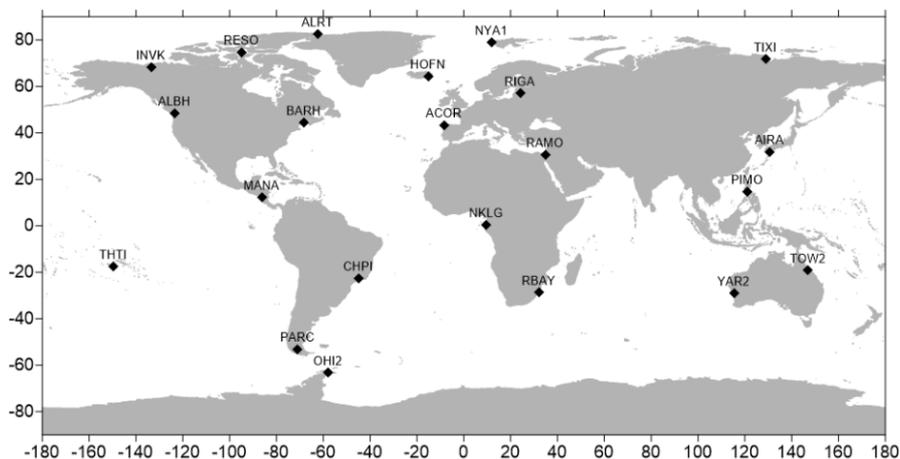


Figura 3.3 – Terceira rede

A primeira rede (Figura 3.1) inclui essencialmente estações com períodos de observação mais longos, compreendidos entre os 18 e os 20 anos aproximadamente. Da segunda rede (Figura 3.2) fazem parte maioritariamente estações com períodos de observação intermédios. A última rede, representada na Figura 3.3, inclui as estações cujos períodos de observação são inferiores. No Anexo A registam-se as coordenadas de todas as estações das três redes e o período de observação de cada uma, em anos.

Com o objetivo de avaliar a precisão dos processamentos são selecionadas estações comuns às várias redes. Como é possível visualizar nas três figuras correspondentes às diferentes redes, a estação FALE pertence às duas primeiras redes e as estações ALBH e TOW2 pertencem a todas as redes. As duas estações pertencentes às três redes são geograficamente distantes e situam-se em hemisférios diferentes.

A questão da escolha de estações comuns traduz-se também numa certa subjetividade e falta de homogeneidade, no sentido em que diversifica os períodos de observação em cada rede. Não existe uma forma única e ótima de escolher um conjunto de estações, tomando em consideração todos os critérios relevantes para este estudo.

No cálculo dos ZTD UPorto com o software GAMIT são usadas medidas de fase (diferenças duplas), as funções de mapeamento VMF1 (*Vienna Mapping Functions 1*) (Boehm, et al., 2006), ZHD *a priori* baseado no ECMWF e fornecido nos ficheiros VMF1, órbitas e parâmetros dos relógios de precisão do IGS e ângulo de elevação mínimo de 7°. Os parâmetros troposféricos foram estimados a intervalos de 30 minutos.

### 3.2. Comparação de diferentes soluções GNSS

Nesta seção apresenta-se a comparação entre os ZTD UPorto, IGS e EPN para as estações selecionadas, para as quais são estimados os atrasos troposféricos zenitais (ZTD UPorto) utilizando o software GAMIT.

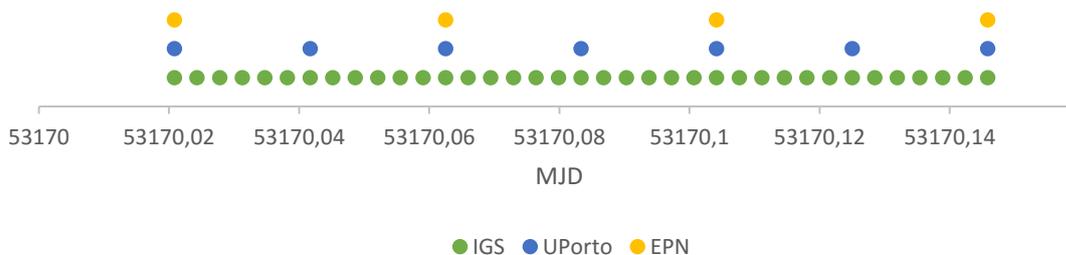
Na Tabela 3.1 estão presentes todas as estações usadas nesta comparação, sem diferenciação da rede à qual pertencem. O conjunto de estações usadas nesta análise teria que ser obrigatoriamente este, uma vez que uma das soluções a comparar são os ZTD UPorto.

ACOR	BARH	CHUR	FALE	INVK	LPGS	MCM4	PARC	RIGA	THU2
AIRA	BRMU	COCO	GODE	KARR	MAC1	METS	PIMO	SANT	TIXI
ALBH	CAGL	CRO1	GUAM	KELY	MANA	NKLG	RAMO	STJO	TOW2
ALRT	CAS1	DARW	HNLC	KERG	MAS1	NYA1	RBAY	SUWN	TSKB
AUCK	CASC	DELF	HOB2	KOUC	MATE	OHI2	RESO	SYOG	VNDP
BAKO	CHPI	DGAR	HOFN	KOUR	MAW1	ONSA	REYK	THTI	YAR2

**Tabela 3.1** – Estações permanentes usadas para a comparação de soluções GNSS. Para detalhes sobre o significado das cores consultar o texto.

Esta comparação está limitada em determinados aspetos, uma vez que nem todas as estações apresentam ZTD estimados pelas três soluções. Algumas estações não pertencem ao IGS e outras não pertencem à EPN. As estações marcadas a azul na Tabela 3.1 são simultaneamente EPN e IGS. As estações que pertencem apenas à EPN estão marcadas a vermelho e aquelas que não estão marcadas por qualquer cor são apenas IGS. Todas elas apresentam ZTD estimados no GAMIT (ZTD UPorto). As comparações são condicionadas pelo período de disponibilidade das soluções em cada estação.

As três soluções GNSS em análise (EPN, IGS e UPorto) fornecem os atrasos troposféricos zenitais com intervalos de amostragem diferentes e em períodos que podem não ser totalmente comuns, pelo que a comparação tem que tomar em consideração estes fatores. Os ZTD IGS são estimados a cada 5 minutos, os da rede europeia são estimados a cada 60 minutos e os resultantes dos processamentos GAMIT (ZTD UPorto) foram estimados a cada 30 minutos. A interpolação no tempo poderia ser um método utilizado para calcular as diferenças dos ZTD entre as várias soluções, no entanto as diversas comparações não levantam esse problema, uma vez que apesar de terem resoluções temporais diferentes, os tempos de estimação são comuns.



**Figura 3.4** – Estimação dos ZTD no tempo por cada solução

No gráfico da Figura 3.4 pode-se visualizar um pequeno extrato dos instantes de estimação dos ZTD de cada solução. Por uma questão de simplificação é utilizada uma escala de tempo sequencial, sem separação por semanas, meses ou anos, o *Modified Julian Date* (MJD). Em todas as soluções é utilizado o MJD.

Tal como referido anteriormente e como se pode verificar na Figura 3.4, apesar de terem resoluções temporais diferentes, para um determinado instante EPN (amarelo) existe o mesmo instante UPorto (azul) e IGS (verde), assim como para cada instante UPorto existe o mesmo instante IGS. Este aspeto facilitou em larga medida as comparações, uma vez que não levantou a necessidade de interpolação temporal.

### 3.2.1. Análise por estação

Uma vez calculadas as diferenças de ZTD (EPN-IGS, EPN-UPorto e UPorto-IGS) em cada estação, são calculados diversos parâmetros para avaliar a proximidade entre as três soluções GNSS. Os parâmetros calculados são média, desvio padrão, mínimo, máximo, declive da reta de ajuste pelo método dos mínimos quadrados (tendência linear) e erro médio quadrático. Todos estes valores calculados estão registados no Anexo B.

Os valores médios das diferenças são representados nas figuras 3.5, 3.6 e 3.7 para cada estação, de cada uma das três redes estabelecidas, respetivamente.

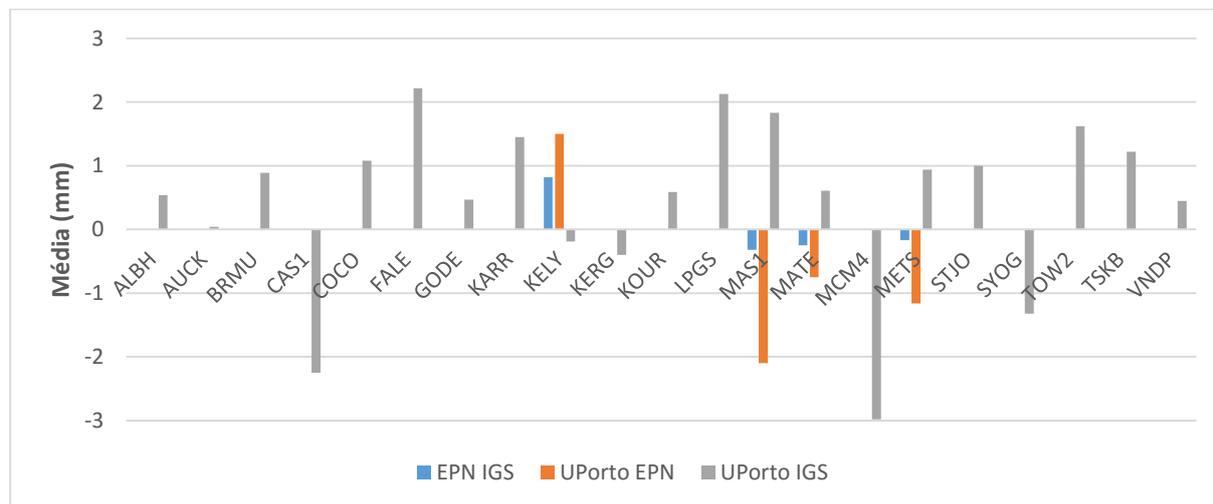


Figura 3.5 – Média das diferenças de ZTD entre soluções para as estações da primeira rede

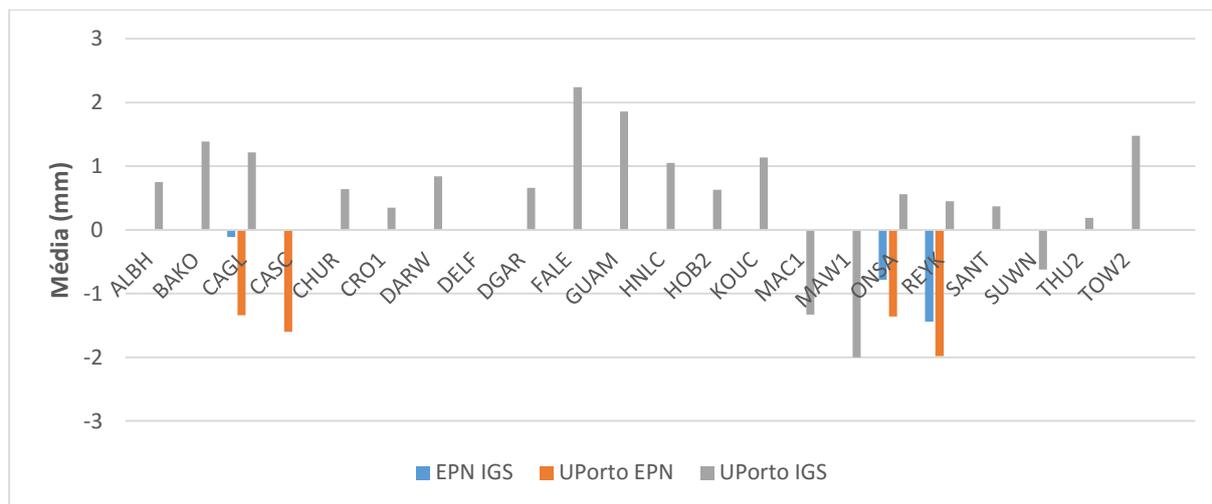


Figura 3.6 – Média das diferenças de ZTD entre soluções para as estações da segunda rede

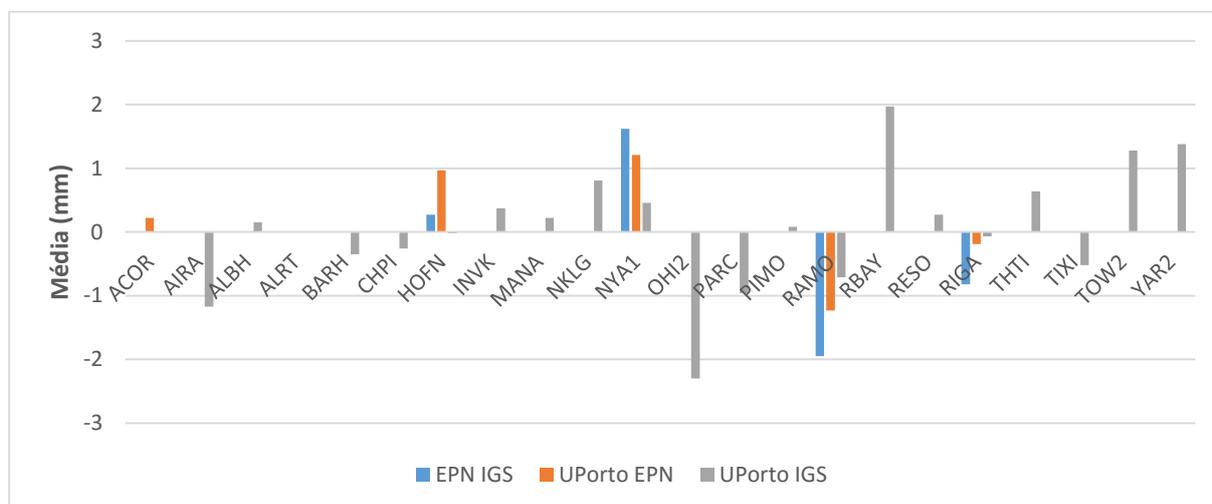
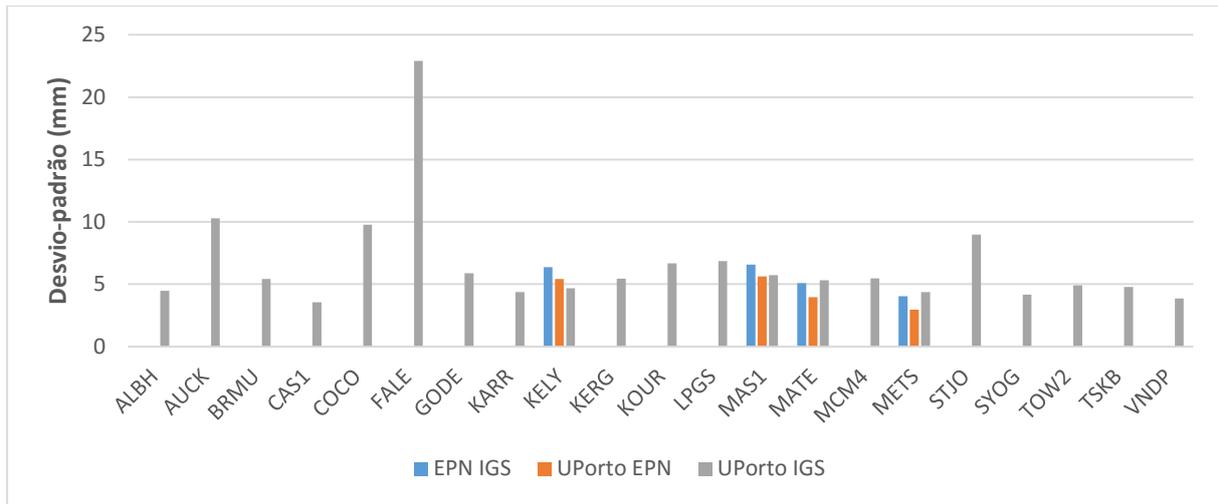


Figura 3.7 – Média das diferenças de ZTD entre soluções para as estações da terceira rede

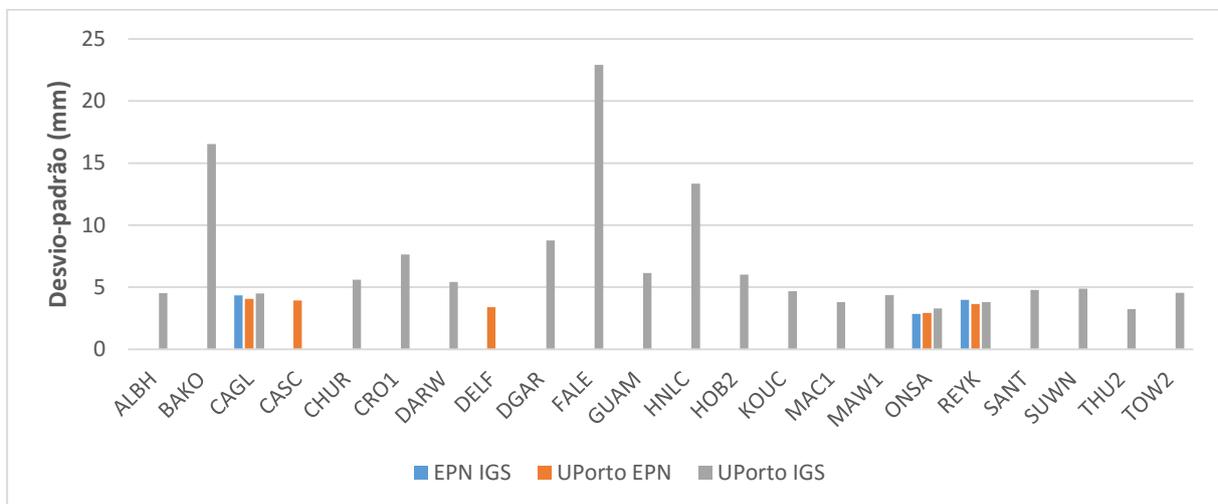
Considerando todas as estações e as três comparações entre soluções verifica-se que a média apresenta um valor absoluto máximo de cerca de 3 milímetros para uma estação da primeira rede, sendo que na maior parte das estações este valor é inferior a 1 milímetro. Uma vez que estes valores apresentam-se tendencialmente próximos de zero, os resultados sugerem a ausência de erros sistemáticos. É de notar que o valor absoluto médio do atraso troposférico zenital é, em geral, superior a 2,5 metros.

De todas as estações selecionadas, poucas pertencem à rede europeia (EPN), o que torna apenas a comparação UPorto-IGS mais alargada.

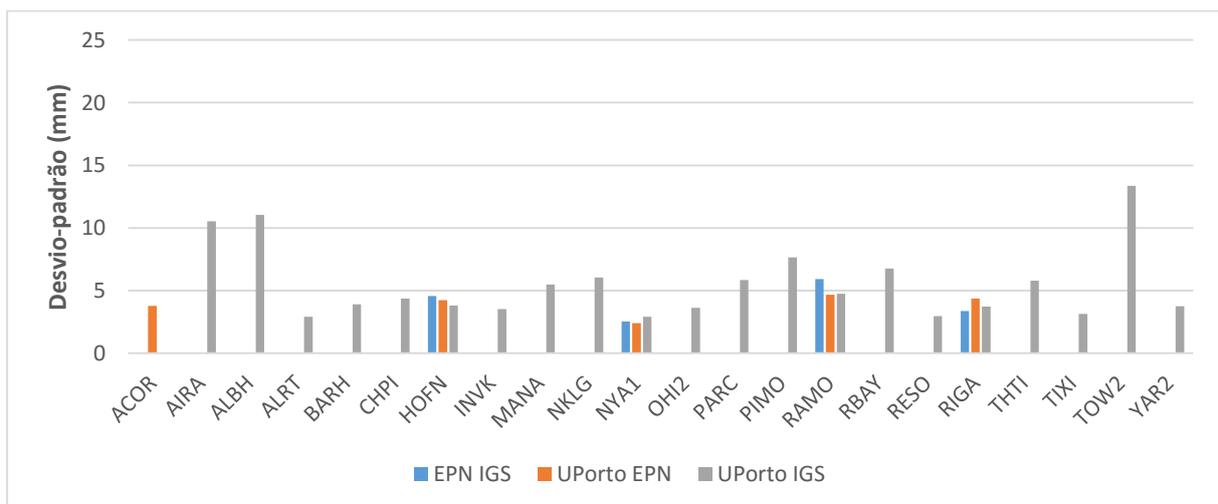
Relativamente à dispersão dos dados, as diferenças EPN-IGS apresentam um desvio padrão médio de 5 mm, as diferenças EPN-UPorto têm um desvio padrão médio de 4 mm e as diferenças UPorto-IGS evidenciam um desvio-padrão médio de 6 mm.



**Figura 3.8** – Desvio-padrão das diferenças de ZTD entre soluções para as estações da primeira rede



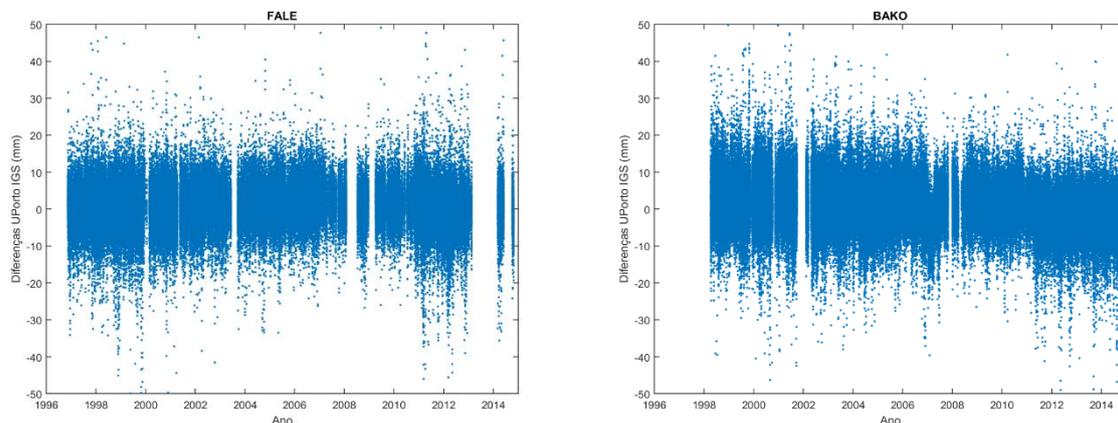
**Figura 3.9** – Desvio-padrão das diferenças de ZTD entre soluções para as estações da segunda rede



**Figura 3.10** – Desvio-padrão das diferenças de ZTD entre soluções para as estações da terceira rede

Nos gráficos das Figuras 3.8, 3.9 e 3.10 representam-se os desvios-padrão das diferenças de ZTD, em milímetros, para cada estação de cada rede, das diversas comparações. O desvio-

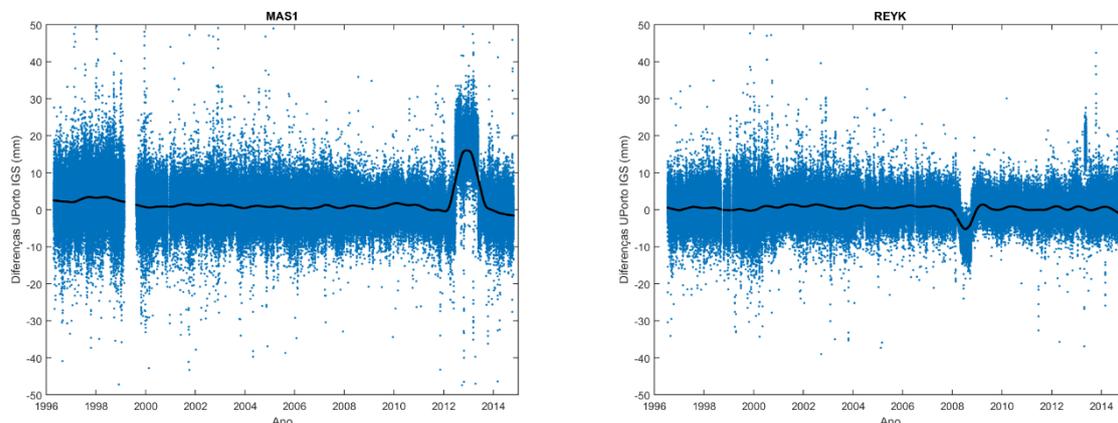
padrão varia no intervalo 3-7 mm, 2-6 mm e 3-23 mm para as diferenças EPN-IGS, EPN-UPorto e UPorto-IGS, respetivamente. A última comparação, que tem um intervalo de desvios-padrão muito alargado chegando aos 23 mm, apresenta algumas estações com valores de desvio-padrão muito superiores às restantes. Este aspeto não se verifica nas comparações com a solução EPN, uma vez que estas estações não pertencem à rede europeia.



**Figura 3.11** – Diferenças de ZTD entre UPorto e IGS para as estações FALE e BAKO

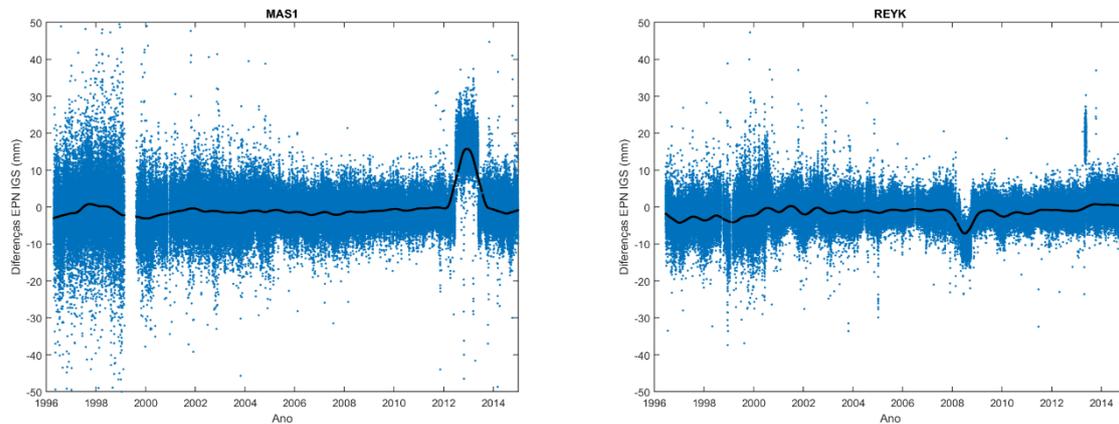
Na Figura 3.11 representam-se as diferenças de ZTD entre UPorto e IGS para as estações FALE e BAKO, que apresentam os valores de desvio-padrão mais elevados, 23 e 17 mm respetivamente. Sendo estes valores superiores ao nível de precisão com que atualmente se estimam os ZTD com GNSS, é necessário investigar a origem destas diferenças e verificar qual das soluções (ou ambas) apresenta problemas.

Noutras estações, apesar de apresentarem valores de desvio-padrão de poucos milímetros, a análise aos gráficos das diferenças UPorto-IGS revela descontinuidades. Isto acontece, por exemplo, para as estações MAS1 e REYK em pequenos períodos aproximadamente em torno dos anos 2013 e 2009, respetivamente, como é possível visualizar na Figura 3.12.



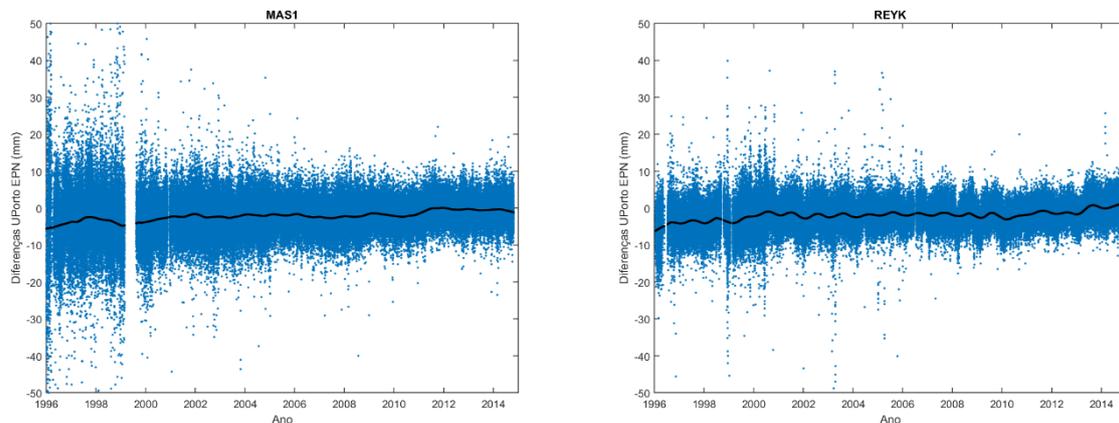
**Figura 3.12** – Diferenças de ZTD entre UPorto e IGS para as estações MAS1 e REYK

Tratando-se da comparação UPorto-IGS, a deteção das descontinuidades anteriormente descritas por si só não permite identificar em qual das soluções está o problema. No entanto, como estas estações pertencem simultaneamente às redes IGS e EPN, as comparações EPN-IGS e EPN-UPorto poderão identificar em qual das soluções (UPorto ou IGS) está a origem das descontinuidades detetadas.



**Figura 3.13** – Diferenças de ZTD entre EPN e IGS para as estações MAS1 e REYK

As diferenças de ZTD para as mesmas estações entre as soluções EPN e IGS, representam-se na Figura 3.13. As descontinuidades detetadas na comparação UPorto-IGS estão também presentes na comparação EPN-IGS nos mesmos instantes.



**Figura 3.14** – Diferenças de ZTD entre UPorto e EPN para as estações MAS1 e REYK

Quando se compara os ZTD UPorto com os ZTD EPN, as descontinuidades detetadas nas comparações anteriores não são verificadas, como se pode ver na Figura 3.14, ou seja, as descontinuidades estão presentes apenas em comparações com os ZTD IGS, o que sugere que o problema esteja nesta solução. Ainda assim, uma vez que estes ZTD são também comparados com os ZTD obtidos a partir do modelo ERA Interim, no capítulo seguinte, esta análise poderá também dar resposta a esta questão. A comparação com o modelo

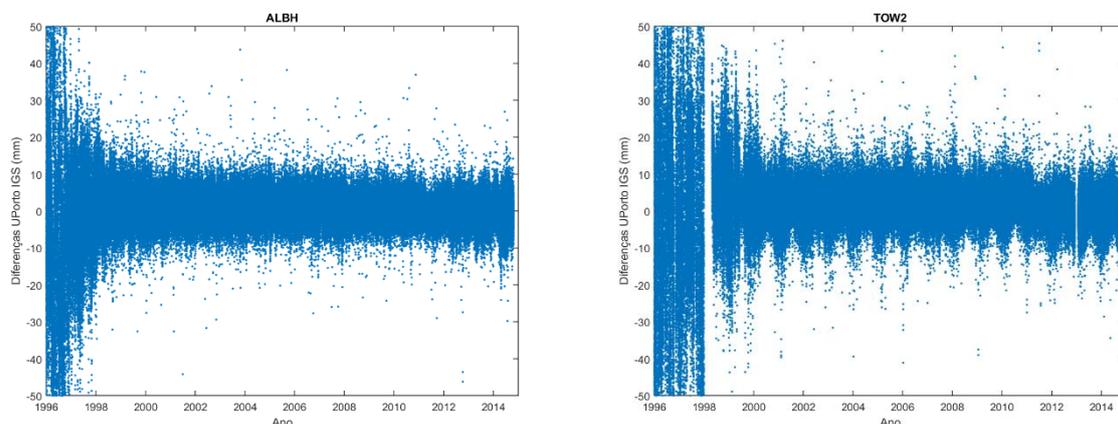
atmosférico mostrará também em qual das soluções (EPN, IGS ou UPorto) se verificam valores de desvio-padrão superiores em cada estação permanente.

### 3.3. Comparação entre redes UPorto

Esta análise é em tudo semelhante à anterior, mas diz respeito à comparação de ZTD da mesma estação obtidos em redes diferentes, no processamento das soluções UPorto calculadas no âmbito deste trabalho. Nesta seção, para as estações comuns, os ZTD estimados no GAMIT em diferentes redes são designados como UPorto1, UPorto2 e UPorto3 de acordo com a rede na qual foram calculados.

Para a estação FALE são calculadas as diferenças entre os ZTD UPorto1 e UPorto2. Para as estações ALBH e TOW2 são calculadas as diferenças entre os ZTD UPorto1 UPorto2, UPorto2 UPorto3 e UPorto1 UPorto3. Depois de calculadas estas diferenças são também calculados os mesmos parâmetros estatísticos para avaliar a qualidade e o rigor dos processamentos UPorto utilizando o GAMIT.

Pela análise aos gráficos das Figuras 3.8, 3.9 e 3.10 verifica-se que os desvios-padrão das diferenças UPorto3 IGS são muito superiores do que os desvios-padrão das diferenças UPorto1 IGS e UPorto2 IGS para as estações comuns (ALBH e TOW2). Por enquanto, segundo esta análise, verifica-se que os atrasos calculados na terceira rede (ZTD UPorto3) apresentam uma precisão inferior do que os ZTD UPorto1 e UPorto2.



**Figura 3.15** – Diferenças de ZTD UPorto3 IGS para as estações ALBH e TOW2

Nos gráficos da Figura 3.15 representam-se as diferenças UPorto3 IGS para as estações ALBH e TOW2. Como é possível identificar, estas diferenças são muito superiores no período inicial (até cerca do ano 2000). Este aspeto não é verificado nas diferenças UPorto1 IGS e UPorto2 IGS, uma vez que estas diferenças apresentam-se constantes no tempo.

Os valores de desvio-padrão elevados para as estações comuns na terceira rede (ZTD UPorto3) não traduzem corretamente as diferenças ao longo de todo o período, uma vez que as diferenças apresentam-se muito elevadas apenas num curto período inicial.

Neste momento, uma vez que as diferenças entre o IGS e as duas primeiras redes (UPorto1 IGS e UPorto2 IGS) não apresentam estes valores tão elevados, comparados com o restante período, tudo indica que a origem das diferenças tão elevadas está nos ZTD UPorto3 e não nos ZTD fornecidos pelo IGS.

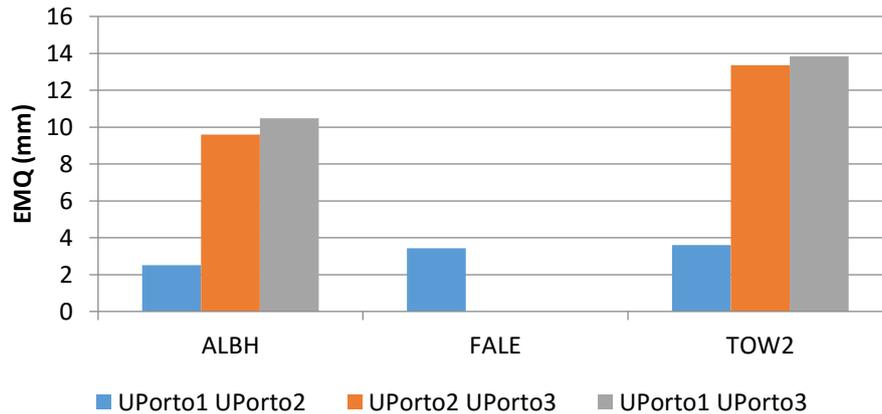


Figura 3.16 – EMQ das diferenças entre ZTD da mesma estação estimados em redes diferentes

Na Figura 3.16, mostram-se os gráficos correspondentes ao erro médio quadrático das diferenças entre ZTD da mesma estação, mas estimados em redes diferentes para as estações comuns. É de notar que a estação FALE é comum apenas nas duas primeiras redes. Anteriormente, na comparação entre ZTD UPorto IGS para as estações comuns, verificou-se que haveria problema nos ZTD UPorto3. Pelo gráfico da Figura 3.16 verifica-se também, que as diferenças são superiores em comparações com os ZTD UPorto3.

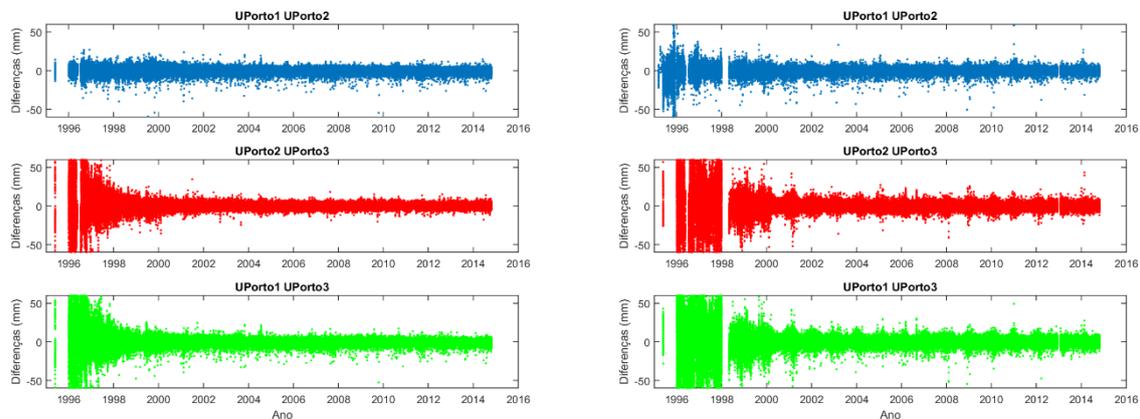
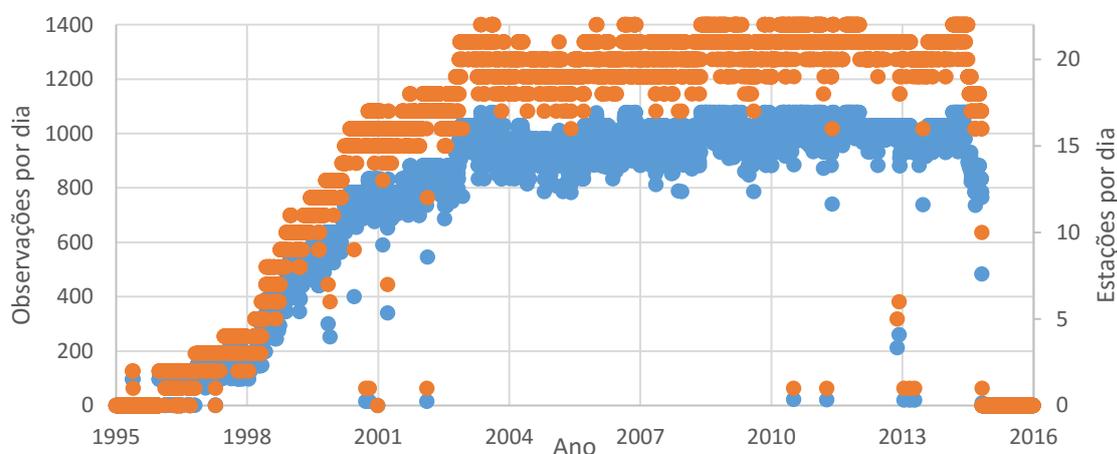


Figura 3.17 – Diferenças entre os ZTD da mesma estação estimados em redes diferentes

Os gráficos da Figura 3.17 representam as diferenças entre ZTD da mesma estação, mas estimados em redes diferentes para as estações ALBH e TOW2 da esquerda para a direita, respetivamente. As diferenças elevadas, no período inicial, na comparação entre UPorto3 e IGS correspondem, no mesmo período, também diferenças elevadas na comparação entre redes (comparação com ZTD UPorto3).

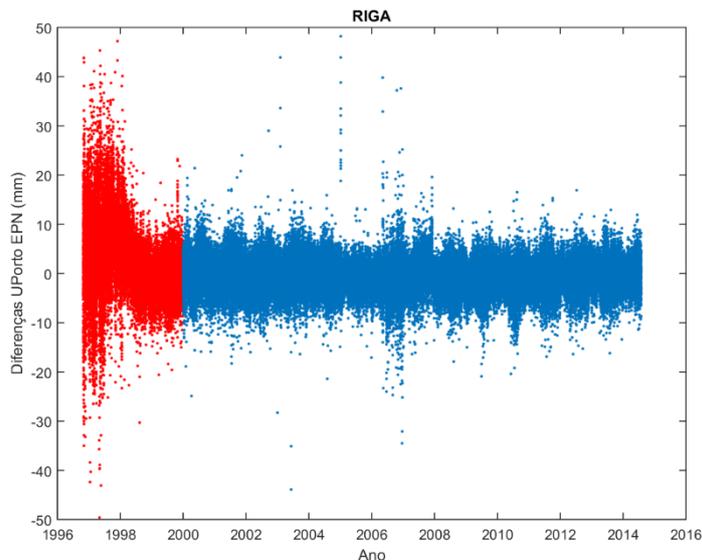
A última rede é constituída maioritariamente por estações com períodos de observação menores. Com a introdução das estações comuns que têm uma extensão da série de observações maiores, este padrão é alterado. No gráfico da Figura 3.18 representam-se o número de observações (eixo lado esquerdo, azul) e estações (eixo lado direito, laranja) por dia para a terceira rede, no período compreendido entre 1995 e 2016.



**Figura 3.18** – Número de observações e estações por dia da terceira rede

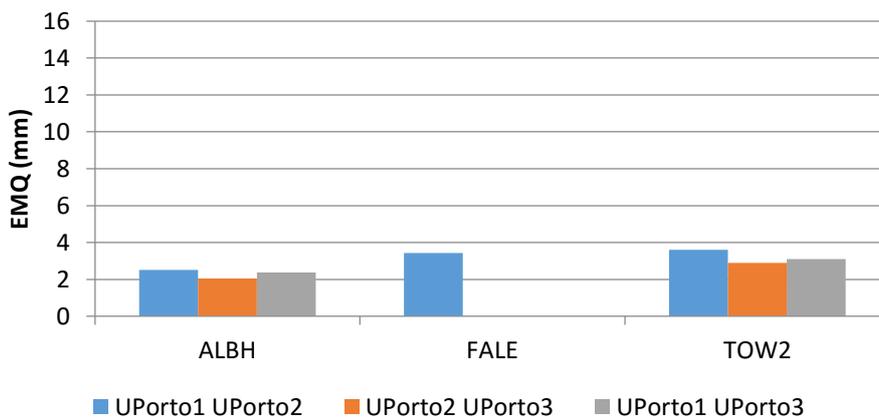
Pela análise ao gráfico da Figura 3.18, verifica-se claramente que, para o período inicial em que as diferenças são elevadas, o número de estações na terceira rede é muito reduzido. Até 1998, em que as diferenças são extremamente elevadas, este número nunca é superior a 4 estações. É de notar que o número de observações por dia está relacionado com o número de estações, sendo estas duas quantidades proporcionais.

Os resultados mostram claramente que o número de estações e a distribuição geográfica em cada rede afetam a qualidade dos ZTD estimados. Assim sendo, os atrasos troposféricos zenitais estimados na terceira rede, no período inicial até ao ano 2000, devem ser rejeitados. As diferenças entre ZTD UPorto3 e EPN para a estação RIGA (Figura 3.19) são um exemplo claro da rejeição dos ZTD UPorto3 que deve ser feita no período inicial. Os pontos vermelhos representam as diferenças para as quais os ZTD UPorto3 devem ser rejeitados, ou seja, representam o período de invalidade destes ZTD. Os pontos azuis representam o período em que os mesmos ZTD são válidos, onde as diferenças com os ZTD EPN se mantêm constantes e menores no tempo.



**Figura 3.19** – Diferenças de ZTD UPorto3 EPN para a estação RIGA

Feita a rejeição dos ZTD UPorto3, no período referido para as estações ALBH e TOW2, e recalculando os parâmetros representados no gráfico da Figura 3.16 resultam os valores de EMQ representados na Figura 3.20.



**Figura 3.20** – EMQ recalculado das diferenças entre ZTD da mesma estação estimados em redes diferentes

Recalculando o EMQ das diferenças de ZTD da mesma estação, estimados em redes diferentes, os resultados são inferiores a 4 milímetros, tal como se verifica no gráfico da Figura 3.20. Este valor, que se traduz no rigor dos ZTD UPorto, e os referidos na comparação entre soluções GNSS são bons indicadores da precisão dos ZTD estimados com GNSS.

## Capítulo IV

### 4. Comparação de ZTD entre GNSS e Modelo Atmosférico

Neste capítulo os ZTD estimados com GNSS (EPN, IGS e UPorto), analisados no capítulo anterior, são comparados com os ZTD obtidos a partir do modelo atmosférico de reanálise ERA Interim do ECMWF. Esta comparação torna-se menos simples, na medida em que carece de diversos procedimentos, devido às diferentes características das medidas obtidas por cada fonte de informação, que impossibilitam a comparação direta.

#### 4.1. Diferenças entre ZTD ERA Interim e ZTD GNSS

Os ZTD derivados do modelo atmosférico são globais, com uma resolução temporal de 6 horas e uma resolução espacial de  $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ . Por seu lado, os ZTD estimados com GNSS têm uma resolução temporal que depende da solução (5, 30 ou 60 minutos para IGS, UPorto e EPN, respetivamente) e uma resolução espacial que está confinada à distribuição geográfica das estações permanentes. O modelo apresenta uma resolução espacial melhor do que o GNSS e, por outro lado, os ZTD obtidos com GNSS têm uma resolução temporal melhor. Dadas as diferenças entre as duas fontes de informação é necessário fazer interpolação espacial e temporal, para a correta comparação entre as duas.

O cálculo dos valores de ZTD a partir do ERA Interim pode ser resumido nos seguintes passos, descritos em (Fernandes, et al., 2014):

1 – Para cada instante e nodo de uma grelha global de  $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ , o ZHD ERA Interim é calculado a partir das grelhas de pressão ao nível do mar (*Sea Level Pressure*, SLP),  $p_0$ , usando o modelo de Saastamoinen modificado (Davis, et al., 1985), equação (5), e a expressão da variação da pressão com a altitude dada por (Hopfield, 1969), equação (6):

$$ZHD_{ERA} = - \frac{0.0022768 p_s}{1 - 0.00266 \cos 2\varphi - 0.28 \cdot 10^{-6} h_s} \quad (5)$$

$$p_s = p_0 \exp \left[ -\frac{g_m (h_s - h_1)}{RT_m} \right] \quad (6)$$

Nas equações (5) e (6)  $\varphi$  é a latitude geodésica,  $p_s$  a pressão à altitude  $h_s$ ,  $R$  a constante específica para o ar seco e  $T_m$  a temperatura média (em K) da camada da atmosfera entre as altitudes  $h_1$  e  $h_s$  e  $g_m$  é o valor médio da gravidade, dado por:

$$g_m = 9.784 (1 - 0.00266 \cos 2\varphi - 0.28 \cdot 10^{-6} h_s) \quad (7)$$

$T_m$  pode ser estimada como a média das temperaturas  $T_1$  e  $T_s$  às altitudes  $h_1$  e  $h_s$ , respetivamente, obtidas, por exemplo, a partir de valores  $T_1$  ao nível médio do mar dados pelo modelo *Global Pressure and Temperature* (GPT) (Boehm, et al., 2007) e considerando o valor de  $-0.0065 \text{ K}\cdot\text{m}^{-1}$  para a variação da temperatura com a altitude.

2 – Do mesmo modo, para cada instante e nodo de uma grelha global de  $0.75^\circ \times 0.75^\circ$  o ZWD ERA Interim é calculado a partir das grelhas correspondentes dos parâmetros *Total Column Water Vapour* (TCWV) e *2m-temperature* ( $T_0$ ), a partir da expressão (Bevis, et al., 1992), (Bevis, et al., 1994):

$$ZWD_{ERA}(h_s) = - \left( 0.101995 + \frac{1,725.55}{T_m} \right) \frac{TCWV}{1,000} \quad (8)$$

onde  $T_m$  é a temperatura média da troposfera, que pode ser modelada a partir de  $T_0$ , de acordo com, por exemplo, (Mendes, et al., 2000), (Mendes, 1999):

$$T_m = 50.440 + 0.789 T_0 \quad (9)$$

3 – A partir das grelhas de ZHD e ZWD assim obtidas, a intervalos de 6 h, os correspondentes valores para a posição de cada estação GNSS e instante de medição, são interpolados no espaço e no tempo. Desta forma obtêm-se os valores de ZHD e ZWD ERA Interim, ao nível da orografia do modelo, para o instante e local de cada medida GNSS.

4 – Finalmente os valores de ZHD e ZWD anteriormente obtidos são reduzidos ao nível da altitude de cada estação GNSS.

Os ZTD provenientes dos GNSS são estimados à altitude de cada estação permanente. Os mesmos atrasos obtidos a partir do ERA Interim são estimados ao nível da orografia do modelo. Este aspeto levanta a necessidade de reduzir os atrasos ao mesmo nível, para se tratarem de valores comparáveis. Esta redução apresenta-se diferente para cada uma das componentes que constituem o ZTD (ZHD e ZWD), uma vez que a forma como cada componente varia com a altitude é muito diferente, pelo que é necessário a sua separação e

posterior redução de altitude. Para esse fim usaram-se as equações (5) e (6) para a redução do ZHD e a expressão (10), para a redução do ZWD (Kouba, 2008):

$$ZWD(h_s) = ZWD(h_0) e^{\frac{h_0 - h_s}{2000}} \quad (10)$$

Na equação (10), onde se representa o ZWD em função da altitude,  $h_s$  e  $h_0$  correspondem às alturas elipsoidais da estação GNSS e da orografia do modelo, respetivamente.

Os valores de ZHD e ZWD do modelo, assim calculados ao nível da estação GNSS, são finalmente somados, obtendo-se o correspondente valor de ZTD. Nesta fase a comparação é realizada ao nível da estação, no entanto numa fase posterior do estudo o nível de interesse é o nível do mar.

#### 4.1.1. Análise por estação

Também para esta comparação são determinados os parâmetros estatísticos das diferenças, para melhor caracterizar a relação entre os ZTD obtidos por fontes diferentes.

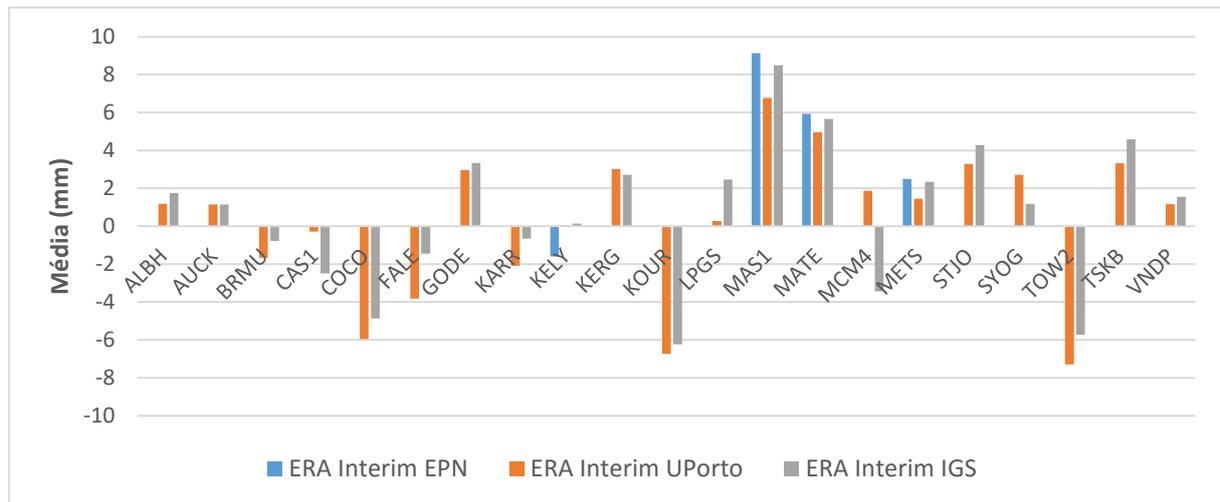


Figura 4.1 – Média das diferenças de ZTD entre ERA Interim e GNSS para cada estação da primeira rede

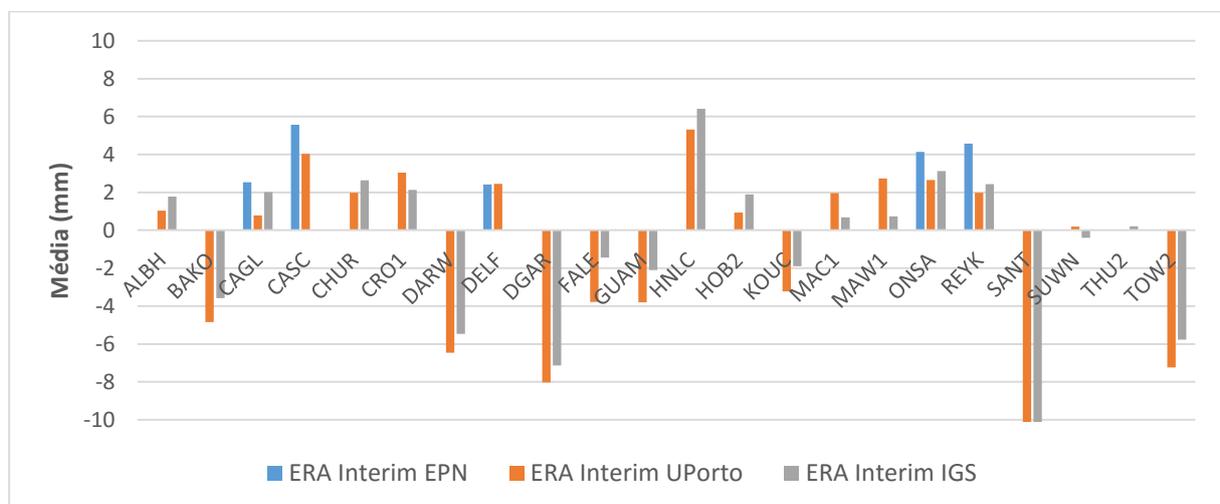
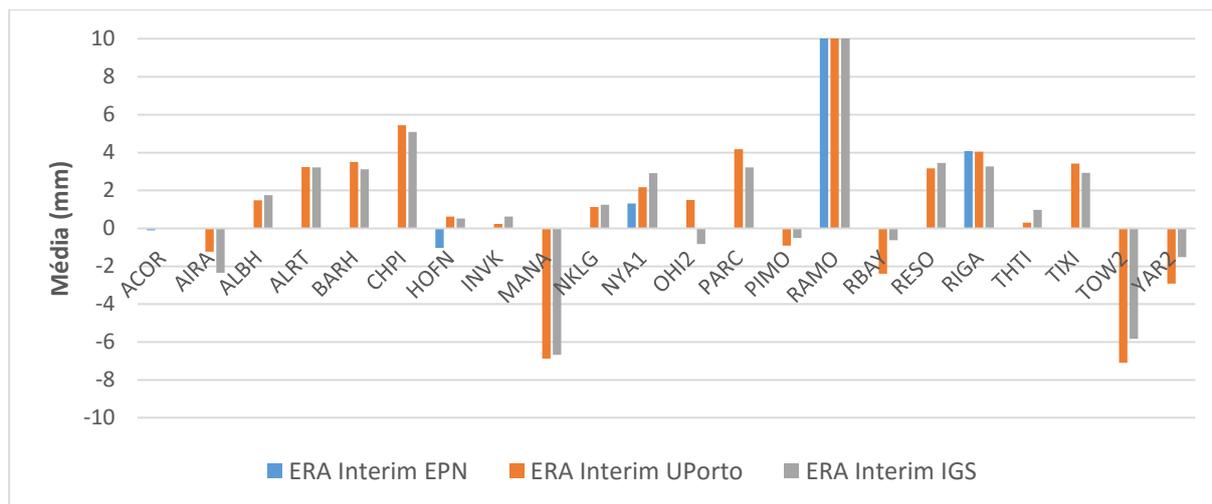


Figura 4.2 – Média das diferenças de ZTD entre ERA Interim e GNSS para cada estação da segunda rede



**Figura 4.3** – Média das diferenças de ZTD entre ERA Interim e GNSS para cada estação da terceira rede

Nos gráficos das figuras 4.1, 4.2 e 4.3 representam-se os valores médios das diferenças de ZTD ERA Interim GNSS para cada estação das três redes. Estes valores são tendencialmente inferiores a 4 mm, em valor absoluto, à exceção de duas estações (SANT da segunda rede e RAMO da terceira), em que este valor é da ordem dos 15 mm. Nestas estações, o valor médio muito significativamente diferente de zero nas três comparações sugere a presença de um erro sistemático, devido ao facto de estas estações possuírem altitudes elevadas e da altitude da estação ser significativamente diferente da altitude da orografia do modelo atmosférico, sugerindo a presença de um erro associado à redução de altitude do ZWD, dada pela equação (10). Este aspeto indica que estas estações não deverão ser usadas como fonte de cálculo da WTC, uma vez que os respetivos ZTD não apresentam precisão suficiente e que a expressão de redução de altitude adotada por (Kouba, 2008) deverá ser objeto de estudo no futuro.

Relativamente à dispersão das diferenças calculadas, as diferenças com a EPN apresentam um desvio-padrão médio de 10 mm, as diferenças com o IGS têm um desvio-padrão médio de 13 mm e o desvio-padrão médio das diferenças com os ZTD UPorto é igualmente de 13 mm. Os desvios-padrão destas diferenças variam no intervalo 6-15 mm, 5-29 mm e 4-20 mm, respetivamente. É de notar que o número de estações na comparação com a EPN é muito reduzido.

Nos gráficos das Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 representam-se os desvios-padrão das diferenças de ZTD entre o modelo e cada uma das soluções GNSS (EPN, IGS e UPorto) para cada estação de cada rede estabelecida. A comparação destes gráficos com os gráficos das Figuras 3.5, 3.6 e 3.7 do capítulo anterior, permite verificar se o padrão das diferenças de ZTD com o modelo ERA Interim é semelhante às diferenças entre soluções GNSS, permitindo também identificar em qual das soluções as diferenças de ZTD com o modelo são superiores.

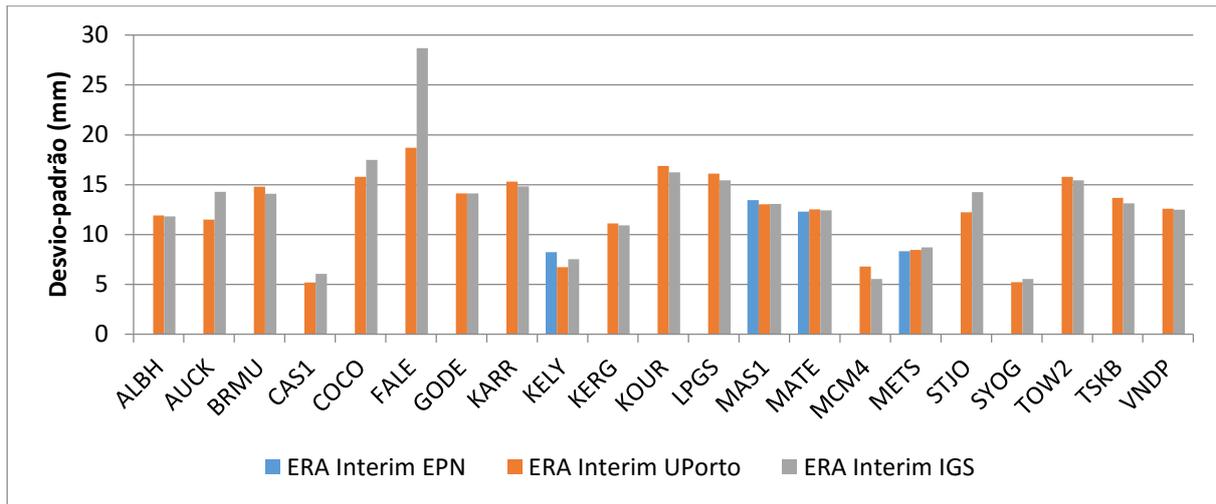


Figura 4.4 – Desvio-padrão das diferenças de ZTD entre ERA Interim e GNSS para cada estação da primeira rede

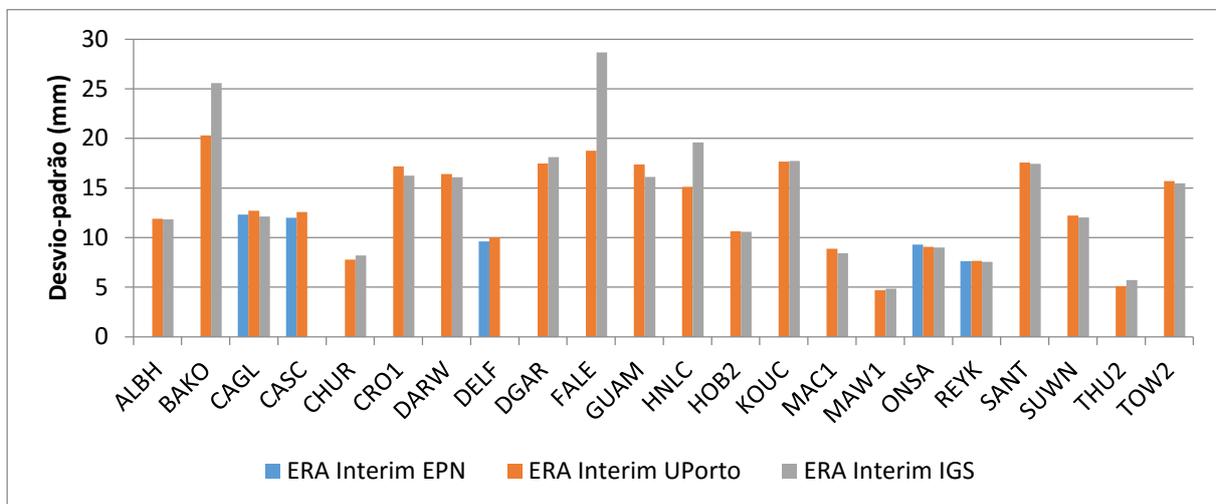


Figura 4.5 – Desvio-padrão das diferenças de ZTD entre ERA Interim e GNSS para cada estação da segunda rede

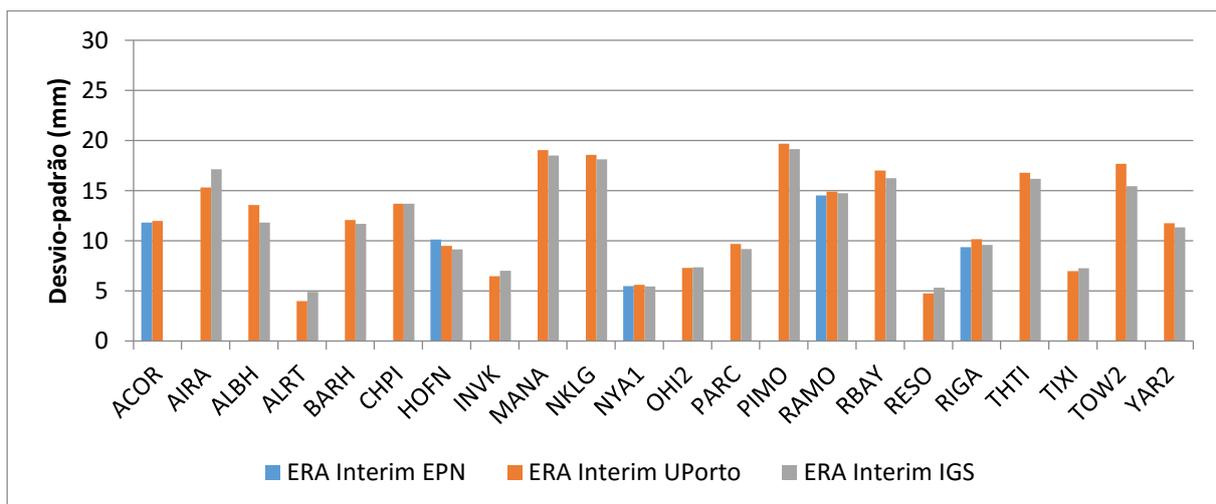


Figura 4.6 – Desvio-padrão das diferenças de ZTD entre ERA Interim e GNSS para cada estação da terceira rede

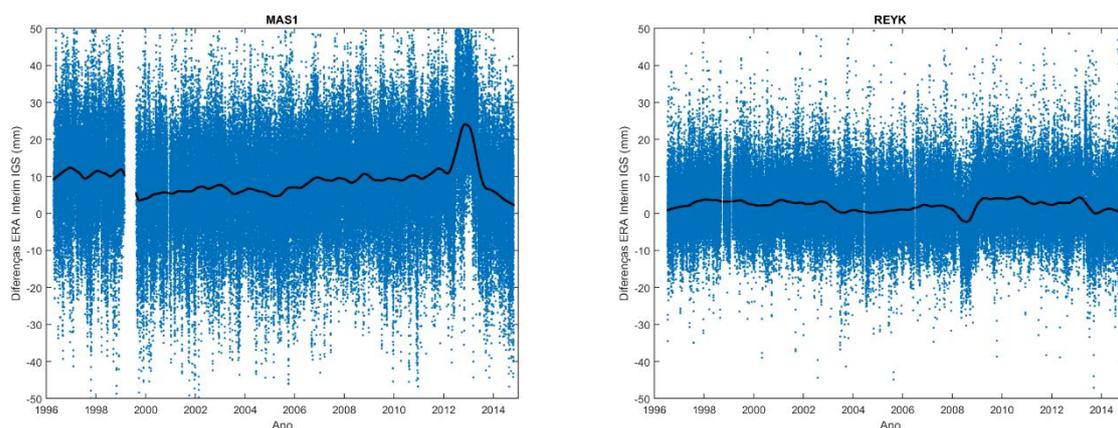
Na comparação de ZTD entre UPorto e IGS, no capítulo 3, verificou-se que determinadas estações, tais como FALE e BAKO, apresentavam valores de desvio-padrão das diferenças

muito elevados relativamente às restantes estações. Estando estes valores fora da precisão com que os ZTD são estimados com GNSS, uma das soluções, UPorto ou IGS (ou ambas), apresentam atrasos troposféricos com baixa qualidade.

Para a estação FALE, o desvio-padrão das diferenças de ZTD entre ERA Interim e IGS é cerca de 10 mm superior ao desvio-padrão das diferenças ERA Interim UPorto. Para a estação BAKO também o desvio-padrão das diferenças ERA Interim IGS é maior (cerca de 6 mm) do que o desvio-padrão das diferenças ERA Interim UPorto. Estes valores permitem concluir que os ZTD UPorto estão mais próximos dos ZTD do ERA Interim do que os mesmos atrasos do IGS.

Outro aspeto detetado, na análise do capítulo anterior, foi a descontinuidade nas diferenças dos ZTD em determinados períodos, para algumas estações. Uma vez que estas descontinuidades estavam presentes apenas em comparações com o IGS (na comparação EPN-UPorto não se verificaram as mesmas descontinuidades), a análise do capítulo anterior indica que a origem das descontinuidades está nos ZTD IGS.

Nos gráficos da Figura 4.7 mostram-se as diferenças de ZTD entre ERA Interim e IGS para as mesmas estações (MAS1 e REYK). As mesmas descontinuidades estão presentes nos mesmos períodos (em torno dos anos 2013 e 2009 para MAS1 e REYK, respetivamente). Na comparação entre os ZTD do ERA Interim e os ZTD UPorto estas descontinuidades não estão presentes. A comparação com o modelo permite confirmar que a origem das descontinuidades nas diferenças de ZTD está nos ZTD IGS e não nos ZTD UPorto.



**Figura 4.7** – Diferenças de ZTD entre ERA Interim e IGS para as estações MAS1 e REYK

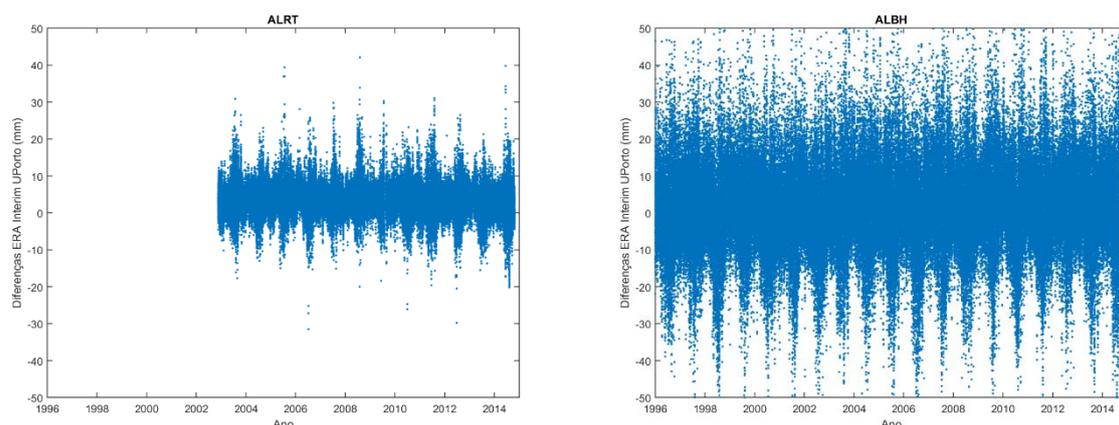
Apesar das diferenças de ZTD entre o modelo e as duas soluções (UPorto e IGS) apresentarem um padrão muito semelhante, como se pode verificar pela análise dos gráficos das Figuras 4.4, 4.5 e 4.6, em algumas estações as diferenças com o IGS são muito superiores. Os ZTD disponibilizados pelo IGS apresentam também descontinuidades quando comparados com os ZTD do modelo, o que não acontece com os ZTD UPorto. Verificando

estes aspetos, os resultados mostram que, apesar do padrão das diferenças ser semelhante para as duas soluções (UPorto e IGS), os ZTD UPorto apresentam melhor qualidade em determinadas estações ou em determinados períodos. Este aspeto poderá ser explicado pelo facto de os ZTD UPorto apresentarem um processamento homogéneo durante todo o período, utilizando sempre os mesmos parâmetros. A alteração de qualquer parâmetro, que poderá explicar as descontinuidades nos ZTD IGS, torna a metodologia não uniforme ao longo do período de funcionamento de cada estação permanente.

Todos os parâmetros estatísticos representados neste capítulo estão registados no Anexo C.

## 4.2. Comportamento das diferenças em função da latitude

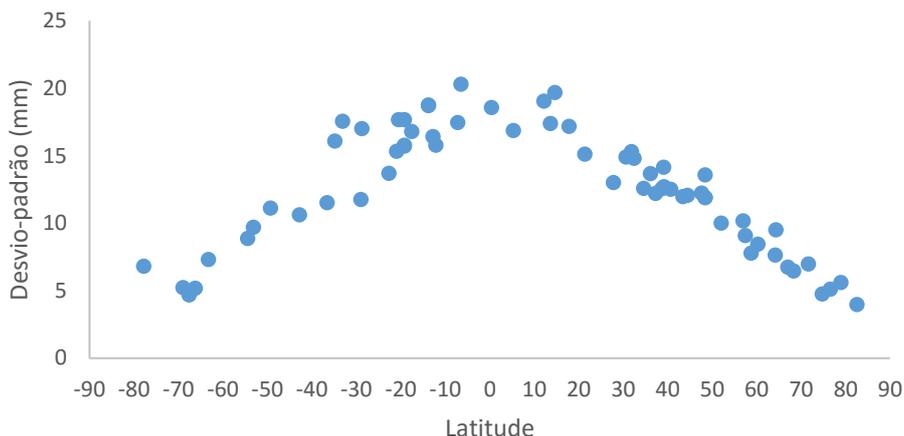
As diferenças de ZTD entre GNSS e o modelo de reanálise ERA Interim, em cada estação, apresentam um padrão diversificado, na medida em que os valores de desvio-padrão variam de estação para estação num intervalo superior a 10 mm.



**Figura 4.8** – Diferenças de ZTD entre ERA Interim e UPorto para as estações ALRT e ALBH

Nos gráficos da Figura 4.8 representam-se as diferenças de ZTD entre o modelo ERA Interim e UPorto para duas estações em que a dispersão das diferenças é claramente diferente. Note-se que os eixos das diferenças estão ambos no mesmo intervalo (-50 50 mm). Para a estação ALRT o desvio-padrão é de 4 mm, enquanto para a estação ALBH o desvio-padrão é de 12 mm. Estas duas estações são apenas um exemplo que mostra a diferença da dispersão, muitos outros pares de estações poderiam mostrar este aspeto.

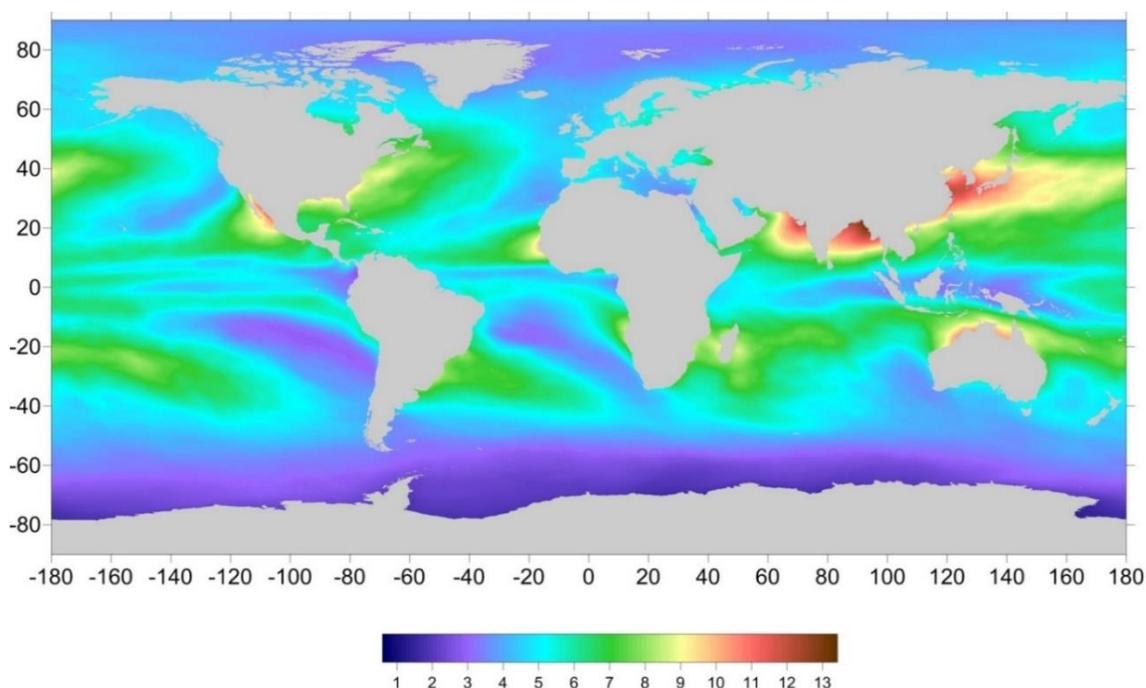
Para perceber o que está por trás deste efeito é necessário verificar a posição geográfica das estações em análise. A estação ALRT situa-se a uma latitude superior a 82°N. A estação ALBH situa-se a uma latitude próxima dos 48°N. No gráfico da Figura 4.9, onde cada ponto representa uma estação, representam-se os valores de desvio-padrão, das diferenças ERA Interim UPorto, considerando as estações de todas as redes, em função da latitude de cada estação.



**Figura 4.9** – Desvio-padrão das diferenças ERA Interim UPorto em função da latitude de cada estação

Os resultados mostram claramente que a latitude está altamente relacionada com o desvio-padrão das diferenças. Pela análise ao gráfico da Figura 4.9 verifica-se que quanto mais próximo do equador, maiores são as diferenças entre os ZTD obtidos a partir do modelo ERA Interim e os ZTD UPorto. Não são representados os desvios-padrão das diferenças ERA Interim IGS e ERA Interim EPN em função da latitude, mas o comportamento é semelhante ao que está representado no gráfico da Figura 4.9.

A variabilidade espaço-temporal do atraso troposférico (ZTD) é devida essencialmente à componente húmida (ZWD), uma vez que a componente seca (ZHD) apresenta uma variabilidade inferior. Esta variabilidade, de modo geral, é inferior nos polos e superior junto ao equador, o que explica o resultado verificado no gráfico da Figura 4.9.



**Figura 4.10** – Desvio-padrão da WTC (em centímetros) extraído de (Fernandes, et al., 2013)

Na Figura 4.10 representa-se o desvio-padrão da WTC em centímetros, calculado para um período de 2 anos. Verifica-se que, de um modo geral, a variabilidade da WTC (ou do ZWD) é menor nos polos, notando que a variabilidade do ZTD é devida essencialmente à componente húmida da troposfera.

### 4.3. Estabilidade dos ZTD ERA Interim

A análise feita nas subseções anteriores deste capítulo desenvolve-se individualmente para cada estação permanente. Sendo um dos objetivos deste estudo a avaliação da estabilidade das medidas do modelo atmosférico quando comparadas com a informação obtida pelos GNSS, é necessário perceber o comportamento das diferenças entre as duas fontes de informação ao longo do tempo. Para isso, as diferenças calculadas para cada estação são concatenadas num só ficheiro. A análise à informação deste ficheiro permitirá estudar, em termos globais, sem separação por estação, a proximidade dos ZTD ao longo do tempo.

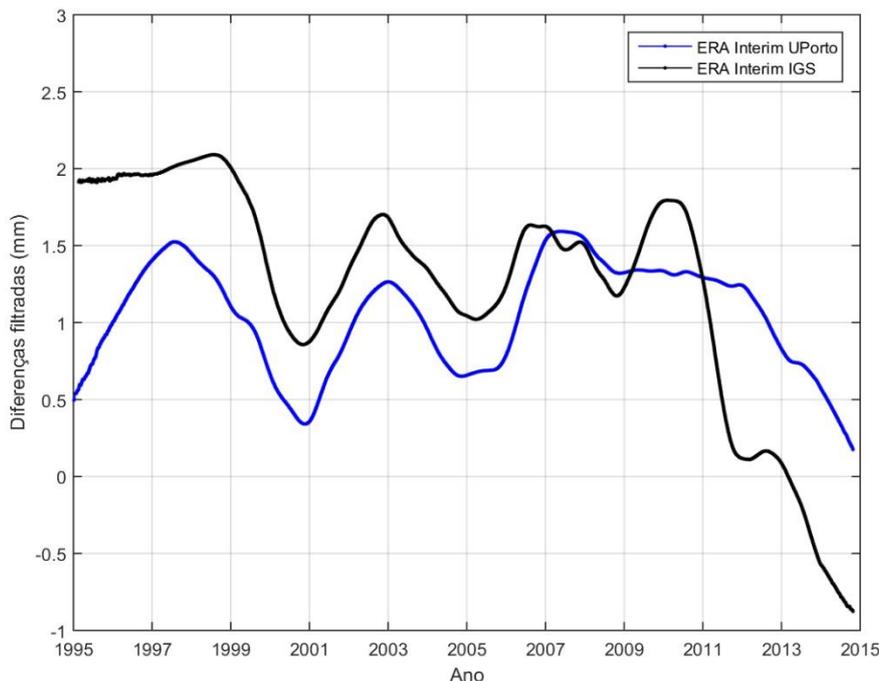
Para esta análise são utilizadas todas as estações das três redes selecionadas no capítulo 3, que pertencem ao IGS. Utilizando o mesmo conjunto de estações é feita a análise, ao longo do tempo, às diferenças entre os ZTD ERA Interim e os ZTD IGS e UPorto.

Reunindo as diferenças de ZTD (ERA Interim-UPorto e ERA Interim-IGS) de todas as estações e aplicando o filtro *lowess* de modo a visualizar a tendência ao longo dos anos resultam os gráficos da Figura 4.11, onde as diferenças filtradas entre os ZTD ERA Interim e os ZTD UPorto se representam a azul e as diferenças filtradas entre os ZTD ERA Interim e os ZTD IGS se representam a preto.

O *lowess*, cujo nome é derivado do termo “locally weighted scatter plot smooth”, é um filtro utilizado no âmbito do processamento de sinal. Este filtro usa pequenos e sucessivos ajustes lineares para suavizar os dados. É robusto, na medida em que não é sensível a *outliers* (MathWorks, 2015).

A sobreposição dos dois sinais, correspondentes a cada uma das comparações, permite melhor comparar as soluções UPorto e IGS (através da comparação entre cada uma e o modelo atmosférico). A cada um dos gráficos resultantes foi removido o sinal de período inferior a 366 dias (anual), de modo a analisar a tendência das diferenças.

A visualização destes gráficos permite concluir relativamente à tendência das diferenças de ZTD entre o modelo e as duas soluções GNSS (UPorto e IGS) ao longo do tempo, em termos globais, uma vez que é utilizado um conjunto de estações permanentes com uma boa distribuição geográfica.



**Figura 4.11** – Diferenças suavizadas de ZTD entre ERA Interim e GNSS

Globalmente os gráficos mostram que as duas diferenças têm sinais significativamente diferentes, sobretudo no período depois de 2007. Note-se que foi utilizada a expressão ERA-GNSS para o cálculo das diferenças.

As diferenças filtradas entre o modelo e UPorto (azul) apresentam-se sempre positivas, o que indica que os ZTD ERA Interim são tendencialmente maiores do que os ZTD UPorto. As diferenças com os ZTD IGS (preto) também apresentam uma tendência semelhante à exceção do período mais recente, a partir de 2013 aproximadamente, em que as diferenças suavizadas são negativas e, portanto, os ZTD IGS são tendencialmente maiores do que os ZTD do modelo, ao contrário do período anterior a este instante, em que os ZTD do modelo são tendencialmente maiores do que os ZTD IGS.

As diferenças ERA-UPorto não evidenciam nenhuma tendência linear significativa, enquanto as diferenças ERA-IGS indicam uma clara tendência linear negativa. As retas de ajuste pelo método dos mínimos quadrados para estas diferenças apresentam um declive de 0.00 e -0.10 mm/ano, respetivamente. As diferenças significativas, entre os dois sinais, depois de 2007 sugerem que as descontinuidades detetadas nalgumas estações IGS podem estar na origem destas diferenças. Considerando apenas o período depois de 2007, a reta de ajuste pelos mínimos quadrados apresenta um declive de -0.35 milímetros por ano para as diferenças ERA-IGS.

Apesar da análise aqui apresentada necessitar de ser aprofundada em trabalho futuro, eliminando da comparação as estações com descontinuidades, os resultados mostram que

os ZTD estimados com GNSS, usando metodologias estado da arte e os mesmos parâmetros durante todo o período em análise (funções de mapeamento, ZHD a priori, etc.) tais como nas soluções UPorto, apresentam-se estáveis no tempo, quando comparados com o modelo atmosférico de reanálise ERA Interim. Os ZTD UPorto apresentam um processamento homogêneo durante todo o período, sem alteração de qualquer variável, que poderá introduzir eventualmente descontinuidades nos ZTD.

OS ZTD disponibilizados pelo IGS e EPN têm uma precisão global da ordem dos 4-6 mm. Existem no entanto períodos nos quais a precisão das soluções é degradada, quer através da presença de valores não aceitáveis (*outliers*), quer através da presença de descontinuidades (saltos bruscos). Estes valores podem ser detetados e eliminados através da análise das diferenças relativas a um modelo, tal como o ERA Interim. Nesta análise é importante ter em conta não só os parâmetros estatísticos, mas também o sinal das diferenças, através de uma inspeção dos gráficos representativos das mesmas. Só assim se obtêm ZTD com precisão adequada ao uso em aplicações, tais como no cálculo de valores da WTC em medidas de Altimetria por Satélite (Fernandes, et al., 2015) ou em meteorologia (Walpersdorf, et al., 2007).

## Capítulo V

# 5. ZTD estimados por GNSS na monitorização dos Radiómetros de Micro-ondas

A análise presente nas seções anteriores desenvolveu-se em torno dos valores do atraso troposférico total (ZTD), estimado por GNSS ou obtido a partir de um modelo atmosférico, sendo este valor definido como a soma do ZHD e do ZWD. Neste capítulo a análise incide apenas na componente húmida da troposfera (ZWD), uma vez que é essa a quantidade medida pelos radiómetros de micro-ondas a bordo dos satélites altimétricos.

Neste capítulo apresenta-se a comparação entre os valores de ZWD estimados com GNSS e os correspondentes obtidos a partir dos radiómetros de micro-ondas (MWR) a bordo das missões altimétricas ERS-2, ENVISAT, TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2 e SARAL/AltiKa. O objetivo principal é avaliar até que ponto os ZWD determinados com GNSS podem ser utilizados na avaliação da estabilidade dos MWR.

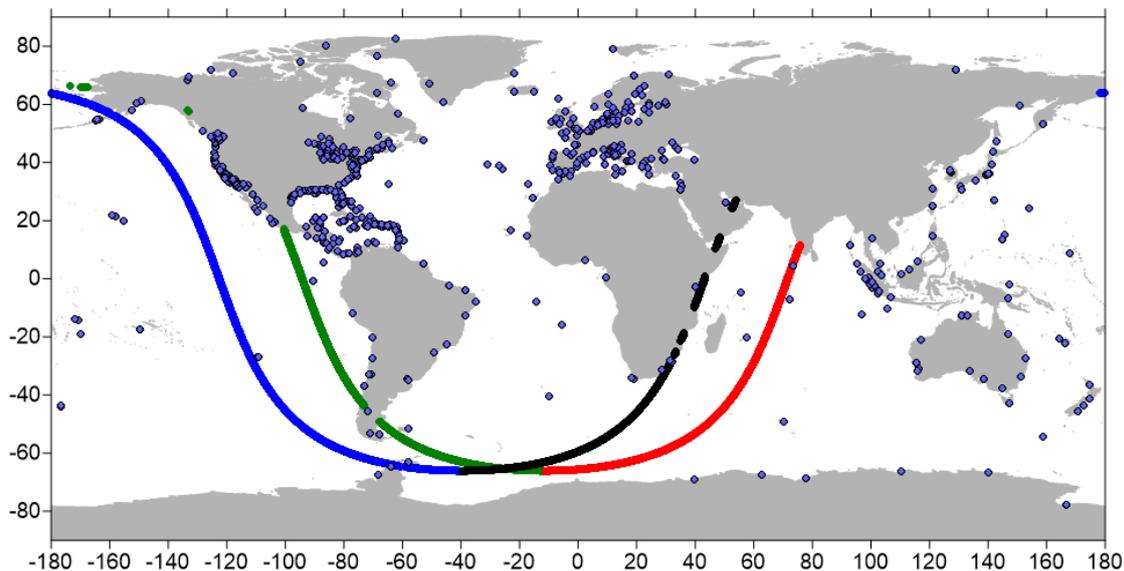
### 5.1. Seleção de pontos junto à costa

O percurso de cada satélite altimétrico em órbita da Terra, com uma determinada resolução temporal e espacial, é dividido em ciclos, revoluções e passes. Cada revolução é separada em dois passes: ascendente (trajetória de sul para norte) e descendente (de norte para sul). Dependendo de cada satélite, cada ciclo é constituído por um determinado número de passes, que corresponde ao dobro do número de revoluções.

A informação obtida pelos radiómetros de micro-ondas em análise consiste no conjunto de pontos medidos ao longo do percurso do satélite (*ground track*) em órbita da Terra e, por isso, apresenta-se também dividida em ciclos e passes. Cada ponto medido pelo radiómetro está geograficamente definido pelas suas coordenadas latitude e longitude, tal como acontece com as estações GNSS permanentes.

Na Figura 5.1 representam-se os passes 2, 3, 4 e 5 do ciclo 3 do JASON-1 a verde, vermelho, azul e preto, respetivamente. Esta representação é apenas um exemplo para mostrar a

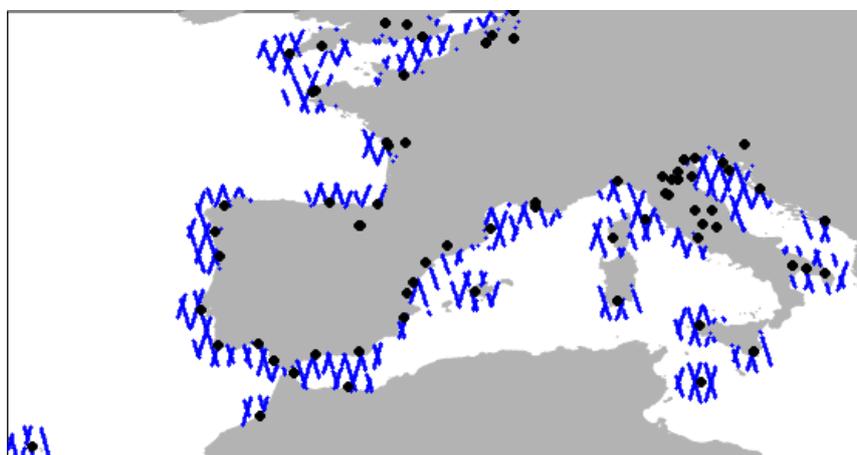
configuração dos passes e revoluções. Estes passes formam duas revoluções, sendo que dois são descendentes (verde e azul) e os outros dois são ascendentes (vermelho e preto).



**Figura 5.1** – Estações GNSS utilizadas e representação dos passes 2, 3, 4 e 5 do ciclo 3 do JASON-1

Na Figura 5.1 estão também representadas as estações GNSS (pontos a azul) utilizadas no primeiro passo desta análise, que formam um grupo de cerca de 750 estações costeiras distribuídas mundialmente. Estas estações pertencem a três redes: IGS, EPN e SuomiNet. A última é uma rede semelhante às restantes, mas com estações permanentes apenas na região dos Estados Unidos da América e América Central (UCAR, 2015).

Uma vez que esta análise está confinada a regiões costeiras, a informação dos radiómetros é filtrada, na medida em que grande parte desta informação não é necessária e, assim, os procedimentos seguintes tornam-se mais céleres. Assim sendo, o primeiro passo consiste em seleccionar os pontos dos radiómetros que estão a menos de 100 km de uma qualquer estação do grupo referido anteriormente e representado na Figura 5.1.



**Figura 5.2** – Pontos seleccionados (a azul) para o ciclo 1 do ERS-2 numa parte da região da Europa em torno das estações GNSS (a preto)

Na Figura 5.2 mostram-se os pontos selecionados (a menos de 100 km de uma qualquer estação) para o ciclo 1 do ERS-2 numa parte da Europa. Este primeiro procedimento constitui a rejeição de um grande volume de informação desnecessária para esta análise.

Dados os diferentes domínios espaciais de cada missão altimétrica, algumas das estações (nomeadamente junto aos polos) situam-se em zonas para as quais não existem medidas dos radiómetros a menos de 100 km. Devido à falta de coincidência temporal e/ou espacial entre as duas fontes de informação, algumas estações vão sendo eliminadas ao longo deste procedimento por não apresentarem comparação possível com a informação dos MWR.

## 5.2. Interpolação temporal

A comparação entre GNSS e radiómetros é feita em cada estação permanente. O ZWD medido em cada ponto do radiómetro, a menos de 100 km da estação, é comparado com o mesmo valor medido na estação no mesmo momento. Para isso é necessário fazer interpolação no tempo. Para cada ZWD do radiómetro é obtido um valor interpolado do GNSS, ou seja, a cada ponto medido pelo radiómetro com uma determinada distância à estação, nunca superior a 100 km, está associado um valor de ZWD obtido por GNSS e interpolado para o mesmo instante no ponto correspondente à localização da estação.

Utilizando a mesma metodologia referida no capítulo anterior, todos os valores de ZWD obtidos a partir de GNSS são previamente reduzidos ao nível do mar. Só nestas condições é possível a comparação com a informação dos radiómetros de micro-ondas, uma vez que estes efetuam medidas de ZWD da superfície do mar.

Uma vez realizado este procedimento, em cada estação tem-se, para todos os pontos a menos de 100 km da mesma, o ZWD medido pelo radiómetro em cada ponto, o ZWD estimado por GNSS na estação no instante correspondente, a distância entre o ponto e a estação e a distância do ponto à costa.

Assim sendo, é possível determinar as diferenças entre o ZWD obtido por GNSS e o mesmo valor medido pelo radiómetro. Note-se que os dois valores a comparar estão referidos ao mesmo instante, mas medidos em pontos diferentes, sempre a menos de 100km. Uma vez determinadas as diferenças em cada estação, é possível juntar toda esta informação, sem diferenciação da estação à qual pertence. Esta junção da informação permitirá concluir, em termos gerais, relativamente ao comportamento das diferenças entre GNSS e MWR, de acordo com as condições referidas anteriormente, em função de diversos parâmetros, tais como distância à costa, distância à estação, tempo ou latitude.

### 5.3. Diferenças em função da distância à costa

O cálculo das diferenças de ZWD para cada radiómetro, sem diferenciação por estação, permite representar as mesmas em função da distância à costa e perceber o seu comportamento, de modo a identificar a distância para a qual as diferenças são mínimas. Para curtas distâncias à costa é esperado que as diferenças sejam maiores, devido à contaminação da terra do radiómetro e à maior variabilidade do ZWD em zonas costeiras, por outro lado, a partir de uma determinada distância é esperado que as diferenças aumentem, uma vez que as medidas a partir das quais foram calculadas as diferenças são obtidas em pontos cada vez mais distantes. Para esta representação foram calculados valores de erro médio quadrático (EMQ) das diferenças de ZWD, para classes de 5 km de distância à costa.

Na análise representada nas figuras 5.3 a 5.8 foram considerados três conjuntos de pontos. A vermelho (MWR2) são considerados todos os pontos classificados como tendo medidas MWR válidas, após passarem um conjunto de critérios de validade. A azul (MWR1) são considerados os pontos do MWR que passaram os critérios anteriores e que se encontram até uma certa distância mínima da costa, que é diferente para cada satélite. Os critérios de validade referidos, descritos em pormenor em (Fernandes, et al., 2015), estão relacionados com contaminação da terra e gelo, mau funcionamento do MWR, etc. O conjunto MWR1 é assim um subconjunto do MWR2, isto é, o conjunto de pontos que passou todos os critérios de validade exceto o da distância mínima à costa, relacionado com a contaminação da terra. Na representação a preto (GPD+) a informação obtida pelos radiómetros foi sujeita à aplicação de um método designado por *GNSS – derived Path Delay Plus* (Fernandes, et al., 2010), (Fernandes, et al., 2015). Este método tem como objetivo a determinação da WTC, para ser utilizada nas medidas de altimetria, em regiões costeiras, onde as medidas dos MWR se tornam inválidas. Esta determinação é realizada a partir da combinação de informação de três fontes independentes: valores de ZWD obtidos com os atrasos troposféricos zenitais determinados em estações GNSS costeiras, medidas dos MWR consideradas válidas (segundo os critérios de validade já referidos), medidas de radiómetros de micro-ondas a bordo de vários satélites de deteção remota e a partir de um modelo atmosférico do ECMWF. Para cada ponto inválido medido pelo MWR, esta metodologia faz interpolação no tempo e no espaço, usando toda as observações disponíveis até cerca de 100km do ponto inválido e com uma diferença temporal inferior a 100 minutos.

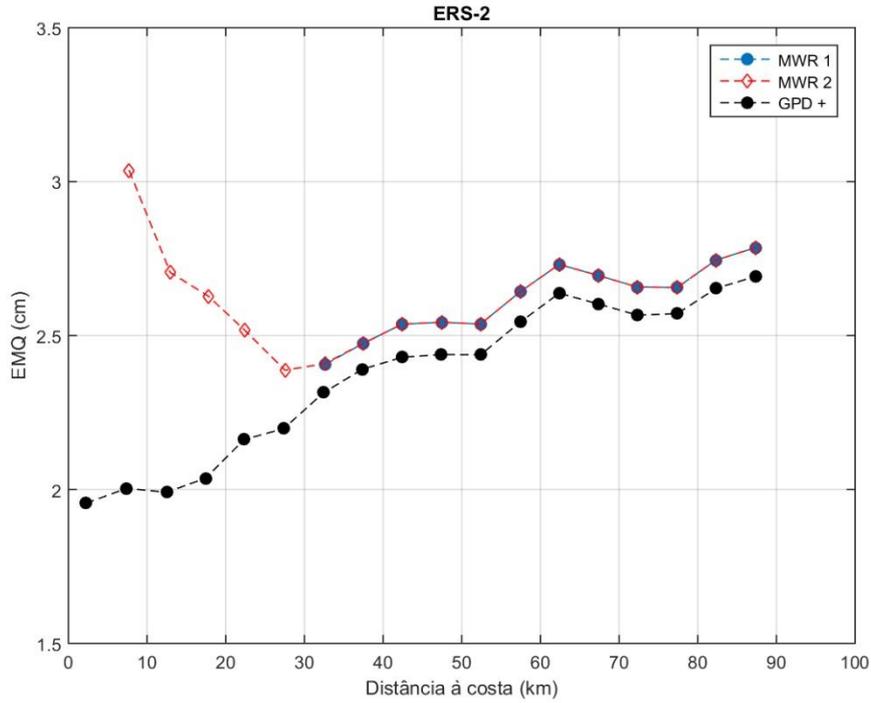


Figura 5.3 – EMQ por classes das diferenças de ZWD em função da distância à costa para o ERS-2

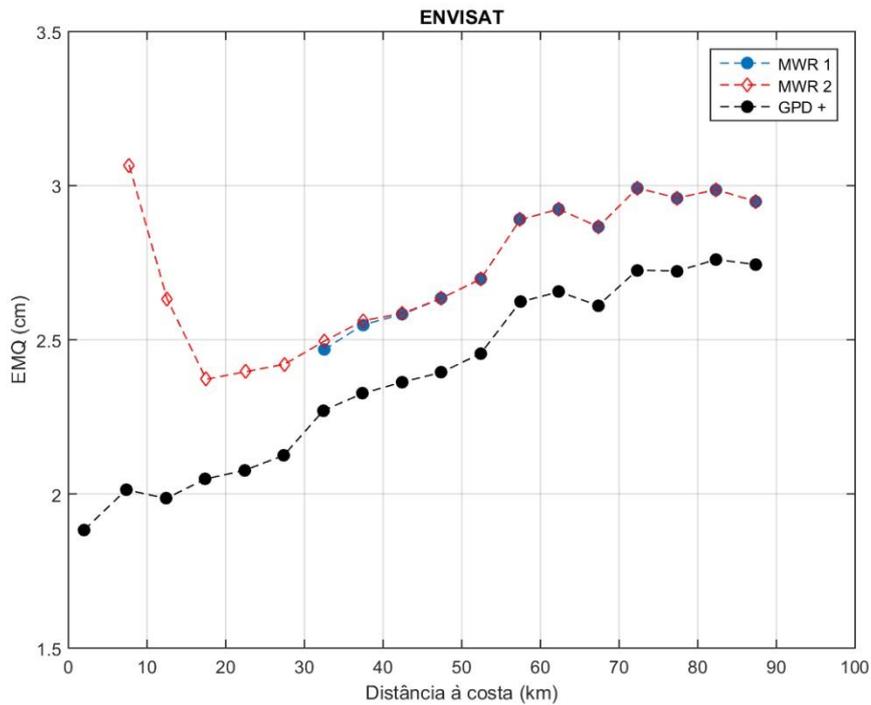


Figura 5.4 – EMQ por classes das diferenças em função da distância à costa para o ENVISAT

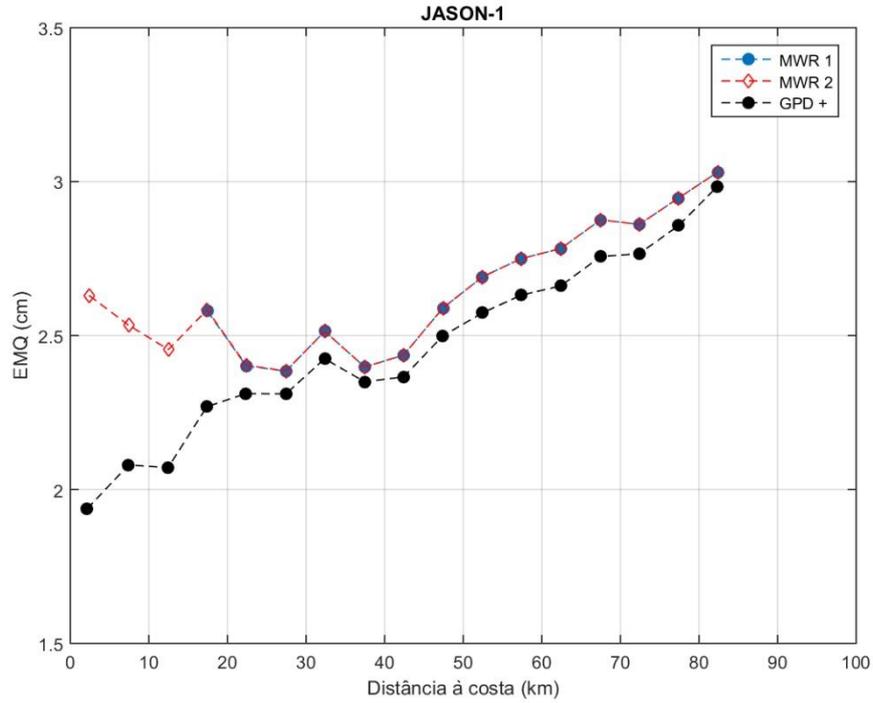


Figura 5.5 – EMQ por classes das diferenças em função da distância à costa para o JASON-1

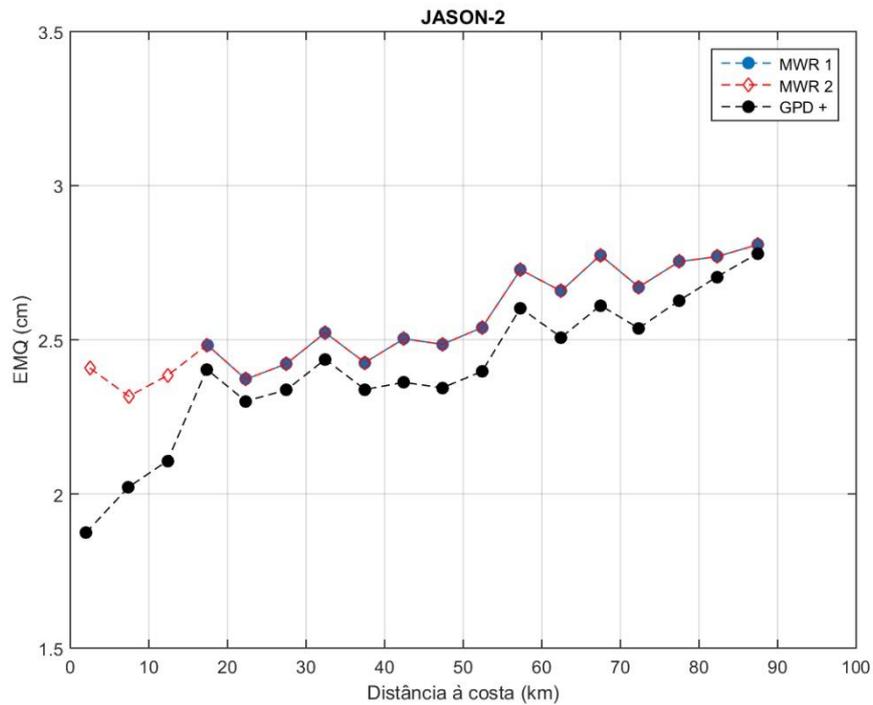


Figura 5.6 – EMQ por classes das diferenças em função da distância à costa para o JASON-2

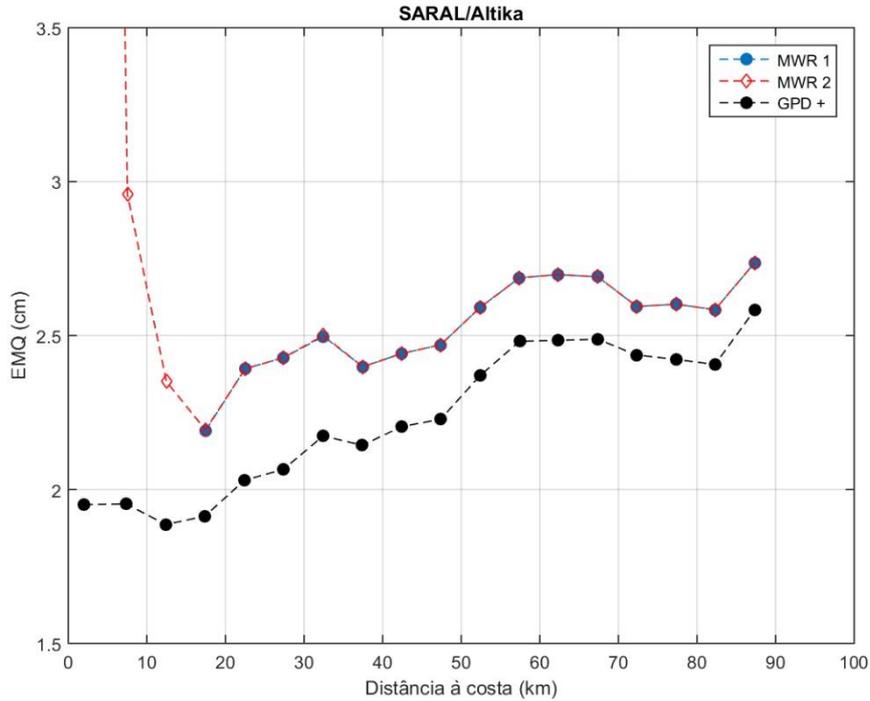


Figura 5.7 – EMQ por classes das diferenças em função da distância à costa para o SARAL/AltiKa

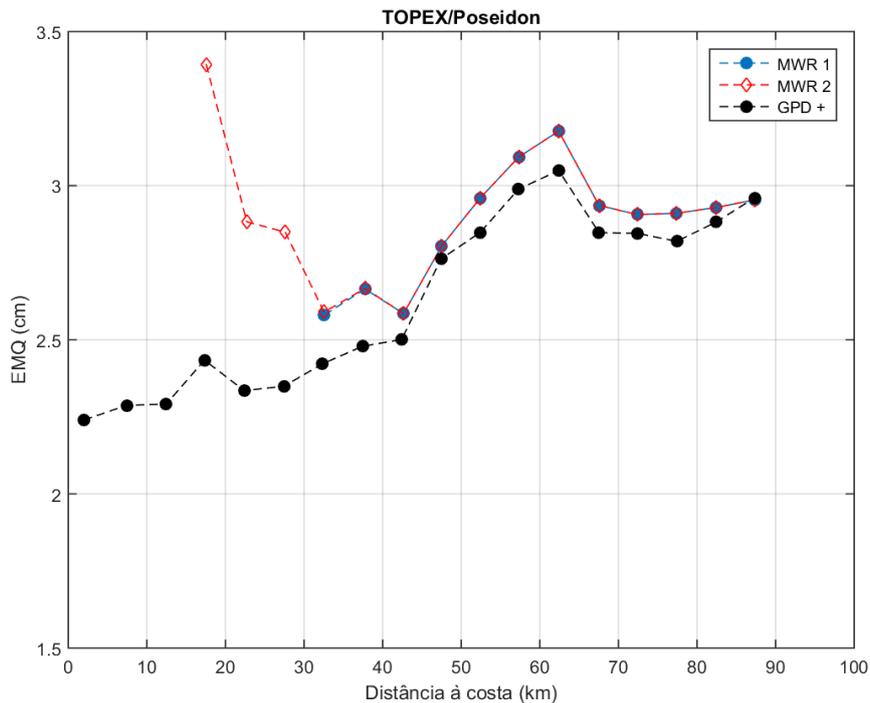


Figura 5.8 – EMQ por classes das diferenças em função da distância à costa para o TOPEX/Poseidon

Os gráficos das Figuras 5.3 a 5.8 representam o EMQ, para classes de 5 km de distância à costa, das diferenças entre o ZWD estimado por GNSS e os vários ZWD relativos aos radiómetros de micro-ondas para os satélites ERS-2, ENVISAT, JASON-1, JASON-2,

SARAL/AltiKa e TOPEX/Poseidon, respetivamente. O eixo da distância à costa está no intervalo 0-100 km e o eixo do EMQ está representado no intervalo 1.5-3.5 cm

Os resultados mostram que os gráficos apresentam um aspeto semelhante, evidenciando uma banda de distância à costa em que as diferenças são mínimas. Este era o resultado esperado, uma vez que pontos muito próximos da costa estão contaminados e, por outro lado, pontos muito distantes apresentam diferenças maiores.

Os resultados mostram que as diferenças são mínimas para uma distância à costa em torno dos 30 e 20 km para os satélites ERS-2 e ENVISAT, respetivamente. Relativamente aos satélites JASON-1 e JASON-2 esta distância para a qual a diferença é mínima não é muito clara, não se visualizando o efeito da contaminação terra, no entanto as diferenças aumentam visivelmente a partir dos 40 km da costa. Este aspeto é devido ao facto de os valores MWR dos satélites JASON já estarem melhorados junto à costa (Brown, 2010).

Os resultados em relação ao SARAL/AltiKa ainda não são muito conclusivos, uma vez que o período de análise é muito pequeno (inferior a dois anos), no entanto o gráfico respetivo apresenta um aspeto semelhante aos restantes, com um valor mínimo em torno dos 20 km. Por fim, o TOPEX/Poseidon apresenta valores de EMQ inferiores para uma distância à costa compreendida entre os 30 e os 40 km.

A contaminação das medidas dos MWR junto à costa é devida às características instrumentais dos radiómetros e aos algoritmos de processamento adotados para transformar as temperaturas de brilho (TB) medidas em cada banda em WTC. No que toca às características instrumentais, quanto maior o tamanho da pegada, que depende da frequência e do instrumento, maior é a contaminação. No que diz respeito aos algoritmos de processamento, o algoritmo usado nas missões NASA CNES produz medidas em que a contaminação da terra é menos pronunciada. O algoritmo usado nas missões ESA e SARAL/AltiKa (que é o mesmo) produz medidas mais ruidosas junto à costa. Este aspeto está visível nos resultados obtidos. Para além disso, as medidas MWR dos satélites Jason-1 e Jason-2 são já o resultado da aplicação de um algoritmo de melhoria junto à costa (Brown, 2010).

No que diz respeito à análise das diferenças utilizando pontos dos radiómetros resultantes do método GPD+, os resultados são bastante claros. Os valores de EMQ são inferiores ao longo de toda a distância à costa em análise para todos os radiómetros. Este aspeto é mais significativo para pontos mais próximos da costa, onde os valores de EMQ do MWR2 são muito superiores aos respetivos valores do GPD+. Em todas as missões, na representação do erro médio quadrático das diferenças de ZWD entre GNSS e GPD+ não é visível o efeito da contaminação terra, uma vez que os valores não estão contaminados junto à costa. As diferenças apresentam-se menores junto à costa e não a uma determinada distância, tal como acontece no MWR2. Estes resultados mostram que o algoritmo GPD+ é eficiente na remoção

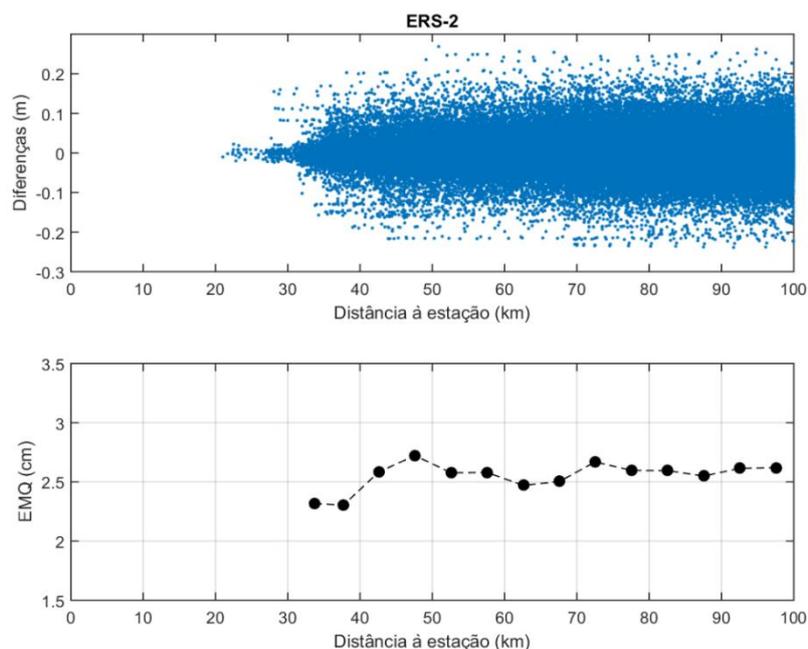
da contaminação da terra presente nas medidas dos MWR, gerando medidas válidas e contínuas até à costa.

Uma vez que na análise foram considerados apenas pontos dos radiómetros a menos de 100 km de uma qualquer estação GNSS, quando se trata da distância à costa o número de pontos para distâncias próximas dos 100 km é muito reduzido, pelo que os valores de EMQ em classes próximas deste valor não são representados, por não se apresentarem significativos. A distância à estação utilizada para seleccionar os pontos, no primeiro procedimento desta análise, deveria ser um pouco maior, relativamente à distância à costa máxima em análise, o que não foi feito nesta abordagem.

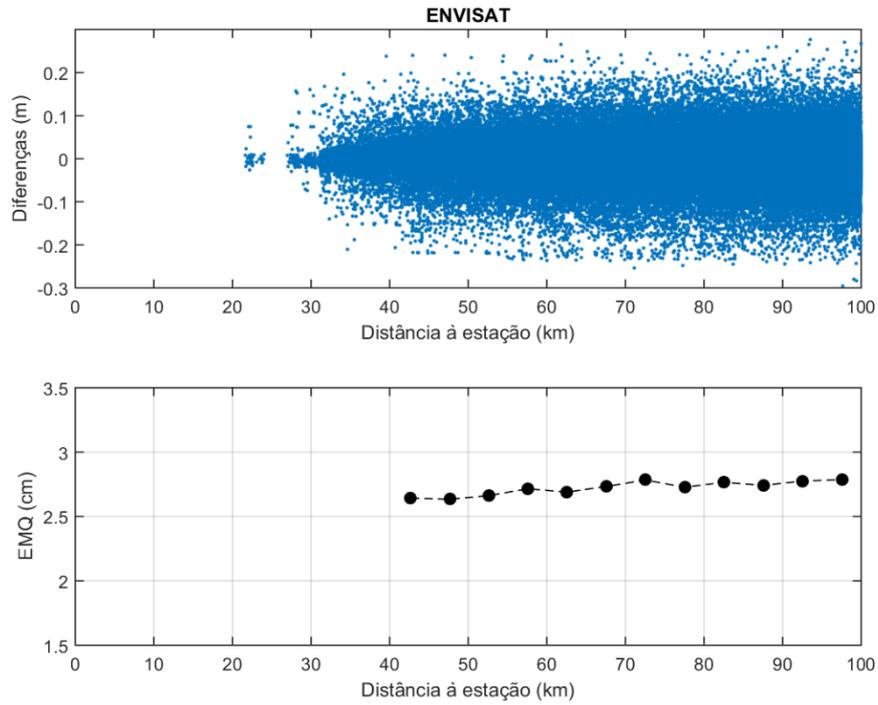
#### 5.4. Diferenças em função da distância à estação

A análise feita na subsecção anterior considera a distância entre cada ponto medido pelo radiómetro e a costa, estudando o comportamento das diferenças de ZWD entre GNSS e radiómetro em função desta mesma distância. As mesmas diferenças analisadas anteriormente são agora representadas em função da distância à estação. Medindo a mesma quantidade no mesmo instante, em pontos diferentes, é esperado que quanto maior a distância entre os pontos, maior será a diferença entre os dois valores.

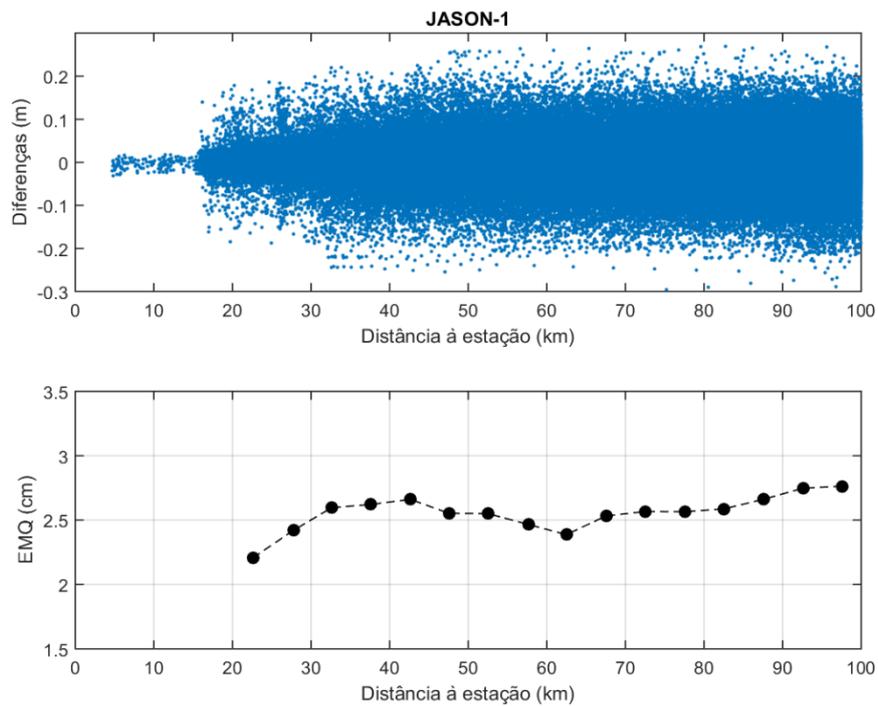
Tal como na análise em função da distância à costa, apresentam-se os gráficos do EMQ para classes de 5km de distância à estação, para cada um dos radiómetros dos satélites ERS-2, ENVISAT, JASON-1, JASON-2, SARAL/AltiKa e TOPEX/Poseidon nas Figuras 5.9 a 5.14, respetivamente.



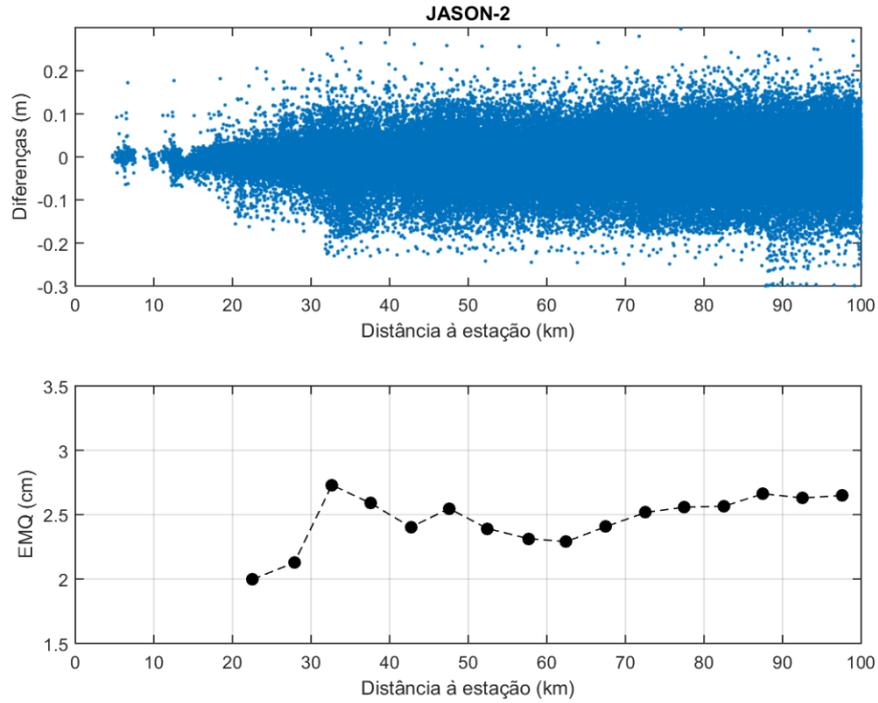
**Figura 5.9** – EMQ das diferenças de ZWD por classes das diferenças em função da distância à estação para o ERS-2



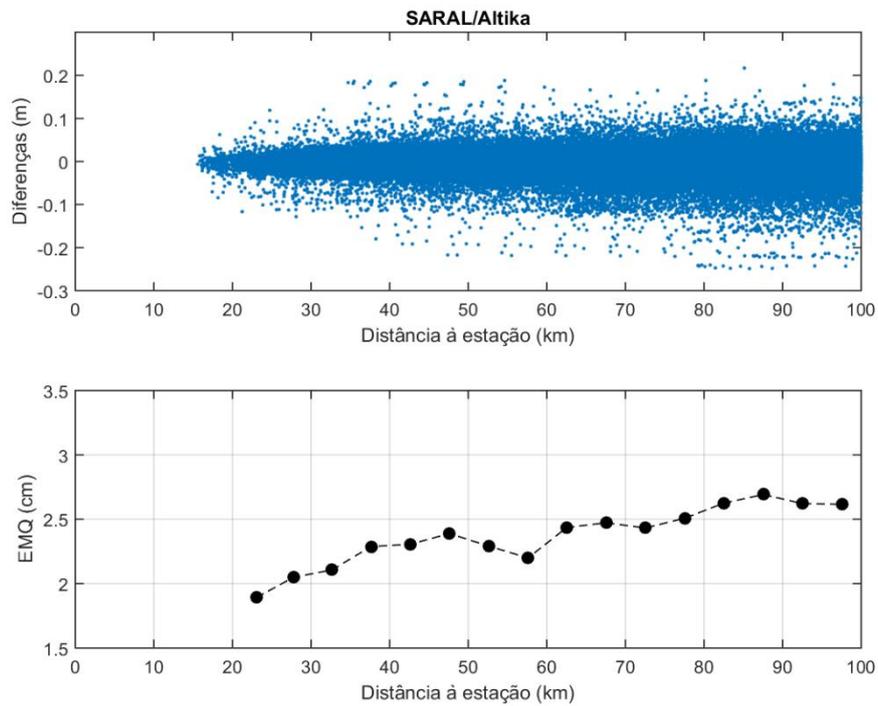
**Figura 5.10** – EMQ por classes das diferenças em função da distância à estação para o ENVISAT



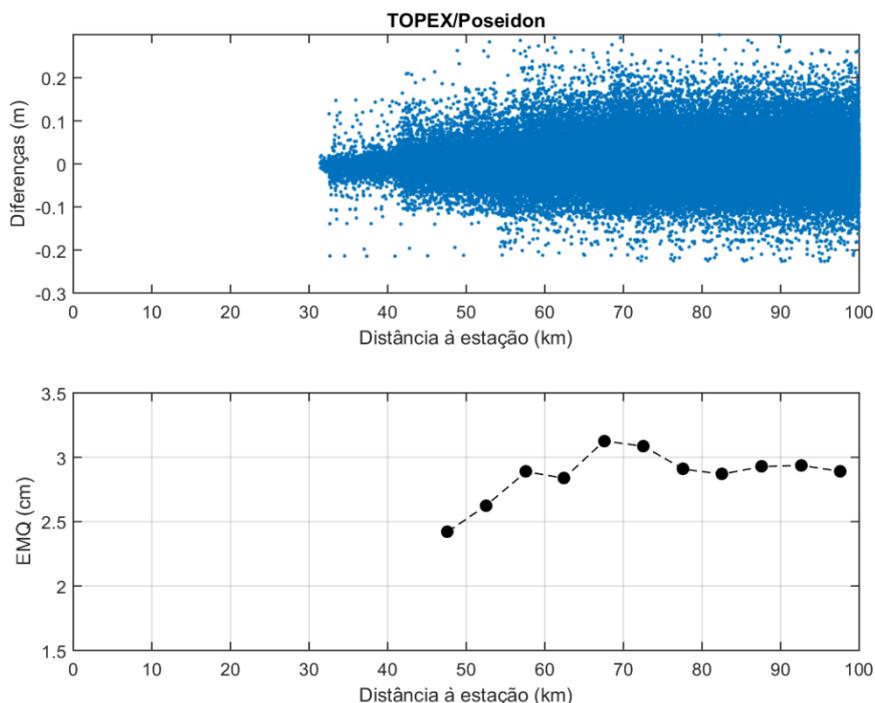
**Figura 5.11** – EMQ por classes das diferenças em função da distância à estação para o JASON-1



**Figura 5.12** – EMQ por classes das diferenças em função da distância à estação para o JASON-2



**Figura 5.13** – EMQ por classes das diferenças em função da distância à estação para o SARAL/AltiKa



**Figura 5.14** – EMQ por classes das diferenças em função da distância à estação para o TOPEX/Poseidon

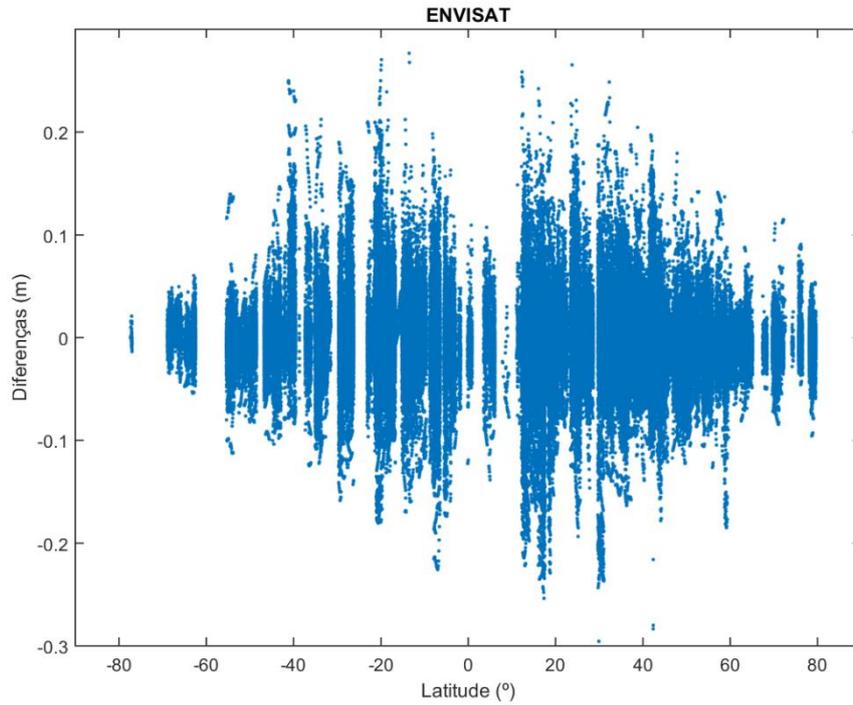
Nos gráficos das figuras anteriores, como referido anteriormente, representam-se as diferenças de ZWD entre GNSS e cada um dos radiómetros em análise em função da distância à estação. Em cada uma destas figuras são representados dois gráficos: o gráfico superior corresponde às diferenças tal como são determinadas e o gráfico inferior corresponde ao erro médio quadrático para classes de 5km de distância à estação. Note-se que na representação em função da distância à estação apenas são considerados os pontos válidos do MWR (MWR1), que passaram todos os critérios de validade.

Os gráficos superiores (diferenças calculadas) mostram claramente que quanto maior a distância entre a estação GNSS e o ponto do radiómetro maiores são as diferenças. Por outro lado, a análise aos gráficos inferiores, que correspondem ao EMQ por classes de distância, revela que o aumento das diferenças não se apresenta significativo até distâncias à estação de 100km, sendo da ordem dos poucos milímetros. Este resultado sugere que o ZWD apesar de variar muito no espaço e no tempo, até 100 km as medidas estão bastante relacionadas. Lembre-se que o método GPD+ utiliza observações até 100 km do ponto inválido do radiómetro.

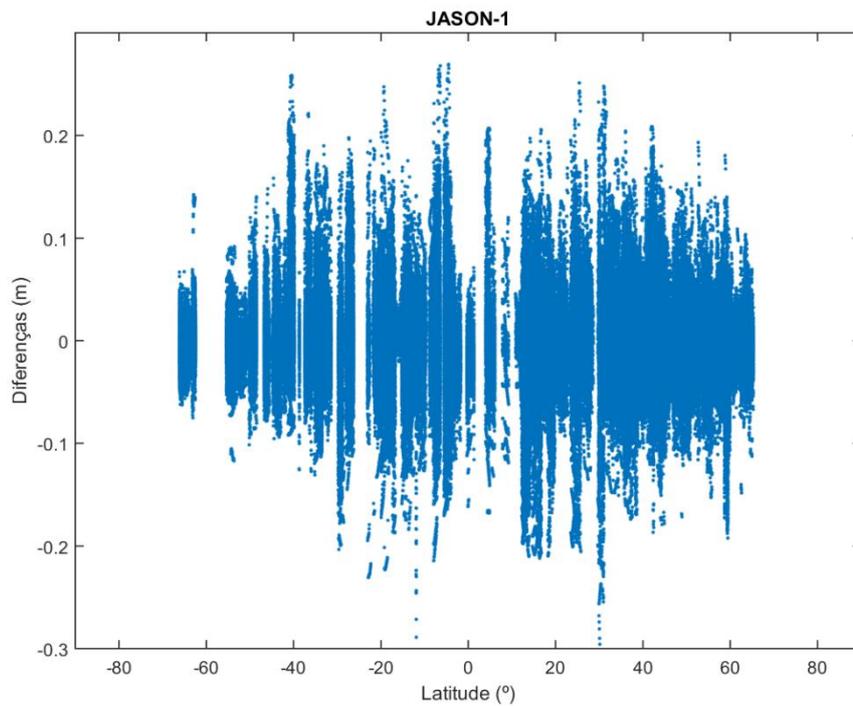
## 5.5. Diferenças em função da latitude

As diferenças analisadas e representadas em função da distância à costa e da distância à estação são representadas em função da latitude nos gráficos das figuras seguintes. Note-se

que a distribuição das estações utilizadas nesta análise não é regular em latitude. Nos gráficos das Figuras 5.15 e 5.16 representam-se as diferenças de ZWD entre GNSS e radiómetros, em função da latitude, para os satélites ENVISAT e JASON-1, respetivamente.



**Figura 5.15** – Diferenças de ZWD entre GNSS e radiómetro em função da latitude para o satélite ENVISAT



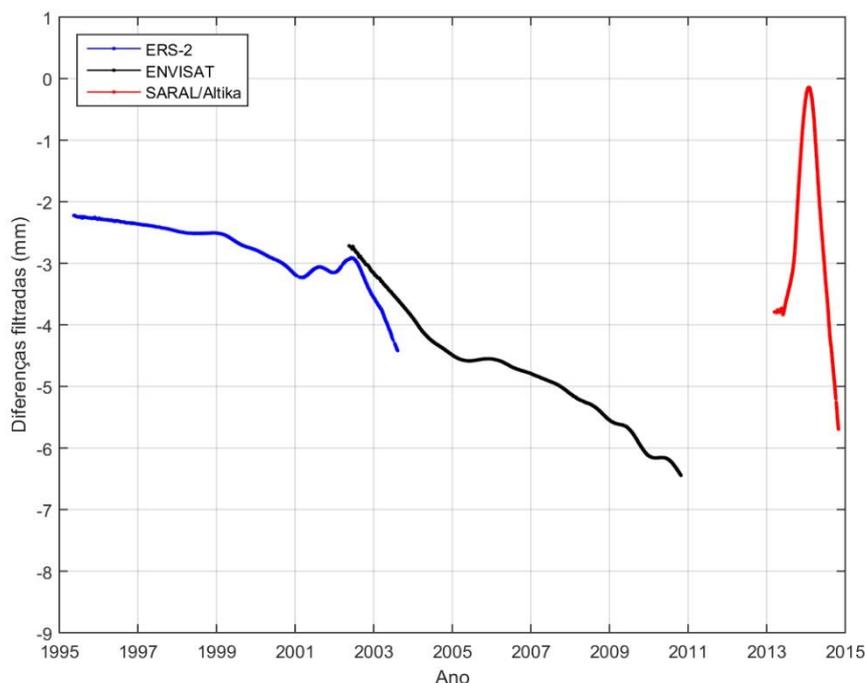
**Figura 5.16** – Diferenças de ZWD entre GNSS e radiómetro em função da latitude para o satélite JASON-1

Na análise em função da latitude, uma vez que o comportamento é muito semelhante em todos os radiómetros, faz-se a representação das diferenças de ZWD entre GNSS e radiómetro, como exemplo, apenas para o ENVISAT e para o JASON-1.

Representando as diferenças em função da latitude para cada um dos radiómetros em análise e notando que outros parâmetros que influenciam estas diferenças, como as distâncias à costa e à estação, não são visíveis nesta representação, mostra-se claramente que as diferenças são maiores junto ao equador. Os resultados do radiómetro do SARAL/AltiKa não são tão claros, uma vez que o período em análise é muito pequeno (cerca de um ano e meio). Tal como verificado na análise referente ao modelo atmosférico no capítulo 4, estes resultados são devidos à variabilidade do ZWD, sendo de grosso modo maior junto ao equador e menor nos polos, tal como mostrado na Figura 4.10, que representa o desvio-padrão do ZWD (que equivale ao desvio-padrão da WTC) para um período de dois anos.

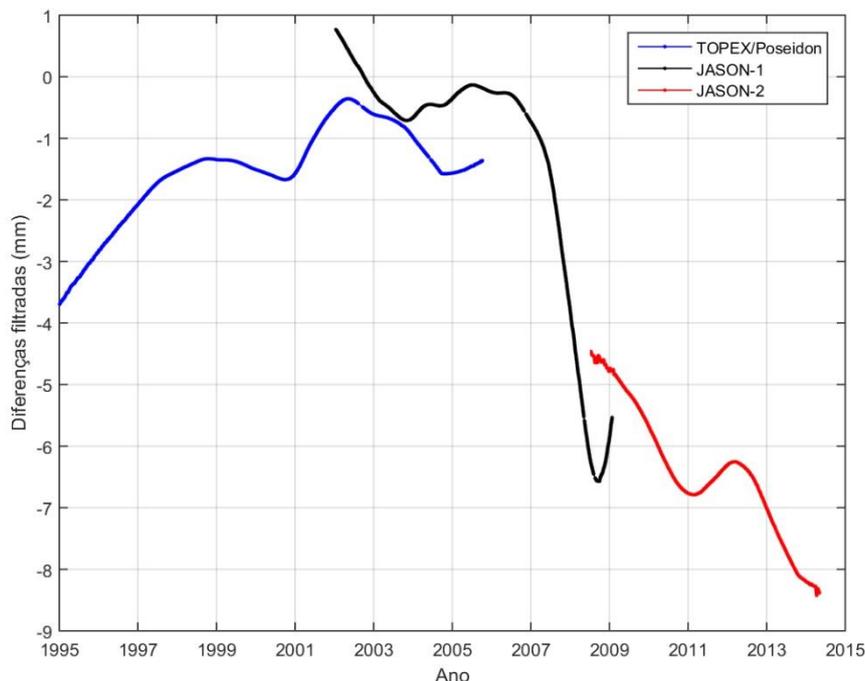
### 5.6. Estabilidade dos MWR ao longo do tempo

Um dos objetivos principais deste estudo é perceber até que ponto a informação estimada pelos GNSS permite perceber e avaliar a estabilidade dos radiómetros de micro-ondas ao longo do tempo. A representação das diferenças de ZWD entre GNSS e radiómetros, em função do tempo, poderá detetar eventuais saltos e/ou derivas nas medidas dos radiómetros quando comparadas com a informação estimada pelos GNSS.



**Figura 5.17** - Diferenças filtradas de ZWD entre GNSS e radiómetros do ERS-2, ENVISAT e SARAL/AltiKa em função do tempo

Nos gráficos da Figura 5.17 representa-se a análise em função do tempo para as missões da ESA (ERS-2 e ENVISAT) e do SARAL/AltiKa. Nos gráficos da Figura 5.18 mostra-se a mesma análise referente às missões da parceria NASA CNES (TOPEX/Poseidon, JASON-1 e JASON-2).



**Figura 5.18** – Diferenças de ZWD entre GNSS e radiómetro em função do tempo das missões da parceria NASA CNES

Os gráficos das figuras anteriores correspondem ao sinal resultante da aplicação do filtro *lowess* (referido no capítulo 4) às diferenças de ZWD entre GNSS e cada um dos radiómetros em análise, aos quais é removido o sinal de período inferior a 366 dias, de modo a remover o sinal anual e visualizar a tendência das diferenças ao longo do tempo e, assim, detetar eventuais saltos.

Depois de obtido o gráfico correspondente à tendência das diferenças ao longo do tempo e ajustando uma reta pelo método dos mínimos quadrados são determinados os respetivos declives, em milímetros por ano, que estão registados na Tabela 5.1.

Tal como se pode verificar na Figura 5.18, apenas o radiómetro do TOPEX/Poseidon apresenta um declive positivo (0.10 mm/ano), pelo que todos os restantes radiómetros apresentam declives negativos. Relativamente à questão dos declives serem positivos ou negativos, note-se que se tratam das diferenças  $GNSS - MWR$ , sendo que declives positivos indicam que o ZWD medido pelo radiómetro está tendencialmente a diminuir no tempo relativamente ao mesmo valor estimado por GNSS e declives negativos traduzem-se numa deriva positiva do radiómetro quando comparado com GNSS.

<b>Radiómetro da Missão</b>	<b>Declive (mm/ano)</b>
<b>ERS-2</b>	- 0.19
<b>ENVISAT</b>	- 0.36
<b>JASON-1</b>	- 0.79
<b>JASON-2</b>	- 0.61
<b>SARAL/AltiKa</b>	- 0.21
<b>TOPEX/Poseidon</b>	+ 0.10

**Tabela 5.1** – Declive da reta de ajuste pelos mínimos quadrados às diferenças filtradas de ZWD entre GNSS e radiómetros em milímetros por ano

De acordo com o que foi referido anteriormente, os resultados registados na Tabela 5.1 indicam que o ZWD medido pelos radiómetros das missões ERS-2, ENVISAT, JASON-1, JASON-2 e SARAL/AltiKa aumenta tendencialmente 0.19, 0.36, 0.79, 0.61 e 0.21 milímetros por ano quando comparado com o ZWD estimado por GNSS. No caso do TOPEX/Poseidon acontece a situação oposta, a tendência linear indica que o ZWD medido pelo respetivo MWR diminui cerca de 0.10 milímetros por ano comparativamente ao mesmo valor estimado por GNSS.

A análise à Figura 5.17, onde o sinal azul corresponde ao ERS-2, o preto ao ENVISAT e o vermelho ao SARAL/AltiKa, revela uma certa continuidade entre as duas missões da ESA. Os sinais apresentam-se semelhantes no período comum e têm ambos declives negativos. O sinal correspondente ao SARAL/AltiKa apresenta uma curva com concavidade voltada para baixo, no entanto esta análise é ainda pouco clara, dado o curto período de operação do satélite correspondente.

Na Figura 5.18 em que os sinais azul, preto e vermelho correspondem, respetivamente, ao TOPEX/Poseidon, JASON-1 e JASON-2 mostra-se também que existe uma certa continuidade de comportamento entre os três radiómetros, na medida em que o ponto em que um termina, corresponde ao ponto em que o seguinte inicia, de modo geral. Este comportamento é expectável, uma vez que os radiómetros das missões mais recentes são, em geral, alinhados com os MWR das suas antecessoras.

Toda a análise presente neste capítulo, que utiliza um alargado conjunto de estações permanentes costeiras, distribuídas mundialmente, precisa ser aperfeiçoada em trabalho futuro, na medida em que cada estação utilizada necessita de apresentar informação estável, sem descontinuidades ou períodos de invalidade (problemas tais como foram detetados na primeira etapa deste estudo). As estações usadas na análise, para cada radiómetro, são

determinadas automaticamente ao longo dos diversos procedimentos desenvolvidos, que se iniciam com o conjunto base de cerca de 750 estações. Em trabalho futuro, cada uma das estações do conjunto final obtido, terá que ser individualmente analisada, de modo a escolher apenas estações com informação estável, sem descontinuidades ou períodos de invalidade. Ainda assim, o trabalho desenvolvido neste capítulo constitui a criação e definição da metodologia para o estudo da estabilidade da informação obtida pelos radiómetros de micro-ondas, a bordo de missões altimétricas.

Em trabalho futuro deverão ser exploradas as possíveis fontes de deriva dos ZTD determinados por GNSS, que neste estudo foram negligenciadas. Neste estudo foram usadas todas as estações disponíveis das redes IGS, EPN e SuomiNet. Em trabalho futuro, deverá ser repetida a mesma análise apenas para o conjunto de estações consideradas estáveis ou as usadas nas soluções UPorto, que, embora em número inferior, foram calculadas usando a mesma metodologia, garantindo assim a estabilidade dos ZWD GNSS usados.

## Capítulo VI

### 6. Conclusões

O desenvolvimento deste estudo passou essencialmente por três etapas, sendo que o objetivo principal foi a avaliação da estabilidade das medidas de radiómetros de micro-ondas, a bordo de satélites altimétricos, e do modelo atmosférico ERA Interim, do ECMWF, quando comparadas com as medidas obtidas a partir dos GNSS. Tal como analisado, as diversas comparações usaram metodologias diferentes, dada a natureza de cada fonte de informação.

A primeira etapa consistiu no cálculo dos ZTD para um conjunto de estações previamente escolhidas, designados por ZTD UPorto, e a posterior análise a partir da comparação com outras soluções (ZTD IGS e EPN), uma vez que esta comparação é um bom indicador da precisão dos ZTD determinados com GNSS. Tal como referido por diversos autores, este estudo permite concluir que os ZTD estimados com GNSS apresentam uma precisão de poucos milímetros (4 – 6 mm).

No que diz respeito à estimação dos atrasos troposféricos zenitais com o software GAMIT, os resultados mostram claramente que a distribuição geográfica e o número de estações em cada rede são parâmetros cruciais na precisão dos ZTD, merecendo especial atenção aquando da escolha das estações para constituírem uma rede.

A segunda etapa do estudo passou pela comparação dos ZTD estimados por GNSS com os mesmos atrasos troposféricos obtidos a partir do modelo atmosférico ERA Interim. Nesta comparação os resultados estão também de acordo com outros autores, o desvio padrão médio das diferenças ERA Interim-GNSS é da ordem dos 10 – 13 mm.

Pela análise individual de cada estação permanente, tanto as diferenças entre o modelo e os ZTD IGS, como as diferenças entre o modelo e os ZTD UPorto, apresentam um padrão semelhante, no entanto em determinadas estações as diferenças com o IGS são muito superiores. Estas estações correspondem às mesmas em que as diferenças UPorto IGS apresentavam também desvios-padrão muito elevados. Apesar do rigor semelhante destas duas soluções GNSS (IGS e UPorto), a comparação com o ERA Interim permite identificar períodos de invalidade e descontinuidades nas soluções IGS, o que não acontece nos ZTD

UPorto. Gericamente a comparação com o modelo atmosférico permite detetar períodos de invalidade nos ZTD estimados com GNSS.

Para o estudo da estabilidade do modelo é feita uma análise global, considerando todas as estações IGS escolhidas na primeira etapa, com uma boa distribuição geográfica de modo a que os resultados sejam representativos. Os resultados mostram que as diferenças ERA Interim-UPorto não apresentam qualquer tendência linear significativa, ao contrário das diferenças ERA Interim-IGS que apresentam uma tendência linear negativa, mais significativa no período depois de 2007. O resultado verificado neste período poderá ser explicado pelas descontinuidades detetadas nos ZTD IGS em algumas estações.

A análise das duas primeiras etapas deste trabalho apresenta-se importante, na medida em que o rigor da informação obtida por GNSS ou a partir do modelo atmosférico, que seja utilizada na Altimetria por Satélite, terá impacto direto no valor do nível do mar determinado e em toda a informação determinada por esta técnica espacial de aquisição de informação geográfica, essencialmente dedicada ao oceano.

A última etapa deste trabalho desenvolveu-se em torno da comparação do ZWD determinado pelos radiómetros de micro-ondas com a mesma quantidade estimada pelos GNSS. Este procedimento permite avaliar a estabilidade das medidas dos MWR quando comparadas com as medidas dos GNSS, em função de diversos parâmetros, tais como a distância à costa e o tempo. Esta última fase do trabalho é um exemplo claro da importância da análise das etapas anteriores, na medida em que os resultados aqui obtidos dependem das medidas GNSS.

Por fim, conclui-se que as diferenças entre GNSS e MWR são mínimas para uma determinada distância à costa (20-40 km), que varia em função do satélite ao qual pertencem os radiómetros, sendo maiores muito próximo da costa, devido à contaminação da terra. Relativamente à estabilidade dos radiómetros em função do tempo, os resultados obtidos mostram uma tendência semelhante, em relação a outros estudos em curso, que tratam da comparação de diferentes radiómetros, mas onde se obtêm valores de declives, em geral, menores, mas com tendências semelhantes, isto é, com o mesmo sinal. Nesse sentido, em trabalho futuro, esta análise poderá ser aperfeiçoada, nomeadamente no que toca à seleção das estações usadas. Problemas detetados neste estudo, como eventuais períodos de invalidade e descontinuidades nos ZTD, devem ser eliminados nas estações usadas nesta última análise. Apesar do trabalho desenvolvido não apresentar resultados ainda totalmente conclusivos, constitui a criação e definição de uma metodologia para o estudo da estabilidade de radiómetros de micro-ondas utilizando informação obtida com GNSS, que será aperfeiçoada em trabalho futuro.

## Referências

- [1] D. Chelton, J. Ries, B. Haines, L. Fu e P. Callahan, "Satellite altimetry," em *Satellite altimetry and earth sciences: a handbook of techniques and applications*, San Diego, CA, USA, L.L. Fu, & A. Cazenave, 2001, pp. 1-131.
- [2] M. Fernandes, C. Lázaro, M. Ablain e N. Pires, "Improved wet path delays for all ESA and reference altimetric missions," *Remote Sensing of Environment*, p. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.07.023>, 2015.
- [3] S. Keihm, M. Janssen e C. Ruf, "TOPEX/Poseidon microwave radiometer (TMR). III. Wet troposphere range correction algorithm and pre-launch error budget," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, nº 1, pp. 147 - 161, 1995.
- [4] M. J. Fernandes, N. Pires, C. Lázaro e A. L. Nunes, "Tropospheric delays from GNSS for application in coastal altimetry," *Advances in Space Research*, vol. 51, pp. 1352-1368, 2013.
- [5] C. Hay e J. Wong, "Enhancing GPS: Tropospheric Delay Prediction at Master Control Station," *GPS World*, vol. 11, pp. 56-62, 2000.
- [6] M. J. Fernandes, C. Lázaro, A. L. Nunes, N. Pires, L. Bastos e V. B. Mendes, "GNSS-Derived Path Delay: An Approach to Compute the Wet Tropospheric Correction for Coastal Altimetry," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 7, pp. 596-600, 2010.
- [7] E. Pacione, B. Pace, H. Vedel, S. de Haan, R. Lanotte e F. Vespe, "Combination methods of tropospheric time series," *Advances Space Research*, vol. 47, pp. 323-335, 2011.
- [8] A. Sibthorpe, S. Brown, S. D. Desai e B. J. Haines, "Calibration and Validation of the Jason-2/OSTM Advanced Microwave Radiometer Using Terrestrial GPS Stations," pp. 420-430, 2011.
- [9] S. Brown, C. Ruf, S. Keihm e A. Kitiyakara, "Jason microwave radiometer performance and on-orbit calibration," *Mar. Geod.*, vol. 27, pp. 199-220, 2004.
- [10] B. Haines e Y. Bar-Sever, "Monitoring the TOPEX Microwave Radiometer with GPS: Stability of columnar water vapor measurements," *Geophysical Research Letters*, vol. 25, 1998.

- [11] S. D. Desai e B. J. Haines, "Monitoring measurements from the Jason-1 microwave radiometer and independent validation with GPS," 2004.
- [12] T. Herring, R. King e S. McClusky, "GAMIT Reference Manual - GPS Analysis at MIT," *Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences*, vol. Release 10.4, 2010.
- [13] A. E. Niell, A. J. Coster, F. S. Solheim, V. B. Mendes, P. C. Toor, R. B. Langley e C. A. Upham, "Comparison of Measurements of Atmospheric Wet Delay by Radiosonde, Water Vapor Radiometer, GPS and VLBI," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000.
- [14] S. Keihm, M. Janssen e C. Ruf, "TOPEX/Poseidon Microwave Radiometer (TMR): III. Wet troposphere range correction algorithm and pre-launch error budget," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, pp. 147-161, 1995.
- [15] J. Boehm, B. Werl e H. Schuh, "Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data," *Journal of Geophysical Research*, 2006.
- [16] J. Zumberge, M. Heflin, D. Jefferson, M. Watkins e F. Webb, "Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks," *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, pp. 5005-5017, 1997.
- [17] R. Dach, U. Hugentobler, P. Fridez e M. Meindl, "Bernese GPS Software - Version 5.0.," *Astronomical Institute. University of Bern*, 2007.
- [18] R. Dach, E. Brockman, S. Schaer e et al., "GNSS processing at CODE, status report," *J. Geod.*, vol. 83, pp. 353-365, 2009.
- [19] IGS, "IGS," 2015. [Online]. Available: <http://www.igs.org/>. [Acedido em 16 Julho 2015].
- [20] S. H. Byun e Y. E. Bar-Sever, "A new type of troposphere zenith path delay product of the international GNSS service," 2008.
- [21] EPN, "EPN," 2015. [Online]. Available: <http://www.epncb.oma.be/index.php>. [Acedido em 16 Julho 2015].
- [22] ECMWF, "ECMWF," 2015. [Online]. Available: <http://www.ecmwf.int/>. [Acedido em 21 Julho 2015].
- [23] D. Dee, S. Uppala e A. Simmons, "The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, pp. 553-597, 2011.

- [24] J. Legeais, M. Ablain e S. Thao, "Evaluation of wet troposphere path delays from atmospheric reanalyses and radiometers and their impact on the altimeter sea level," 2014.
- [25] S. Brown, "A Novel Near-Land Radiometer Wet Path-Delay Retrieval Algorithm: Application to the Jason-2/OSTM Advanced Microwave Radiometer," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, pp. 1986-1992, 2010.
- [26] Radar Altimetry Tutorial, "Radar Altimetry Tutorial," ESA e CNES, 2015. [Online]. Available: <http://www.altimetry.info/>. [Acedido em 4 Agosto 2015].
- [27] M. Ablain, A. Cazenave, G. Valladeau e S. Guinehut, "A new assessment of the error budget of global mean sea level rate estimated by satellite altimetry over 1993-2008," vol. 5, pp. 193-201, 2009.
- [28] JPL, "Jet Propulsion Laboratory," 2015. [Online]. Available: <http://www.jpl.nasa.gov/>. [Acedido em 4 Agosto 2015].
- [29] CNES, "ALTIKA," CNES, 2015. [Online]. Available: <https://altika-saral.cnes.fr/en/SARAL/index.htm>. [Acedido em 7 Agosto 2015].
- [30] ISRO, "Indian Space Research Organisation," Government of India - Department of Space, 2015. [Online]. Available: <http://www.isro.gov.in/Spacecraft/saral>. [Acedido em 7 Agosto 2015].
- [31] M. Fernandes, C. Lázaro, A. Nunes e R. Scharroo, "Atmospheric Corrections for Altimetry Studies over Inland Water," *Remote Sensing*, vol. 6, pp. 4952-4997, 2014.
- [32] J. Davis, T. Herring, I. Shapiro, A. Rogers e G. Elgered, "Geodesy by Radio Interferometry - Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length," *Radio Sciences*, vol. 20, pp. 1593-1607, 1985.
- [33] H. Hopfield, "Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data," *Journal of Geophysics Research*, vol. 74, pp. 4487-4499, 1969.
- [34] J. Boehm, R. Heinkelmann e H. Schuh, "Short note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications," *Journal of Geodesy*, vol. 81, pp. 679-683, 2007.
- [35] M. Bevis, S. Businger, T. Herring, C. Rocken, R. Anthes e R. Ware, "GPS meteorology - Remote sensing of atmospheric water-vapor using the global positioning system," *Journal Geophysics Research*, vol. 97, pp. 15787-15801, 1992.

- [36] M. Bevis, S. Businger, S. Chiswell, T. Herring, R. Anthes, C. Rocken e R. Ware, "GPS meteorology - Mapping zenith wet delays onto precipitable water," *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 33, pp. 379-386, 1994.
- [37] V. Mendes, G. Prates, L. Santos e R. Langley, "An Evaluation of the Accuracy of Models of the Determination of the Weighted Mean Temperature of the Atmosphere. In Proceedings of the ION 2000 National Technical Meeting," 2000.
- [38] V. Mendes, "Modeling the Neutral-Atmosphere Propagation Delay in Radiometric Space Techniques," *Ph.D. Thesis, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada*, 1999.
- [39] J. Kouba, "Implementation and testing of the gridded Vienna Mapping Function 1 (VMF1)," *Journal of Geodesy*, vol. 82, pp. 193-205, 2008.
- [40] M. Fernandes, A. Nunes e C. Lázaro, "Analysis and Inter-Calibration of Wet Path Delay Datasets to Compute the Wet Tropospheric Correction for CryoSat-2 over Ocean," *Remote Sensing*, vol. 5, pp. 4977-5005, 2013.
- [41] MathWorks, "MathWorks," 2015. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/help/curvefit/lowess-smoothing.html>. [Acedido em 22 Setembro 2015].
- [42] A. Walpersdorf, M. Bouin, O. Bock e E. Doerflinger, "Assessment of GPS data for meteorological application over Africa: study of error sources and analysis of positioning accuracy," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 69, pp. 1312-1330, 2007.
- [43] UCAR, "COSMIC SuomiNet," 2015. [Online]. Available: <http://www.suominet.ucar.edu/>. [Acedido em 21 Agosto 2015].
- [44] "AVISO+ Satellite Altimetry Data," CNES, [Online]. Available: <http://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>. [Acedido em 4 Agosto 2015].
- [45] S. Desai e B. Haines, "Monitoring measurements from the Jason-1 microwave radiometer and independent validation with GPS," *J. Marine Geodesy*, vol. 27, pp. 221-240, 2004.

## Anexo A

<b>Estação</b>	<b>Lon (°)</b>	<b>Lat (°)</b>	<b>H orto (m)</b>	<b>Anos</b>
ALBH	-123.487472	48.389778	50.981	19.4945
AUCK	174.834361	-36.602833	98.299	18.774
BRMU	-64.696278	32.370389	23.01	19.4945
CAS1	110.519694	-66.283333	38.655	19.4945
COCO	96.833944	-12.188333	4.71	18.0464
FALE	-171.999528	-13.832194	13.961	17.5473
GODE	-76.826833	39.021722	48.119	18.6013
KARR	117.097167	-20.981417	116.845	18.0095
KELY	-50.944861	66.987417	198.463	18.8233
KERG	70.2555	-49.351444	33.146	19.4945
KOUR	-52.805972	5.252167	8.533	19.4945
LPGS	-57.932306	-34.906722	14.185	18.9959
MAS1	-15.633278	27.763722	155.481	19.4835
MATE	16.704444	40.649111	490.238	19.4698
MCM4	166.66931	-77.83833	151.575	19.0013
METS	24.395306	60.217444	76.006	19.489
STJO	-52.67775	47.595222	143.147	19.4945
SYOG	39.583722	-69.006944	28.082	19.2918
TOW2	147.055667	-19.269278	30.23	19.2945
TSKB	140.087472	36.105667	28.532	19.4945
VNDP	-120.616472	34.556306	25.335	19.4945

Tabela A.1 – Coordenadas e período de observação das estações da primeira rede

<b>Estação</b>	<b>Lon (°)</b>	<b>Lat (°)</b>	<b>H orto (m)</b>	<b>Anos</b>
ALBH	-123.487472	48.389778	50.981	19.4945
BAKO	106.848889	-6.491028	139.808	16.3246
CAGL	8.97275	39.135889	192.005	17.5429
CASC	-9.418528	38.693389	22.953	16.1657
CHUR	-94.08875	58.759056	29.192	19.3603
CRO1	-64.584333	17.756889	13.471	18.6013
DARW	131.13272	-12.84369	75.124	16.3959
DELF	4.387583	51.986111	31.093	18.4699
DGAR	72.370222	-7.269667	9.866	17.6611
FALE	-171.999528	-13.832194	13.961	17.5473
GUAM	144.86833	13.58931	147.286	18.4918
HNLC	-157.864556	21.303278	6.868	17.0287
HOB2	147.438722	-42.804694	44.782	18.5822
KOUC	164.287333	-20.558667	24.254	18.1857
MAC1	158.935806	-54.499528	14.13	18.4398
MAW1	62.870694	-67.60475	30.023	19.3602

<b>Estação</b>	<b>Lon (°)</b>	<b>Lat (°)</b>	<b>H orto (m)</b>	<b>Anos</b>
ONSA	11.9255	57.395278	9.229	17.7158
REYK	-21.9555	64.138778	26.748	18.0328
SANT	-70.668556	-33.150278	695.642	17.8027
SUWN	127.054222	37.2755	59.261	16.5822
THU2	-68.825	76.537	19.546	15.6123
TOW2	147.055667	-19.269278	30.23	19.2945

**Tabela A.2** – Coordenadas e período de observação das estações da segunda rede

<b>Estação</b>	<b>Lon (°)</b>	<b>Lat (°)</b>	<b>H orto (m)</b>	<b>Anos</b>
ACOR	-8.398944	43.364361	11.945	14.8479
AIRA	130.599583	31.824056	282.853	16.3329
ALBH	-123.487472	48.389778	50.981	19.4945
ALRT	-62.340472	82.494278	58.661	11.6123
BARH	-68.221694	44.395028	31.864	15.5602
CHPI	-44.985167	-22.687139	620.307	11.1438
HOFN	-15.197944	64.267278	18.15	15.6534
INVK	-133.526972	68.306167	49.509	12.9383
MANA	-86.249	12.148917	66.567	14.1311
NKLG	9.672111	0.353889	21.649	14.2513
NYA1	11.865306	78.929528	47.723	15.9794
OHI2	-57.901333	-63.321056	9.523	12.3712
PARC	-70.879889	-53.136944	13.729	15.4945
PIMO	121.07772	14.63569	52.031	15.2945
RAMO	34.763139	30.597583	869.092	15.7342
RBAY	32.078361	-28.795528	7.769	13.7213
RESO	-94.893694	74.690806	28.617	12.7931
RIGA	24.05875	56.948611	14.265	15.3
THTI	-149.606472	-17.577056	91.858	15.6041
TIXI	128.866417	71.634472	54.01	15.7219
TOW2	147.055667	-19.269278	30.23	19.2945
YAR2	115.346972	-29.046561	267.28	14.7438

**Tabela A.3** – Coordenadas e período de observação das estações da terceira rede

## Anexo B

Rede	Estação	min	max	mean	std	slope	rms
1	KELY	-133,5	129,4	0,82	6,36	-0,3672	6,41
	MAS1	-265,1	122,8	-0,32	6,57	0,2241	6,58
	MATE	-66,1	194,2	-0,25	5,1	-0,0316	5,11
	METS	-81,1	173,7	-0,17	4,03	0,0452	4,04
2	CAGL	-57,7	99,1	-0,11	4,33	0,005	4,33
	ONSA	-91,3	81,3	-0,78	2,85	0,0746	2,96
	REYK	-59,3	47,3	-1,44	3,97	0,1285	4,22
3	HOFN	-52,3	45,4	0,27	4,58	-0,4032	4,59
	NYA1	-18,3	35,2	1,62	2,54	-0,1962	3,01
	RAMO	-129,7	138,5	-1,95	5,93	0,1343	6,24
	RIGA	-162,5	58,3	-0,82	3,36	0,0547	3,46

Tabela B.1 – Parâmetros estatísticos das diferenças de ZTD EPN-IGS

Rede	Estação	min	max	mean	std	slope	rms
1	KELY	-132,5	113,2	1,5	5,42	-0,2457	5,62
	MAS1	-274,2	120,4	-2,1	5,63	0,1806	6,01
	MATE	-179,8	129,8	-0,75	3,97	0,005	4,04
	METS	-46	50,5	-1,16	2,96	0,0572	3,18
2	CAGL	-65	56,4	-1,34	4,05	0,0373	4,26
	CASC	-119,6	98,6	-1,6	3,94	0,2264	4,25
	DELF	-74	62,4	-0,01	3,39	-0,0171	3,39
	ONSA	-59,4	79,7	-1,36	2,94	0,0353	3,24
	REYK	-75,7	69,2	-1,98	3,65	0,159	4,15
3	ACOR	-63,6	60,6	0,22	3,78	-0,003	3,78
	HOFN	-62	71,2	0,97	4,24	-0,4035	4,35
	NYA1	-25	27,1	1,21	2,4	-0,0182	2,69
	RAMO	-127,9	113	-1,23	4,67	0,074	4,83
	RIGA	-55,9	76,1	-0,19	4,37	-0,1834	4,38

Tabela B.2 – Parâmetros estatísticos das diferenças de ZTD EPN-UPorto

Rede	Estação	min	max	mean	std	slope	rms
1	ALBH	-65,9	166,8	0,54	4,48	-0,0848	4,51
	AUCK	-264	137,5	0,04	10,3	-0,1751	10,3
	BRMU	-60,1	169,1	0,89	5,41	-0,1722	5,49
	CAS1	-42,6	33,1	-2,25	3,56	-0,3034	4,21
	COCO	-53,1	345	1,08	9,78	-0,0731	9,84
	FALE	-64,9	398,3	2,22	22,91	0,4314	23,02
	GODE	-65,4	278,7	0,47	5,88	0,0833	5,9
	KARR	-95,1	72,2	1,45	4,37	-0,0925	4,6

	<b>Estação</b>	<b>min</b>	<b>max</b>	<b>mean</b>	<b>std</b>	<b>slope</b>	<b>rms</b>
	KELY	-134,6	129,3	-0,19	4,69	-0,1403	4,7
	KERG	-92,5	106,9	-0,4	5,44	-0,1791	5,45
	KOUR	-98,2	152,5	0,59	6,67	-0,0529	6,7
	LPGS	-83,1	123,3	2,13	6,85	0,0435	7,18
	MAS1	-86,3	106,4	1,83	5,72	0,0638	6
	MATE	-66,1	198,8	0,61	5,33	-0,0399	5,37
	MCM4	-93,5	48,9	-2,98	5,46	-0,2506	6,22
	METS	-78,4	177,1	0,94	4,38	-0,0034	4,48
	STJO	-63,9	277,6	1	8,99	0,0147	9,04
	SYOG	-72,7	439,7	-1,32	4,16	-0,1799	4,36
	TOW2	-98	158,6	1,62	4,9	0,0301	5,16
	TSKB	-108,7	119,4	1,22	4,79	-0,1027	4,94
	VNDP	-41,2	72,9	0,45	3,86	-0,0596	3,88
2	ALBH	-68,8	166,3	0,75	4,51	-0,0356	4,57
	BAKO	-141,2	387,6	1,39	16,53	-0,1377	16,59
	CAGL	-69,4	104,6	1,22	4,49	-0,0319	4,65
	CHUR	-74,2	151	0,64	5,59	-0,1274	5,63
	CRO1	-257,4	127,3	0,35	7,63	-0,08	7,64
	DARW	-153,8	182,9	0,84	5,43	-0,1585	5,49
	DGAR	-82,4	374,3	0,66	8,77	-0,0238	8,8
	FALE	-68,3	397,3	2,24	22,92	0,3917	23,03
	GUAM	-80,7	104,9	1,86	6,13	0,0641	6,4
	HNLC	-62,7	284,4	1,05	13,35	0,1265	13,39
	HOB2	-300,3	423,6	0,63	6,02	-0,212	6,05
	KOUC	-86,5	177,6	1,14	4,68	-0,123	4,82
	MAC1	-60,4	64,8	-1,33	3,81	-0,0344	4,03
	MAW1	-102,6	105,1	-2	4,38	-0,2034	4,82
	ONSA	-58,8	52,5	0,56	3,29	0,0451	3,34
	REYK	-78,8	111,5	0,45	3,81	-0,0158	3,84
	SANT	-83,9	113,7	0,37	4,77	-0,1252	4,78
SUWN	-95,3	83,7	-0,62	4,87	-0,1978	4,91	
THU2	-63,6	35,3	0,19	3,23	-0,2224	3,24	
TOW2	-65,4	158	1,48	4,55	-0,058	4,78	
3	AIRA	-111,8	396,9	-1,17	10,52	-0,1946	10,59
	ALBH	-261,6	176,4	0,15	11,03	0,1476	11,03
	ALRT	-29	44,8	0	2,9	-0,2575	2,9
	BARH	-64,3	92,7	-0,35	3,9	-0,1796	3,92
	CHPI	-104,8	138,7	-0,26	4,37	-0,0655	4,38
	HOFN	-55,2	63,3	-0,02	3,8	-0,1682	3,8
	INVK	-60,8	115	0,37	3,53	-0,1	3,55
	MANA	-83	327,8	0,22	5,49	0,0547	5,49
	NKLG	-81	84,7	0,81	6,05	-0,2269	6,11
	NYA1	-45,8	36,4	0,46	2,92	-0,173	2,96
	OHI2	-45,4	53,9	-2,3	3,63	-0,23	4,3

<b>Estação</b>	<b>min</b>	<b>max</b>	<b>mean</b>	<b>std</b>	<b>slope</b>	<b>rms</b>
PARC	-89,8	96,6	-0,96	5,83	-0,1924	5,91
PIMO	-86,5	291,4	0,08	7,66	-0,2888	7,66
RAMO	-42,5	142,4	-0,71	4,74	0,0541	4,8
RBAY	-116	94,1	1,97	6,75	0,0548	7,03
RESO	-24,1	25,2	0,27	2,97	-0,2103	2,98
RIGA	-174,1	62,4	-0,07	3,72	0,096	3,72
THTI	-60	71,2	0,64	5,79	-0,1064	5,82
TIXI	-66,4	26,9	-0,52	3,13	0,0173	3,18
TOW2	-471,8	179	1,28	13,35	0,0305	13,41
YAR2	-38,9	73,5	1,38	3,75	-0,0017	4

**Tabela B.3** – Parâmetros estatísticos das diferenças de ZTD UPorto-IGS

## Anexo C

Rede	Estação	min	max	mean	std	slope	rms
1	KELY	-96,6	128,2	-1,6	8,24	0,3002	8,39
	MAS1	-129,9	145,8	9,13	13,44	-0,0613	16,25
	MATE	-78,2	99,8	5,94	12,3	0,1627	13,66
	METS	-48,9	54,8	2,5	8,32	-0,0005	8,69
2	CAGL	-62,2	71,4	2,54	12,33	0,0594	12,59
	CASC	-85,3	73,8	5,57	12,01	-0,0888	13,23
	DELF	-59,2	75,7	2,42	9,62	0,0592	9,92
	ONSA	-77,3	73,9	4,13	9,29	-0,0923	10,17
	REYK	-50,2	76,7	4,57	7,62	-0,0945	8,88
3	ACOR	-83,7	70,2	-0,1	11,83	0,0554	11,83
	HOFN	-70,7	69,1	-1,03	10,14	0,5821	10,2
	NYA1	-33,6	49,7	1,32	5,48	0,0958	5,63
	RAMO	-82,4	146,2	17,37	14,53	-0,3706	22,65
	RIGA	-73,5	67,5	4,07	9,37	-0,0997	10,22

Tabela C.1 – Parâmetros estatísticos das diferenças de ZTD ERA Interim-EPN

Rede	Estação	min	max	mean	std	slope	rms
1	ALBH	-73,4	80,8	1,19	11,9	0,0909	11,96
	AUCK	-74,8	82,5	1,15	11,51	-0,08	11,56
	BRMU	-85,7	103,2	-1,66	14,8	0,2015	14,89
	CAS1	-61,2	38,4	-0,28	5,18	-0,1004	5,19
	COCO	-92,2	80,5	-5,94	15,79	0,0942	16,87
	FALE	-87,4	80,6	-3,82	18,71	0,0519	19,1
	GODE	-76,8	83,1	2,96	14,14	-0,2668	14,45
	KARR	-71,4	84,4	-2,08	15,32	0,0815	15,46
	KELY	-58,9	57,2	0,06	6,73	0,1153	6,73
	KERG	-74,4	108,7	3,02	11,11	-0,2236	11,52
	KOUR	-87,3	79,3	-6,74	16,88	0,0713	18,18
	LPGS	-135,8	103,3	0,28	16,1	0,1965	16,1
	MAS1	-62,5	68,3	6,78	13,02	0,0859	14,68
	MATE	-57,9	87,1	4,96	12,52	0,174	13,46
	MCM4	-42,7	57,3	1,88	6,8	1,7652	7,05
	METS	-66	74,6	1,45	8,45	0,022	8,58
	STJO	-70,1	95,2	3,29	12,23	-0,0731	12,66
	SYOG	-32,9	45,3	2,71	5,22	-0,2682	5,88
TOW2	-79,1	82,2	-7,29	15,79	-0,0913	17,39	
TSKB	-77,2	183,7	3,32	13,67	-0,0436	14,07	
VNDP	-78,6	80,3	1,17	12,58	-0,0766	12,63	
2	ALBH	-73,8	76,7	1,03	11,91	0,0318	11,95
	BAKO	-104,7	91,3	-4,84	20,31	0,7058	20,88

	<b>Estação</b>	<b>min</b>	<b>max</b>	<b>mean</b>	<b>std</b>	<b>slope</b>	<b>rms</b>
	CAGL	-65,3	80,7	0,79	12,7	0,1423	12,73
	CASC	-77,2	77,4	4,03	12,57	0,0958	13,2
	CHUR	-78,3	80,1	1,98	7,78	-0,0327	8,03
	CRO1	-92,8	80,5	3,05	17,17	-0,5111	17,44
	DARW	-80,6	85,6	-6,47	16,42	0,0598	17,65
	DELF	-64,7	79,4	2,46	10	0,0729	10,3
	DGAR	-97,9	76,2	-8,03	17,46	0,2892	19,22
	FALE	-115,7	80,8	-3,79	18,76	0,0924	19,14
	GUAM	-89,7	89,4	-3,8	17,38	0,0536	17,79
	HNLC	-86,9	80,2	5,31	15,11	0,0287	16,02
	HOB2	-71,1	78,9	0,93	10,63	0,3496	10,67
	KOUC	-120,4	81,4	-3,23	17,67	-0,0844	17,96
	MAC1	-65,5	80	1,97	8,86	-0,0029	9,08
	MAW1	-116	65,5	2,74	4,69	-0,1474	5,43
	ONSA	-75,8	72,8	2,66	9,08	-0,0318	9,46
	REYK	-98	67,8	1,98	7,65	-0,0031	7,9
	SANT	-187,4	95,5	-14,1	17,55	0,1962	22,51
	SUWN	-87,1	83,5	0,2	12,21	-0,178	12,21
	THU2	-54,5	62,1	0,02	5,11	-0,0636	5,11
	TOW2	-77,2	76,7	-7,23	15,71	0,0085	17,29
3	ACOR	-78,6	79	0,02	11,98	0,1192	11,98
	AIRA	-93,9	100,1	-1,23	15,31	-0,6792	15,36
	ALBH	-120,2	81	1,48	13,57	-0,1052	13,65
	ALRT	-31,5	42,1	3,23	3,98	-0,0813	5,13
	BARH	-76,3	80,9	3,5	12,07	0,0697	12,57
	CHPI	-69,6	93,3	5,44	13,7	-0,1411	14,74
	HOFN	-61,8	77,6	0,63	9,51	0,1367	9,53
	INVK	-51	47,6	0,23	6,46	-0,3489	6,46
	MANA	-94,5	83,3	-6,88	19,04	0,1631	20,25
	NKLG	-91,2	82,2	1,12	18,57	0,7981	18,6
	NYA1	-35,7	49,1	2,17	5,6	-0,1558	6,01
	OHI2	-59,8	57,2	1,49	7,3	-0,2636	7,45
	PARC	-67,2	80,1	4,17	9,7	-0,0321	10,55
	PIMO	-88,3	83,2	-0,92	19,68	0,2664	19,7
	RAMO	-44	86,6	16	14,91	-0,0967	21,87
	RBAY	-85,3	80	-2,4	17,01	-0,2648	17,18
	RESO	-30,7	53,1	3,17	4,75	0,0309	5,71
	RIGA	-74,1	76,9	4,04	10,16	-0,247	10,94
	THTI	-91,9	83,2	0,31	16,79	0,3991	16,8
	TIXI	-62,2	73,7	3,42	6,97	-0,014	7,76
TOW2	-161,3	81,7	-7,09	17,68	-0,0429	19,05	
YAR2	-63,7	71,7	-2,91	11,75	0,1383	12,1	

Tabela C.2 – Parâmetros estatísticos das diferenças de ZTD ERA Interim-UPorto

Rede	Estação	min	max	mean	std	slope	rms
1	ALBH	-74,2	162,5	1,75	11,81	0,0053	11,94
	AUCK	-252	134,1	1,15	14,27	-0,2492	14,32
	BRMU	-77,9	168,8	-0,78	14,08	0,0262	14,1
	CAS1	-41,3	37,1	-2,5	6,05	-0,4032	6,54
	COCO	-91,5	296,2	-4,87	17,5	0,0367	18,17
	FALE	-90,2	383,4	-1,44	28,71	0,471	28,74
	GODE	-84,1	269,8	3,34	14,14	-0,1837	14,52
	KARR	-77	90,6	-0,65	14,83	0,0025	14,85
	KELY	-138,6	95,1	0,13	7,52	-0,0906	7,52
	KERG	-82,1	101,7	2,71	10,92	-0,4131	11,25
	KOUR	-86,6	149,6	-6,23	16,23	0,1259	17,39
	LPGS	-97,9	106,2	2,46	15,45	0,2651	15,64
	MAS1	-72	81,9	8,49	13,08	0,1665	15,59
	MATE	-67,8	188,7	5,66	12,43	0,0987	13,66
	MCM4	-26,7	27,8	-3,43	5,55	1,1974	6,52
	METS	-59,9	170	2,35	8,72	0,0269	9,03
	STJO	-69,3	255	4,29	14,25	-0,0614	14,88
	SYOG	-65	50,2	1,19	5,53	-0,4575	5,65
TOW2	-81,9	140,6	-5,72	15,45	-0,0615	16,48	
TSKB	-80,3	104,9	4,59	13,13	-0,1507	13,91	
VNDP	-81,6	86,1	1,55	12,5	-0,1303	12,6	
2	ALBH	-70,9	162,2	1,78	11,82	-0,0021	11,95
	BAKO	-92,2	380,6	-3,58	25,58	0,6071	25,83
	CAGL	-62,9	108,8	2,01	12,14	0,1117	12,31
	CHUR	-59,9	139,8	2,64	8,21	-0,1621	8,62
	CRO1	-270,4	131,9	2,14	16,26	-0,4156	16,4
	DARW	-84,7	149,1	-5,47	16,07	-0,1681	16,98
	DGAR	-107,9	341,3	-7,13	18,12	0,3529	19,48
	FALE	-87,1	383,4	-1,44	28,68	0,4655	28,72
	GUAM	-93,1	89,7	-2,1	16,13	0,2318	16,26
	HNLC	-81,7	261,1	6,42	19,59	0,183	20,62
	HOB2	-287,2	360,1	1,9	10,57	0,0551	10,74
	KOUC	-100,2	144,1	-1,89	17,72	-0,1841	17,82
	MAC1	-62,8	73,8	0,68	8,42	-0,0433	8,45
	MAW1	-87,4	38,8	0,73	4,86	-0,361	4,92
	ONSA	-73	72,1	3,13	9	0,0352	9,53
	REYK	-54,5	69,8	2,44	7,55	-0,021	7,93
	SANT	-75,1	92,6	-13,17	17,43	0,0277	21,84
SUWN	-76,7	91,6	-0,4	12,02	-0,3741	12,03	
THU2	-51,1	50,9	0,21	5,73	-0,2769	5,74	
TOW2	-84,5	140,6	-5,78	15,48	-0,0473	16,53	
3	AIRA	-93,8	356	-2,34	17,15	-0,8653	17,31

<b>Estação</b>	<b>min</b>	<b>max</b>	<b>mean</b>	<b>std</b>	<b>slope</b>	<b>rms</b>
ALBH	-70,6	162,2	1,75	11,82	0,0069	11,95
ALRT	-27,9	52,3	3,22	4,91	-0,3369	5,87
BARH	-87,6	87,5	3,12	11,7	-0,1136	12,11
CHPI	-101,5	125,6	5,08	13,69	-0,1946	14,6
HOFN	-61	77	0,52	9,15	0,0266	9,16
INVK	-47	99,2	0,62	7,01	-0,4492	7,03
MANA	-80,4	289,8	-6,68	18,52	0,2276	19,68
NKLG	-82	92,2	1,24	18,12	0,5396	18,16
NYA1	-31,7	46,6	2,91	5,45	0,027	6,18
OHI2	-45,1	60,1	-0,82	7,37	-0,4791	7,42
PARC	-44,9	74	3,21	9,16	-0,2124	9,71
PIMO	-82	299,3	-0,5	19,15	-0,0238	19,16
RAMO	-46,9	135,7	15,24	14,76	0,0058	21,22
RBAY	-95,2	81,5	-0,62	16,25	-0,1794	16,27
RESO	-29,1	49,2	3,46	5,33	-0,1818	6,36
RIGA	-136,9	69,3	3,27	9,59	0,0123	10,13
THTI	-76,5	81,7	0,98	16,19	0,3148	16,22
TIXI	-47,6	73,6	2,93	7,28	0,0105	7,84
TOW2	-83	140,5	-5,83	15,46	-0,0318	16,53
YAR2	-60,4	76,2	-1,51	11,34	0,1281	11,44

**Tabela C.3** – Parâmetros estatísticos das diferenças de ZTD ERA Interim-IGS