

Aplicação dos GNSS à avaliação da estabilidade de Radiómetros de Microondas e de Modelos Atmosféricos Globais

Telmo VIEIRA^{1,*}, M. Joana FERNANDES^{1,2} e Clara LÁZARO^{1,2}

¹ Faculdade de Ciências, Universidade do Porto (Portugal) ² Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental (CIIMAR)

(telmo.vieira@fc.up.pt; mjfernan@fc.up.pt; clazaro@fc.up.pt)

Palavras-chave: GNSS, Radiómetros de Microondas, ERA Interim, atrasos troposféricos zenitais

Resumo: Nos últimos vinte anos a Altimetria por Satélite adquiriu, em oceano aberto, grande maturidade e precisão, com impacto em estudos tais como a variação do nível do mar e as mudanças globais. Nas zonas costeiras, a precisão dessas medidas é limitada por fatores como a contaminação da terra nas medidas do altímetro e do radiómetro de microondas (*microwave radiometer*, MWR), a dificuldade em modelar a maré oceânica e os efeitos do estado do mar.

A correção devida à componente húmida da troposfera (*wet tropospheric correction*, WTC) nas medidas de altimetria por satélite é ainda uma das maiores fontes de erro, devido à sua grande variação espácio-temporal. Por esse motivo, a forma mais precisa de modelar a WTC é através de medidas dos MWR 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*) ou a partir de modelos atmosféricos globais.

Neste contexto, os ZTD estimados com GNSS assumem um papel importante na estimativa da WTC em regiões costeiras, permitindo colmatar a lacuna de cobertura dos MWR. Existe um número crescente de estações permanentes, distribuídas mundialmente, agrupadas em redes como a EPN (*EUREF Permanent Network*) ou o IGS (*International GNSS Service*), que determinam e disponibilizam em cada estação e de forma contínua estes atrasos.

O objetivo deste estudo é a exploração dos ZTD estimados com GNSS na avaliação da estabilidade dos MWR e dos modelos atmosféricos globais, como fonte de cálculo da WTC. A estabilidade das correções aplicadas às medidas de altimetria 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.

Escolhendo um conjunto de estações com base em diferentes critérios, tais como a localização geográfica, a proximidade à costa e a extensão da série de observações, os ZTD são determinados utilizando o *software* GAMIT. Com o objetivo de avaliar as diferentes soluções disponíveis, os atrasos troposféricos determinados são comparados com os mesmos valores fornecidos pelo IGS e pela EPN. Numa segunda análise, os mesmos atrasos são comparados com os valores do *ERA Interim*, o modelo de reanálise do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*). Para esse fim, os valores do *ERA Interim* são interpolados, no tempo e no espaço para cada estação analisada.

Os radiómetros de microondas a bordo de satélites altimétricos determinam, ponto a ponto, o atraso zenital devido à componente húmida da troposfera (WTC). Para serem comparados com estas medidas, aos ZTD estimados com GNSS é necessário subtrair o atraso devido à componente hidrostática da mesma camada da atmosfera. A componente hidrostática é calculada com grande precisão através de medidas de pressão atmosférica obtidas a partir de um modelo atmosférico tal como o *ERA Interim*.

Com o objetivo de avaliar a estabilidade dos radiómetros em regiões costeiras ao longo do tempo, os valores de WTC determinados por estes instrumentos são comparados com os correspondentes valores obtidos com GNSS. Esta comparação está espacialmente limitada a regiões com estações permanentes e simultaneamente com informação dos radiómetros.



1. Introdução

Com o avanço tecnológico verificado nas técnicas usadas na Engenharia Geográfica, nomeadamente na Deteção Remota, a Altimetria por Satélite apresenta-se como uma forma de aquisição de Informação Geoespacial à escala global.

O objetivo principal da Altimetria por Satélite é a determinação do nível da água do mar relativamente a uma superfície de referência, no entanto outras medidas são efetuadas, sendo úteis a um alargado leque de aplicações.

A obtenção de medidas de altimetria com a precisão de alguns centímetros (1-3 cm) requer a aplicação de um vasto conjunto de correções, instrumentais e geofísicas, bem como o conhecimento da órbita do satélite com o mesmo nível de precisão. Entre as diversas fontes de erro a considerar, destacam-se, neste estudo, os atrasos verificados na atmosfera nos sinais provenientes dos satélites, nomeadamente 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 hidrostática e a componente húmida. Esta relação é representada pela seguinte expressão:

$$ZTD = ZHD + ZWD$$

(1)

onde o ZTD é o Zenith Tropospheric Delay, o ZHD é o Zenith Hydrostatic Delay e o ZWD é o Zenith Wet Delay.

A componente hidrostática, 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). 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.

Os atrasos troposféricos estimados com GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) 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 (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 microondas a bordo de satélites altimétricos (Sibthorpe *et al.*, 2011) 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 expressão seguinte:

$$STD(E) = ZHDmf_h(E) + ZWDmf_w(E)$$
⁽²⁾

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

Quando um sinal viaja de um satélite, com um determinado ângulo de elevação *E* até um recetor, o atraso a que está sujeito designa-se 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 são estimados nos processamentos GNSS.

Uma vez que a maioria das observações não é feita 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 os dois valores 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).

Entre os diversos *software* disponíveis para o processamento de redes GNSS pré-estabelecidas, cujo objetivo, neste 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.



INFORMAÇÃO GEOESPACIAL PARA AS GERAÇÕES FUTURAS OPORTUNIDADES E DESAFIOS



Para a determinação dos parâmetros troposféricos deve ser usado um diversificado conjunto de ângulos de elevação dos satélites (Niell *et al.*, 2001). No caso em que a rede estabelecida apresenta uma configuração regional, ou seja, as estações estão muito próximas e limitadas a uma pequena região, todas elas observam os mesmos satélites com ângulos de elevação muito semelhantes. Consequentemente, os correspondentes atrasos troposféricos estarão altamente correlacionados.

Para evitar o problema referido no parágrafo anterior, as redes escolhidas devem incluir estações com uma boa distribuição global para fornecer estabilidade às soluções (Fernandes *et al.*, 2010).

Outra forma de obter a WTC (*wet tropospheric correction*) é a partir de um modelo atmosférico. O *ERA Interim* é o mais recente modelo atmosférico global de reanálise produzido pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (Dee *et al.*, 2011). Este modelo, assim como outros, é um conjunto de dados que permitem descrever e caracterizar no tempo a atmosfera. 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.

Com uma metodologia adequada é possível comparar os ZTD estimados por GNSS com os mesmos derivados do modelo ERA Interim.

Ainda no que diz respeito à Altimetria por Satélite, apesar das medidas efetuadas em oceano aberto apresentarem uma elevada precisão, em regiões costeiras o mesmo não se verifica.

As medidas da correção troposférica, devida à componente húmida, obtidas pelos radiómetros de microondas, a bordo dos satélites altimétricos, tornam-se inválidas com a proximidade à costa, devido à contaminação da terra. Dependendo da frequência do MWR e da geometria do percurso do satélite relativamente à linha de costa, as medidas tornam-se inválidas para distâncias à costa em torno dos 30-50 km (Fernandes *et al.*, 2010).

Várias metodologias e abordagens têm sido estabelecidas para a substituição das medidas inválidas do MWR por valores estimados por GNSS e por modelos atmosféricos, cruzando-se as diferentes fontes de informação. A combinação das medidas com proveniências e características diferentes deve ser efetuada usando metodologias adequadas (Fernandes *et al.*, 2010, 2015).

O objetivo deste estudo é a exploração dos ZTD estimados com GNSS na avaliação da estabilidade dos MWR e dos modelos atmosféricos globais como fonte de cálculo da WTC para aplicação às medidas de altimetria por satélite.

Na seção 2 descrevem-se os processamentos GNSS realizados neste estudo com o objetivo de obter um conjunto de ZTD de referência, bem como a comparação entre estes e os ZTD obtidos em centros de processamento, tais como o IGS e a EPN. Os ZTD obtidos através do modelo atmosférico global *ERA* Interim são também comparados com estes ZTD de referência. Na seção 3 apresenta-se a comparação entre os ZWD obtidos a partir do GNSS e os correspondentes valores medidos pelos radiómetros de microondas, a bordo de várias missões altimétricas. Finalmente, na seção 4 são apresentadas as principais conclusões deste trabalho.

2. Cálculo e análise de atrasos troposféricos com GNSS

2.1 Cálculo de ZTD para um conjunto de estações de referência

Para a realização deste estudo foi necessário determinar atrasos troposféricos zenitais num conjunto de estações selecionadas, usando a mesma metodologia de processamento, de modo a servirem como ZTD de referência.

A seleção do conjunto de estações, a serem processadas com o GAMIT e para as quais é feita a avaliação do rigor das soluções GNSS, passou por várias fases. Este procedimento apresentou-se de certo modo ambíguo, na medida em que foi necessário estabelecer o equilíbrio entre os vários critérios definidos: períodos de observação longos, boa distribuição geográfica e proximidade à costa.

Feita a escolha de um conjunto de cerca de 60 estações distribuídas mundialmente, verificou-se que o processamento de 3 redes, com cerca de 20 estações cada, era mais rápido do que o processamento de uma única rede de 60 estações, pelo que se optou por dividir as estações selecionadas anteriormente em 3 redes diferentes. A divisão das estações em 3 redes baseou-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, para cobrir regiões com diferentes níveis de variabilidade do atraso troposférico.

Na Figura 1 representam-se as estações selecionadas. A primeira rede com estações cujos períodos de observação são mais longos a vermelho, a segunda rede em que os períodos de observação são intermédios a azul e a terceira rede a verde, em que as estações apresentam séries de ZTD mais curtas.



Figura 1 – Estações permanentes escolhidas

Com o objetivo de avaliar a precisão das soluções, foram selecionadas estações comuns às várias 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.

No cálculo dos ZTD com o GAMIT foram usadas 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.

2.2 Comparação de diferentes soluções GNSS

Dispondo de diferentes soluções GNSS, processadas em centros diferentes, torna-se importante perceber e analisar o seu rigor através da comparação entre elas e com estimativas independentes. Esta comparação é um bom indicador da qualidade dos atrasos troposféricos zenitais estimados com GNSS.

Para esse fim foram comparados os ZTD relativos às seguintes soluções: ZTD processados com o software GAMIT no âmbito deste trabalho (ZTD UPorto) e os correspondentes fornecidos pelo IGS e pela EPN. Com o cuidado de comparar medidas coincidentes no tempo, são calculadas as diversas diferenças de ZTD (EPN-IGS, UPorto-IGS e EPN-UPorto) para cada estação, mediante a disponibilidade de cada solução.

Outra comparação aqui realizada diz respeito aos ZTD da mesma estação, mas estimados em redes diferentes. Para as três estações comuns (FALE, ALBH e TOW2) são calculadas as diferenças de ZTD entre as três redes estabelecidas e processadas no âmbito deste trabalho.

Uma vez calculadas as diferenças são determinados diversos parâmetros para avaliar a proximidade entre as soluções GNSS. Os parâmetros calculados são média, desvio padrão, mínimo e máximo.

No que diz respeito à comparação das soluções GNSS (IGS, EPN e UPorto), as médias das diferenças são tendencialmente inferiores ao milímetro, o que se traduz na ausência de erros sistemáticos e valores de desvio padrão e erro médio quadrático muito semelhantes.

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. 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 apresenta três 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. Na análise aos



resultados da comparação destes mesmos ZTD com os obtidos com o modelo *ERA Interim*, verificar-se-á se as diferenças nestas estações são também muito elevadas quando comparados com o IGS e UPorto.

No que toca à comparação dos ZTD da mesma estação obtidos em redes diferentes, os valores médios das diferenças são também inferiores ao milímetro.



Figura 3 – Diferenças em função do tempo da estação ALBH

Na Figura 2 representa-se um gráfico com o EMQ das diferenças dos ZTD das estações comuns. Verifica-se que as comparações com a terceira rede apresentam diferenças muito superiores. Na Figura 3 representam-se as diferenças em função do tempo para a estação ALBH. As diferenças entre a rede 1 e a rede 2 (azul) apresentam-se constantes no tempo. As diferenças entre a rede 2 e a rede 3 (vermelho) e as diferenças entre a rede 1 e a rede 3 (verde) são superiores no período inicial até 1998. O mesmo acontece com a estação TOW2.

Os elevados valores de EMQ verificados em comparações com a terceira rede, não traduzem corretamente as diferenças ao longo de todo o período, uma vez que estão afetados apenas pelo período inicial de cerca de 2 anos.



Figura 4 – Número de estações e observações ao longo do tempo da rede 3

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.

Na Figura 4 representa-se o número de observações por dia (eixo lado esquerdo, azul) e número de estações por dia (eixo lado direito, vermelho) ao longo do tempo para a terceira rede. Estas duas variáveis estão relacionadas obviamente. Verifica-se que para o mesmo período em que as diferenças são maiores (até 1998) o número de estações nunca é superior a quatro. A partir deste momento o número de estações aumenta consideravelmente e mantém-se ao longo do tempo e consequentemente as diferenças são inferiores.

Eliminando as diferenças para o período referido e recalculando os parâmetros estatísticos os valores do desvio padrão apresentam um valor máximo de 4 mm. Este valor e os referidos na comparação entre soluções GNSS são bons indicadores da precisão dos ZTD estimados com GNSS.



2.3 Comparação entre GNSS e modelo atmosférico

Nesta seção, os ZTD estimados com GNSS são comparados com os ZTD obtidos a partir do modelo atmosférico de reanálise *ERA Interim*. Esta comparação torna-se menos simples, na medida em que carece de diversos procedimentos, devido às diferenças nas medidas obtidas por cada fonte de informação, que impossibilitam a comparação direta.

Os ZTD provenientes dos GNSS são estimados à altitude de cada estação permanente. Os mesmos atrasos obtidos a partir do modelo são estimados ao nível da orografia do modelo. Este aspeto levanta a necessidade de reduzir os atrasos ao mesmo nível. Esta redução apresenta-se diferente para cada uma das componentes que constituem o ZTD, 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 (6) e (9) de Fernandes *et al.* (2015) para o ZHD e ZWD, respetivamente. 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.

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

As mesmas estações que apresentavam desvio padrão das diferenças UPorto-IGS muito elevado, também apresentam valores elevados na comparação entre o IGS e o *ERA Interim*. Os resultados indicam que as diferenças *ERA Interim*-IGS e *ERA Interim*-UPorto apresentam um padrão muito semelhante, no entanto em 3 estações as diferenças entre o modelo e o IGS apresentam desvios padrão muito superiores.

3. ZTD estimados por GNSS na monitorização dos radiómetros de microondas

Nesta seção apresenta-se a comparação entre os valores de WTC estimados com GNSS e os correspondentes obtidos a partir dos radiómetros de microondas (MWR) a bordo das missões altimétricas ERS-2, ENVISAT, TOPEX/Poseidon, Jason-1 e Jason-2. O objetivo é avaliar até que ponto os ZWD determinados com GNSS podem ser utilizados na avaliação da estabilidade dos MWR. Na comparação entre GNSS e radiómetros apenas se considera o ZWD, uma vez que é a quantidade medida pelos MWR. Esta quantidade é medida ao nível do mar, pelo que a componente húmida derivada dos GNSS deve também ser reduzida a este nível usando as equações referidas na seção 2.3.

Com um conjunto base de estações costeiras distribuídas mundialmente, o primeiro passo é a seleção dos pontos dos MWR a menos de 100 km de uma gualquer estação GNSS.



Figura 5 – Exemplo da seleção dos pontos do ciclo 1 do ERS-2

Na Figura 5 mostra-se um extrato da seleção dos pontos (azul) a menos de 100 km de uma qualquer estação GNSS (preto) consideradas nesta análise, para o ciclo 1 do ERS-2.

Feita esta primeira seleção e eliminando um grande volume de informação desnecessária para esta análise, o ZWD do GNSS é interpolado para os tempos dos pontos dos radiómetros em cada estação. Assim sendo, em cada estação tem-se o ZWD do GNSS e o ZWD do MWR do instante correspondente, num ponto algures a menos de 100 km da respetiva estação permanente. Todos estes valores estão referidos ao nível do mar.

Dispondo dos atrasos da componente húmida estimados por GNSS e por MWR temporalmente coincidentes, mas em pontos diferentes, nunca separados por mais de 100 km, para 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.

Devido à falta de coincidência temporal e/ou espacial entre as duas fontes de informação, algumas estações vão sendo eliminadas ao longo deste procedimento, não sendo usadas nesta análise.

A análise que relaciona a informação obtida com o GNSS com os dados dos MWR foca vários aspetos. No entanto, neste estudo apenas são analisadas as diferenças entre ambos em função da distância à costa para o ERS-2 e ENVISAT, para tentar concluir para cada um, gual a distância para a gual as diferenças são mínimas.



Figura 6 - EMQ das diferenças entre GNSS e MWR em função da distância à costa

Na Figura 6 representa-se o EMQ das diferenças entre GNSS e MWR. Da esquerda para a direita correspondem os radiómetros dos satélites ERS-2 e ENVISAT. Estes valores foram calculados para classes de 5 km. O eixo da distância à costa está no intervalo 0-100 km e o eixo do EMQ está representado no intervalo 2-3.5 cm. A azul são considerados apenas pontos do MWR a uma certa distância mínima da costa, que é diferente para cada satélite. A vermelho são representados todos os pontos classificados como válidos, independentemente da distância à costa.

Os resultados mostram que os gráficos da Figura 6 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.



Figura 7 – Diferenças entre GNSS e MWR em função do tempo

Nos gráficos da Figura 7 representa-se a análise em função do tempo apenas para o Jason-2 e TOPEX/Poseidon. Os gráficos superiores mostram as diferenças calculadas e os gráficos inferiores correspondem às mesmas diferenças suavizadas, que



poderão detetar eventuais saltos. A reta de ajuste pelo método dos mínimos quadrados, que poderá determinar uma eventual deriva do MWR, apresenta um declive de -0.60 e +0.08 mm/ano para as missões Jason-2 e TOPEX, respetivamente. É de notar que as diferenças foram determinadas com a expressão *GNSS* – *MWR*.

A calibração dos mesmos radiómetros em análise neste estudo, relativamente aos radiómetros de imagem do Special Sensor Microwave Imager (SSMI) e do Special Sensor Microwave Imager/Sounder (SSMI/S) a bordo dos satélites F10 e F17 do Defense Meteorological Satellite Program (DMSP), no âmbito de outro trabalho em curso, apresentam declives inferiores aos determinados.

4. Conclusões

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 no 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.

Na comparação com o modelo *ERA Interim*, os resultados estão também de acordo com outros autores. Tanto as diferenças com o IGS, como as diferenças com os ZTD UPorto, apresentam um padrão semelhante, no entanto em 3 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, a comparação com o ERA Interim permite identificar períodos de invalidade e descontinuidades nas soluções IGS, o que não acontece nos ZTD UPorto.

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. Ainda assim, os resultados da análise dos radiómetros não são muito claros, designadamente a análise em função do tempo, pelo que em trabalho futuro esta análise poderá ser aperfeiçoada, nomeadamente no que toca à seleção das estações usadas.

Referências Bibliográficas

- Boehm, J.; Werl, B.; Schuh, H. (2006). Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. J. Geophys.
- Dee, D.P. et al. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. Págs. 553-597
- Fernandes, M.J.; Lázaro, C.; Ablain, M.; Pires, N. (2015). Improved wet path delays for all ESA and reference altimetric missions, Remote Sensing of Environment, http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.07.023
- Fernandes, M.J.; Lázaro, C.; Nunes, A.L.; Pires, N.; Bastos, L.; Mendes, V.B. (2010). GNSS-derived Path Delay: an approach to compute the wet tropospheric correction for coastal altimetry. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. Vol. 7, Págs. 596-600
- Fernandes, M.J.; Pires, N.; Lázaro, C.; Nunes, A.L. (2013). Tropospheric delays from GNSS for application in coastal altimetry, Advances in Space Research, Págs. 1352-1368
- Herring, T.A.; King, R.W.; McClusky, S.C. (2010). GAMIT Reference Manual GPS Analysis at MIT Release 10.4. Dep. Of Earth, Atm. and Planetary Sciences. MIT.
- Niell, A.E.; Coster, A.J.; Solheim, F.S.; Mendes, V.B.; Toor, P.C.; Langley, R.B.; Upham, A. (2001). Comparison of measurements of atmospheric wet delay by radiosonde, water vapor radiometer, GPS and VLBI. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. Vol. 18, Págs. 830-850
- Pacione, E.; Pace, B.; Vedel, H.; de Haan, S.; Lanotte, R.; Vespe, F. (2011). Combination methods of tropospheric time series. Advances in Space Research, Págs. 323-335
- Sibthorpe, A.; Brown, S.; Desai, S.D.; Haines, B.J. (2011). Calibration and Validation of the Jason-2/OSTM Advanced Microwave Radiometer Using Terrestrial GPS Stations. Marine Geodesy. 34:3-4. Págs. 420-430