



Tomografia 3D do vapor de água com integração de dados GPS e interferometria SAR

Pedro BENEVIDES¹, João CATALÃO¹, Giovanni NICO² e Pedro M. A. MIRANDA¹

¹IDL, Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências

² Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Istituto per le Applicazioni del Calcolo, (Itália)

(pjbenevides@fc.ul.pt; jcfernandes@fc.ul.pt; g.nico@ba.iac.cnr.it; pmmiranda@fc.ul.pt)

Palavras-chave: Tomografia GPS, Interferometria SAR (InSAR), Vapor de água, Vapor de água precipitável (PWV), Troposfera, Lisboa

Resumo: A meteorologia GPS tem sido usada para observar as características da atmosfera através das propriedades do sinal transmitido de forma quase continua entre os satélites e os receptores. A elevada resolução temporal desta técnica permite a monitorização do vapor de água na atmosfera, que é altamente variável. A partir de técnicas de tomografia GPS é possível reconstruir o estado do vapor de água através dos sinais GPS que cruzam a troposfera, mapeando-os numa grelha 3D. Contudo, a geometria da constelação GPS e a reduzida densidade espacial de receptores no terreno não permitem uma cobertura óptima da grelha, criando instabilidades na inversão do sistema de equações. A interferometria SAR pode também ser usada para determinar mapas de vapor de água integrado. Esta técnica fornece uma densidade espacial muito elevada com uma extensão de imagem abrangendo uma área à escala regional, mas com uma resolução temporal de vários dias. Neste trabalho, introduzimos mapas diferenciais de vapor de água integrado obtidos por um interferograma SAR entre as datas de aquisição da imagem master e slave no esquema de processamento da tomografia GPS. O objectivo desta metodologia é aumentar a resolução espacial dos mapas 3D de vapor de água da tomografia e diminuir um efeito de suavização na tomografia GPS. Os resultados são obtidos para a região de Lisboa utilizando estações GPS permanentes e imagens Envisat e são validados através de dados radiossonda.



1. Introdução

O conteúdo de vapor de água atmosférico desempenha um papel fundamental nos modelos numéricos de previsão meteorológica, sendo um parâmetro fortemente ligado ao desenvolvimento dos processos atmosféricos. A densidade de vapor de água na atmosfera está relacionada com a componente húmida da refractividade atmosférica. A sua distribuição e intensidade afectam directamente a propagação do sinal no espectro das microondas (ex. GPS (*Global Positioning System*) ou Radar), causando um atraso na sua propagação maioritariamente verificado na troposfera (Bevis *et al.*, 1992). Técnicas espaciais de detecção remota como o GPS e o InSAR (Interferometria radar de abertura sintética) fornecem medidas do vapor de água integrado precipitável (PWV, *Precipitable Water Vapor*), sendo esta quantidade relacionada com a distribuição horizontal do vapor de água na troposfera (Mateus *et al.*, 2014). Contudo o PWV não permite obter uma quantificação vertical da distribuição do vapor de água, que é fundamental na descrição e previsão de eventos atmosféricos severos. A distribuição espacial do vapor de água em 3D é vulgarmente captada apenas por medições de balões atmosféricos de radiossondagem, que são lançados com uma periodicidade máxima de algumas horas e apenas permitem medir um perfil atmosférico irregular, isto é, afectado pelo vento (Champollion *et al.*, 2005). A tomografia GPS já provou ser capaz de medir a distribuição 3D do vapor de água na troposfera (Flores *et al.*, 2000; Champollion *et al.*, 2005). Nesta técnica, as observações GPS de atraso húmido oblíquo (SWD, *Slant Wet Delay*) são mapeadas num modelo 3D discreto definido ao longo da troposfera acima de uma região onde exista uma rede de estações GPS. O modelo é dividido em figuras de forma cúbica, que são definidas como *voxels* (píxel volumétrico) (Flores *et al.*, 2000). A refractividade do vapor de água é obtida resolvendo um sistema de equações que relaciona as observações e o espaço dos *voxels* do modelo durante um curto período de tempo (Rohm e Bosy, 2009).

Este trabalho tem como objectivo investigar uma nova metodologia para melhorar a precisão e aumentar a resolução espacial dos mapas 3D de vapor de água obtidos da tomografia GPS, através da inclusão de mapas de alta resolução obtidos pelo InSAR. A melhoria na resolução espacial e temporal dos mapas de vapor de água permite estimar modelos da atmosfera mais precisos e robustos, utilizados posteriormente na mitigação do atraso provocado pelo vapor de água na propagação do sinal no espectro das microondas (ex. GPS) e dos efeitos atmosféricos resultantes nas imagens de satélite de observação da Terra. Os mapas PWV obtidos pelo InSAR reflectem em cada ponto a diferença desta variável entre os instantes da aquisição das imagens *master* e *slave*, que formam o interferograma SAR. Estas medidas de vapor de água são obtidas em mapas de alta resolução espacial de aproximadamente 100 metros, com uma resolução temporal dependente do tempo de revisita do sensor espacial (Kampes *et al.*, 2003). A calibração dos dados InSAR é uma tarefa crucial e é realizada através de medidas absolutas de PWV obtidas das estações GPS ou de um modelo de previsão meteorológica (Mateus *et al.*, 2013). Com a introdução de um grande número de observações InSAR na tomografia GPS, é esperado uma inversão do sistema de equações mais robusta, um melhoramento significativo da resolução horizontal dos mapas de vapor de água e uma solução global mais próxima do estado real da atmosfera.

A introdução de medidas InSAR na solução dos mapas tridimensionais da tomografia GPS necessita de ajustes no sistema de equações. Para o efeito são adicionadas ao sistema de equações das observações GPS um conjunto de equações, relacionando as diferenças temporais de PWV medidas pelo InSAR. Estas equações adicionais são materializadas na tomografia através do percurso efectuado pelo sinal SAR cruzando os *voxels* do modelo, de forma semelhante ao GPS. A utilização das medidas diferenciais do PWV determinadas pelo InSAR evita o erro que é gerado na determinação do valor absoluto do PWV proveniente desta técnica, podendo ser uma alternativa viável a outras medições absolutas e não tão precisas provenientes por exemplo de modelos meteorológicos. A refractividade do vapor de água calculada pela tomografia GPS constrangida com medidas InSAR é comparada a mapas 3D gerados apenas com dados de tomografia GPS, que são validados com perfis meteorológicos de radiossondagem na região de estudo.

2. Teoria

2.1 Tomografia GPS

O atraso húmido que é medido através da propagação do sinal microondas é causado pela refractividade húmida presente na atmosfera, que está relacionada com o PWV através de uma constante que é determinada empiricamente com base em dados atmosféricos locais (Bevis *et al.*, 1992). A componente hidrostática da refractividade na atmosfera, que juntamente com a húmida somam a refractividade total, depende praticamente da pressão atmosférica e da sua variação com a altitude, sendo bastante



regular no tempo e determinável com precisão suficiente. A componente húmida é altamente variável e difícil de modelar por estar intimamente ligada com o conteúdo de vapor de água. As observações oblíquas SWD, que são os dados de entrada GPS para a tomografia, contém medições de vapor de água ao longo do seu percurso pela troposfera. A partir da medição GPS do integral do atraso húmido na zenital (ZWD), que é determinado através do processamento clássico de dados GPS (Herring *et al.*, 2010), é aplicada uma função de mapeamento para reconstruir o SWD visto por cada estação GPS para cada um dos satélites visíveis no horizonte. As observações GPS e a refratividade húmida na atmosfera estão relacionadas no seguinte sistema de equações lineares

$$SWD = A \cdot N_{wet} \quad (1)$$

com o vector de observações SWD formado por N observações, N_{wet} representando o vector dos M valores desconhecidos da refratividade húmida e a matriz A , com a dimensão N por M , que define a relação entre as duas variáveis e representa a grelha 3D do modelo tomográfico (Flores *et al.*, 2000). A grelha 3D é construída através de um conjunto de M voxels que definem o espaço sobre uma rede de estações GPS, sendo atravessado pelas observações SWD. A matriz A é preenchida através da aplicação de um algoritmo de *raytracing* onde em cada uma das suas entradas, que representa uma posição de um determinado voxel, é determinada a sub-distância percorrida por cada uma das observações SWD (Flores *et al.*, 2000). Cada uma destas observações dá origem a uma linha na matriz A e uma equação para o sistema da tomografia GPS. Desde modo a equação (1) representa um sistema simples mas longo, que depende do número de raios oblíquos traçados a partir de cada receptor para os satélites visíveis e da duração da janela temporal de observação, que se define para colectar um número de SWD suficientes para resolver o mapa tridimensional do vapor de água (Champollion *et al.*, 2005). Os valores dos voxels são considerados constantes durante este período (Flores *et al.*, 2000). O sistema é linearizado através da aproximação da curvatura do percurso do sinal GPS pela troposfera a uma recta, sendo considerada razoável para SWD com ângulos de elevação não muito pequenos (Flores *et al.*, 2000). Para se obter uma solução para cada valor N_{wet} em cada voxel é necessário inverter a matriz A . Se existir uma solução preliminar N_0 do campo tridimensional do vapor de água para os dados da grelha tomográfica, a solução para a seguinte equação (2) pode ser determinada através do método dos mínimos quadrados ponderados (Menke, 2006)

$$N_{wet} = N_0 + (A^T \cdot P \cdot A + P_0)^{-1} \cdot (A^T \cdot P) \cdot (SWD - A \cdot N_0) \quad (2)$$

onde P é a matriz diagonal com os pesos de cada observação SWD, e P_0 é a matriz da covariância da solução inicial N_0 que é determinada através de funções gaussianas que dependem do espaçamento da grelha (Champollion *et al.*, 2005). Esta solução inicial pode ser obtida de modelos numéricos meteorológicos, interpolação de perfis de radiossonda ou de outro sensor meteorológico (Bevis *et al.*, 1992; Rohm e Bosy, 2009). Mesmo que não exista nenhum valor inicial para N_0 a equação (2) ainda pode ser resolvida, sendo simplificada com os termos nulos desta variável. Outra alternativa é determinar uma solução meteorológica sintética da atmosfera, isto é, um perfil vertical atmosférico determinado a partir do cálculo da refratividade ao nível do mar de forma empírica (Thayer, 1974) e distribuído verticalmente através de uma função exponencial negativa que representa a diminuição do conteúdo de vapor de água com o aumento da altitude

$$N_{wet}(h) = N_{sea-level} \exp\left(-\frac{h}{H}\right) \quad (3)$$

onde h representa a altitude, $N_{sea-level}$ a refratividade húmida ao nível do mar e H é um factor de escala ajustado empiricamente para a troposfera local.

A maior limitação da tomografia GPS resulta da geometria de aquisição das observações SWD, semelhante a um cone invertido, que é limitada pelas observações com ângulos de elevação mais baixos. As SWD vão cobrir bem as colunas de voxels onde se localiza um receptor GPS, mas os situados na sua vizinhança e sem receptores no seu interior vão ser deficientemente cobertos devido à maioria dos ângulos de elevação serem mais próximos do zénite (90°) do que do terreno (0°) (Flores *et al.*, 2000; Champollion *et al.*, 2005). Desta forma, a matriz A vai ser formada por uma quantidade significativa de zeros, correspondendo a voxels não percorridos por nenhuma observação, sendo esta característica verificada principalmente nas camadas mais baixas da grelha tomográfica. Consequentemente o sistema de equações só pode ser resolvido através de constrangimentos adicionais que permitem tornar a matriz invertível (Flores *et al.*, 2000). Estes constrangimentos são adicionados ao sistema de equações da tomografia sob a forma de equações adicionais a (1) onde o termo à esquerda é substituído por zero e o termo à direita pela condição que define esse constrangimento.

2.2 Inclusão da interferometria na tomografia

A geometria das observações SWD_{SAR} depende da trajetória da órbita do sensor SAR e do seu ângulo de vista durante a aquisição de informação sobre o terreno. A longitude, latitude e altitude de cada pixel relativo ao mapa das diferenças de PWV observadas no interferograma, juntamente com a informação orbital anterior, permitem definir uma espécie de conjunto de “estações” no terreno que medem o conteúdo do vapor de água ao longo da troposfera. Desta forma podemos identificar os *voxels* atravessados pelas medições do sensor SAR na grelha tomográfica. Geometricamente as linhas de vista das observações SWD_{SAR} vão ser muito diferentes da geometria de aquisição de cone invertido das SWD_{GPS} . Para além disso, é importante notar que as medidas InSAR não fornecem valores absolutos de SWD, contrariamente ao GPS, mas sim as suas diferenças entre os tempos de aquisição das imagens *master* e *slave*. Apesar disso, a geometria das observações SWD_{SAR} mantem-se constante, sendo a mesma independentemente do instante de aquisição da imagem *master* ou *slave*. Por estes motivos, a equação (2) foi alterada para incluir dados da interferometria SAR da seguinte forma

$$N_{wet} = N_0 + (A_{SAR}^T \cdot P_{SAR} \cdot A_{SAR} + P_0)^{-1} (A_{SAR}^T \cdot P_{SAR}) \cdot (SWD_{SAR}^S - SWD_{SAR}^M) \quad (4)$$

sendo A_{SAR} a matriz relacionado as observações SWD_{SAR} com a grelha do modelo, P_{SAR} representa os pesos das observações InSAR, e $SWD_{SAR}^S - SWD_{SAR}^M$ é relativo às diferenças de SWD medida entre os instantes temporais da imagem *master* (M) e *slave* (S). Neste caso particular a imagem *master* é anterior à *slave*. O peso a atribuir às observações InSAR pode ser baseado na coerência interferométrica. De forma a combinar este conjunto de equações derivado do InSAR ao conjunto de equações GPS definido em (2) as épocas representadas aqui devem coincidir com as datas de aquisição das imagens SAR. Neste caso as variáveis referentes ao tempo 0 são calculadas usando os dados GPS à época da imagem *master*, sendo as restantes variáveis referidas aos dados GPS na altura da imagem *slave*.

3. Dados e configuração da tomografia

3.1 Definição da grelha tomográfica

Neste trabalho foi utilizada uma rede GPS composta por 9 estações permanentes do Instituto Geográfico do Exército (IgeoE) e da Direcção Geral do Território (DGT), definindo uma área de cerca de 80x70 km² na região de Lisboa, como pode ser visível na Figura 1. As localizações da estação meteorológica e da estação de radiossondagem também são visíveis, juntamente com um modelo digital do terreno. A distribuição geográfica das estações em diferentes altitudes permite que a rede GPS reflecta as variações do relevo na região, que é misto (composto por planaltos, montanhas e zona costeira). Devido à existência de uma zona costeira extensa e dos estuários do rio Tejo e Sado a área foi ajustada de forma a minimizar os corpos de água e consequentemente a baixa coerência interferométrica nestas áreas.

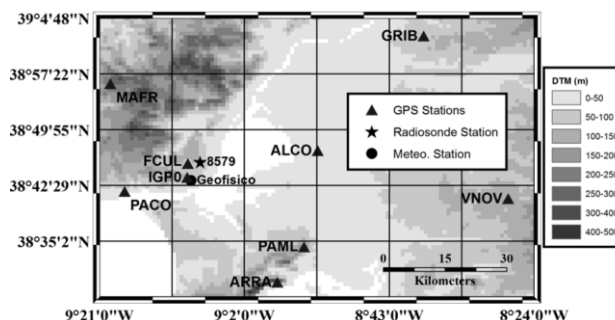


Figura 1 – Região de estudo com a distribuição das estações GPS, estação meteorológica de referência e estação de radiossondagem, juntamente com definição da grelha horizontal do modelo

A resolução da grelha tomográfica deve ser definida com um espaçamento horizontal que não seja demasiado grande, o que introduz medições de vapor de água mais grosseiras, nem demasiado pequena, o que introduz um maior número de *voxels* no modelo e aumenta fortemente a complexidade da resolução do sistema de equações, causando problemas na inversão da matriz A. Por outro lado, a definição dos limites da grelha deve incluir dentro da sua área os pixels resultantes da aquisição do interferograma SAR. Tendo estes factores em mente, a resolução horizontal da grelha é definida de modo a que as estações se localizem preferencialmente no limite dos *voxels*, para permitir uma transposição mais evidente das SWD para as colunas

vizinhas. Consequentemente, a grelha tomográfica é definida com 6 células na direcção da longitude e 5 células na direcção da latitude, formando uma dimensão horizontal de $14.5 \times 14.5 \text{ km}^2$. O sectionamento vertical da grelha é feito através da divisão em 18 camadas. A primeira engloba o terreno até aos 500 m de altitude, sendo a última definida na fronteira da troposfera dos 10 km. A separação intermédia entre camadas é variável (250, 300, 500, 1000 m), aumentando o espaçamento com a altitude e seguindo o perfil atmosférico espectável do vapor de água representado na equação (3).

3.2 Dados GPS

O processamento dos dados GPS é realizado com o *software* GAMIT (v.10.3) (Herring *et al.*, 2010). As coordenadas das estações GPS são determinadas com precisão milimétrica juntamente com os parâmetros atmosféricos de interesse. São utilizadas estações de referência e órbitas precisas IGS. A parte directamente mensurável do atraso, representado pelo parâmetro atraso hidrostático zenital (ZHD), é determinada através de valores de pressão retirados de modelos climatológicos. O atraso húmido ZWD é estimado a partir da subtracção do ZHD do atraso total zenital (ZTD), que é um parâmetro obtido no final do processamento GPS. As funções de mapeamento VMF1 são aplicadas para converter os atrasos ZWD em medidas SWD para cada estação, conjunto de satélites e a cada instante (Herring *et al.*, 2010). O valor de 5° é escolhido como corte para o ângulo de elevação das observações SWD. O peso das observações para a tomografia é definido combinando o erro estimado para cada ZWD com uma relação baseada no ângulo de elevação de cada SWD. O PWV é obtido a partir do ZWD através da relação empírica definida por Bevis *et al.* (1992), ajustada para os dados da região através de um estudo da troposfera local baseado numa série temporal de radiossondas (Mateus *et al.*, 2014). Esta relação mantém-se válida para as medições oblíquas do atraso integral SWD (Champollion *et al.*, 2005).

3.3 Dados InSAR

Os dados são duas imagens SAR obtidas do Envisat, incluindo a região de Lisboa, a partir das quais se calculou um interferograma. As imagens foram adquiridas em órbita descendente a 4/10/2009 e a 8/11/2009, com um ângulo de incidência médio de 21° e um azimutal de 194° . O *software* de interferometria DORIS foi utilizado para o processamento (Kampes *et al.*, 2003). Os erros orbitais foram corrigidos estimando e subtraindo uma superfície linear do interferograma. Foi aplicado antes do desenrolamento de fase um *multilook* de 40×8 píxeis, resultando numa resolução final de $160 \times 160 \text{ m}$, mas com uma redução no ruído da fase. A frequência instantânea da fase foi determinada através da técnica *matrix-pencil*, juntamente com o desenrolamento da fase através de um algoritmo Bayesian baseado em técnicas de *simulated annealing* derivadas da teoria do caos, juntamente ainda da respectiva geolocalização (Nico, 2002). Na Figura 2 é possível visualizar os dados do PWV diferencial representado pelo interferograma escolhido em conjunto com os limites da área da grelha tomográfica e a rede de estações GPS utilizada. Uma máscara foi aplicada aos dados interferométricos para remover as regiões de píxeis correspondentes a corpos de água. Para tornar o processamento tomográfico mais leve, uma grelha regular com um espaçamento de 1500 m foi aplicada ao interferograma, resultando num conjunto de cerca de 1900 píxeis no interior da área da tomografia. As altitudes do interferograma foram corrigidas com um modelo de geóide local (Catalão, 2006) para estimar altitudes elipsoidais, e desta forma estarem em concordância com a referência vertical das estações GPS.

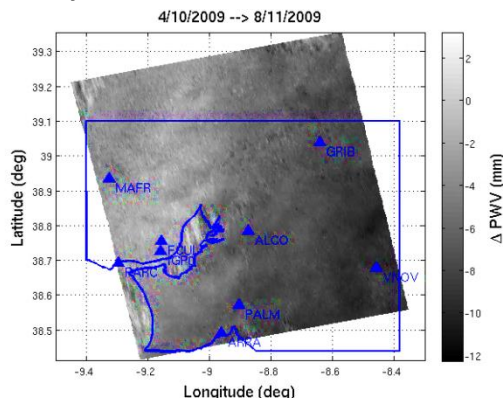


Figura 2 – Imagem do PWV diferencial representado pelo interferograma escolhido na região de Lisboa, juntamente com as estações GPS, com os limites da grelha tomográfica e o limite de costa

4. Resultados

Os resultados da tomografia vão ser descritos em dois grupos: tomografia GPS sem a introdução de dados auxiliares, e tomografia GPS com a inclusão de dados InSAR. Um programa para implementação da tomografia GPS desenvolvido anteriormente para processar mapas troposféricos 3D do vapor de água (Benevides *et al.*, 2014), foi melhorado com o objectivo de incluir medições externas adicionais, como as representadas para a interferometria SAR na equação (4). Os constrangimentos introduzidos no sistema de equações do programa para ultrapassar as limitações do preenchimento dos *voxels* da grelha são os seguintes: médias horizontais entre os *voxels* vizinhos da mesma camada vertical pesadas através do inverso da distância (Rohm e Bosy, 2009), forçamento das camadas verticais mais elevadas na troposfera a valores nulos representando o comportamento esperado do vapor de água perto da tropopausa (equação (3)), re-estimação das observações SWD que atravessam as fronteiras da grelha lateralmente com base na função atmosférica sintética da equação 3. Este último constrangimento é necessário devido ao conteúdo total do vapor de água das observações SWD não ser representado totalmente dentro do modelo, para trajetórias que não atravessem a grelha pelo seu limite superior vertical aos 10 km. O intervalo temporal para recolher observações é definido de forma a que exista um conjunto suficiente de SWD que intersecte a grelha tomográfica com ângulos de elevação diferentes, de modo a permitir o preenchimento da matriz A e por consequência a inversão do sistema de equações. Um intervalo de 30 minutos é definido para a solução tomográfica garantindo uma boa cobertura geométrica sem mitigar importantes características atmosféricas (Champollion *et al.*, 2005).

O primeiro passo para a obtenção de soluções tomográficas consiste na determinação de uma solução preliminar N_0 para a época inicial t_0 , que corresponde à data de aquisição da imagem *master* (4/10/2009). Vamos definir como t_1 a época referente à imagem *slave* (8/11/2009). Os 30 minutos definidos para a solução tomográfica iniciam em ambas as épocas na hora 22:10, para englobar no seu interior a hora de aquisição das imagens SAR (22:20). A determinação da solução tomográfica para a época t_0 é calculada apenas com dados GPS em (2) e utilizando a solução N_0 calculada a partir do perfil atmosférico sintético utilizando dados atmosféricos da estação meteorológica (Figura 1) na equação 3. A Figura 3 mostra a solução tomográfica em perfil oeste-este para a época t_0 . Os perfis representam a terceira linha da grelha tomográfica (Figura 1). As unidades das figuras de refractividade são apresentadas em g/m^3 . Na Figura 4 é representado apenas um perfil ou coluna da grelha tomográfica, terceira linha e segunda coluna a contar da esquerda, juntamente com o perfil de radiossonda mais próximo da época t_0 , lançado às 12:00 de 4/10/2009.

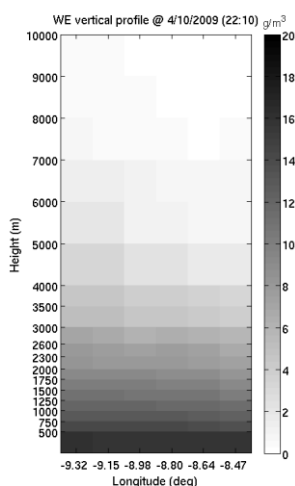


Figura 3 – Perfil tomográfico oeste-este utilizando os dados GPS na época t_0

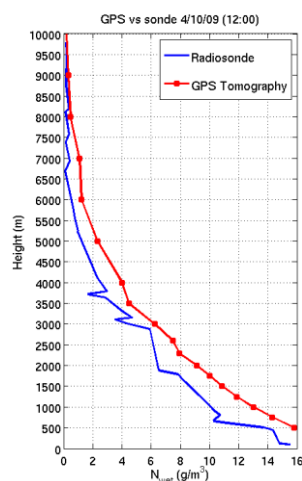


Figura 4 – Comparação do perfil coluna da solução anterior com a radiossonda mais próxima de t_0

Foi identificado um desvio entre os valores da radiossonda e do perfil tomográfico, existindo uma sobrestimação da refractividade na tomografia. Porém a radiossonda reflecte um estado atmosférico 10 horas antes da hora da solução tomográfica, que é tempo mais que suficiente para que as condições meteorológicas na troposfera local se alterem. De notar que os valores de refractividade na radiossonda apresentam uma variabilidade bastante maior do que o perfil suave mostrado pela tomografia GPS.

Esta solução da tomografia determinada a partir dos dados GPS na época t_0 será utilizada como solução inicial em (4) para determinar a refratividade a partir da inclusão dos dados InSAR na tomografia à época t_1 .

A solução da tomografia em perfil oeste-este para a época t_1 calculada apenas com dados GPS é apresentada na Figura 5. Na Figura 6 é apresentado o mesmo perfil de solução tomográfica para a mesma época mas para os dados InSAR incluídos na tomografia GPS. Esta solução é determinada com (4) utilizando como N_0 a solução tomográfica obtida com dados GPS na época t_0 , as observações SWD_{GPS} à época t_1 e as observações SWD_{SAR} refletindo as diferenças temporais (t_1-t_0). Comparando os dois perfis é de notar que os valores de refratividade nas camadas mais baixas são menores na solução com dados GPS e InSAR. Mais facilmente observável é a maior variabilidade horizontal obtida nesta solução combinada. Observando a variação vertical entre camadas é verificada também uma maior variabilidade para a solução tomográfica GPS com InSAR. De forma semelhante ao apresentado na Figura 4, a Figura 7 mostra os perfis coluna das soluções tomográficas para a época t_1 comparados com o perfil de radiossonda representando o lançamento mais próximo desta data, que foi registrado às 6:00 do dia seguinte (9/11/2009). Apesar de aqui também existir uma diferença horária entre as soluções da tomografia e a radiossondagem, parece haver uma concordância maior entre os perfis verticais. Contudo uma maior diferença é verificada nas camadas de refratividade até aos 1500 m de altitude. Comparando ambas as soluções tomográficas é notável uma maior aproximação ao perfil da radiossonda para a solução GPS com InSAR nos primeiros 1500 m, e um maior afastamento em geral nas camadas verticais até aos 5000 m.

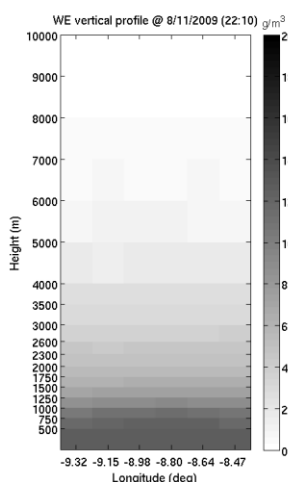


Figura 5 – Perfil tomográfico oeste-este utilizando os dados GPS na época t_1

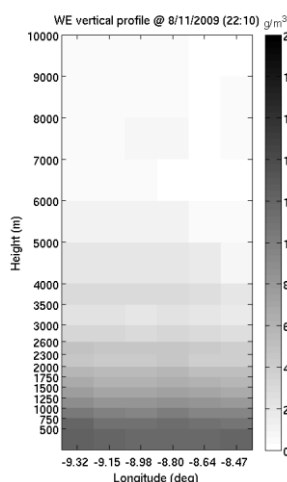


Figura 6 – Perfil tomográfico oeste-este utilizando os dados GPS e InSAR na época t_1

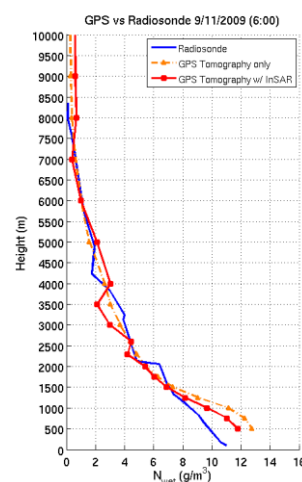


Figura 7 – Comparação dos perfis coluna das soluções anteriores com a radiossonda mais próxima de t_1

Para uma melhor avaliação dos resultados da tomografia, foram calculadas as diferenças médias entre os perfis coluna das soluções tomográficas da época t_1 e a respectiva radiossondagem mais próxima. A média e o desvio padrão das diferenças são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Estatística das diferenças médias entre os perfis coluna das soluções tomográficas e os perfis de radiossondagem para a época t_1

Diferenças com radiossonda (g/m^3)	Média	Desvio Padrão
Tomografia GPS	0.43	1.24
Tomografia GPS c/ InSAR	0.19	0.97

Os resultados da comparação mostram uma aproximação clara da solução da tomografia GPS com InSAR ao perfil da radiossonda, com uma média de cerca de metade dos valores da média das diferenças verificadas para a solução da tomografia só com dados GPS. O desvio padrão também é significativamente mais baixo para a solução com os dados combinados,



registando-se um valor abaixo dos 1 g/m^3 . Apesar de os resultados serem positivos é importante realçar que as radiossondas podem ser afectadas por erro, especialmente em situações climáticas onde se verifique vento intenso.

5. Conclusões

Neste artigo foi descrita a inclusão de dados InSAR na metodologia da tomografia GPS. O mapa diferencial do PWV foi introduzido com alterações no sistema de equações da tomografia GPS, contemplando a relação entre as datas de aquisição *master* e *slave* das imagens InSAR. A solução da tomografia com os dados GPS e InSAR combinados foi comparada à solução obtida apenas com dados GPS, tendo sido verificada uma maior variabilidade vertical e horizontal na solução do vapor de água. Os efeitos de suavização presentes normalmente nas soluções tomográficas GPS são minimizados. Os resultados foram validados através de comparações com lançamentos de radiossonda mais próximos das datas das soluções. Uma análise estatística comparando as diferenças das soluções tomográficas e os perfis de radiossondagem mostram uma melhoria nos resultados da tomografia GPS com o InSAR, demonstrando um resultado mais próximo da realidade atmosférica representada na troposfera.

Agradecimentos

Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT); bolsa doutoramento SFRH/BD/80288/2011.

Referências Bibliográficas

- Benevides, P.; Catalao J.; Miranda P.M.A. (2014). Experimental GNSS tomography study in Lisbon (Portugal). *Física de la Tierra* 26.2014: 65-79.
- Bevis, M.; Businger, S.; Hering, T.; Rocken, C.; Anthes, R.; Ware, R. (1992). GPS meteorology- Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research*, 97(D14), 15787-15801.
- Catalão, J.; (2006). Iberia-azores gravity model (IAGRM) using multi-source gravity data. *Earth Planets and Space*, 58(3), 277-286.
- Champollion, C.; Masson, F.; Bouin, M.N.; Walpersdorf, A.; Doerflinger, E.; Bock, O.; Van Baelen, J. (2005). GPS water vapour tomography: preliminary results from the ESCOMPTE field experimente. *Atmospheric Research*, 74(1), 253-274.
- Flores., A.; Ruffini, G.; Rius, A. (2000). 4D tropospheric tomography using GPS slant wet delays. *Annales Geophysicae*, 18(2), Springer-Verlag.
- Herring, T.; King, R.W.; McClusky, S.C. (2010). Título - GAMIT Reference Manual – GPS Analysis at MIT – Release 10.4”, Dep. of Earth, Atm. and Planetary Sciences, MIT.
- Kampes, B.; Hanssen R.; Perski, Z.; (2003). Radar interferometry with public domain tools. *Proceedings of FRINGE 2003*, December 1–5, Frascati, Italy.
- Mateus, P.; Nico G.; Catalao, J. (2013). Can spaceborne SAR interferometry be used to study the temporal evolution of PWV?. *Atmospheric Research*, 119(SI), 70-80.
- Mateus, P.; Nico, G.; Catalao, J. (2014). Maps of PWV temporal changes by SAR interferometry: a study on the properties of atmosphere's temperature profiles., *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(12), 2065-2069.
- Menke, W. (2012). *Geophysical data analysis: discrete inverse theory*, Academic press.
- Nico, G. (2002). Exact closed-form geolocation for SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40 (1), 220–222.
- Rohm, W.; Bosy, J. (2009). Local tomography troposphere model over mountains area. *Atmospheric Research*, 93(4), 777-783.
- Thayer, G.D. (1974). An improved equation for the radio refractive index of air. *Radio Science*, 9(10), 803-807.