

Assimilação de mapas de água precipitável, derivados de interferogramas, revelam potencial para caracterização de eventos extremos de precipitação

Pedro MATEUS^{1*}, Giovanni NICO², João CATALÃO¹ e Pedro M. A. MIRANDA¹

¹ Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade Ciências, Universidade Lisboa, Lisboa

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

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

Palavras-chave: Interferometria SAR, Sentinel-1, Atraso de propagação, Vapor de Água Precipitável (PWV), Modelos de previsão do tempo

Resumo: Neste trabalho investiga-se a assimilação de mapas de elevada resolução espacial de água precipitável, estimados da fase interferométrica, usando o sistema de assimilação 3D-Variacional, implementado no modelo WRFDA (*Weather Research and Forecast Data Assimilation*). Os mapas de água precipitável são estimados de interferogramas, gerados pela técnica InSAR (Interferometria por Radar de Abertura Sintética), usando imagens SAR, adquiridas pelo sensor (C-SAR), a bordo do satélite Sentinel-1 A. Estudamos o impacto dos dados de água precipitável com elevada resolução na condição inicial do modelo WRF, assim como o seu impacto durante um período de 12 horas após assimilação. Demonstramos que a assimilação destes mapas aumenta a concentração de vapor de água e a temperatura em áreas afetadas por eventos climáticos extremos, gerando corretamente células de convecção localizadas. A simulação da água precipitável, antes e depois da assimilação dos dados, é comparada com observações de água precipitável, obtidas com elevada precisão, usando uma densa rede de estações permanentes GNSS (*Global Navigation Satellite System*). O padrão e quantidade de precipitação são comparados com observações de radar meteorológico. Os dois eventos de precipitação extremos que afetaram a cidade de Adra, Espanha, nos dias 6 e 7 de setembro de 2015, foram usados para demonstrar o potencial da assimilação de mapas de água precipitável, derivados da técnica InSAR, com elevada resolução espacial. No entanto, dada a extensão limitada do presente artigo, apenas são apresentados os aspetos considerados mais relevantes ao primeiro evento, podendo, para maior detalhe, ser consultado Mateus *et al.* (2018).

1. Introdução

Na última década, a Interferometria por Radar de Abertura Sintética (InSAR) foi usada para mapear o Vapor de Água Precipitável (PWV – *Precipitavel Water Vapor*) na troposfera (Kinoshita *et al.*, 2013; Mateus *et al.*, 2013a, 2013b, 2017, Alshawaf *et al.*, 2015). Estes mapas, com uma resolução espacial e precisão sem precedentes, podem ser usados para constrianger as condições iniciais nos modelos de previsão numérica do tempo (PNT), de forma a melhorar as previsões de eventos de precipitações (Mateus *et al.*, 2016, 2018). Neste trabalho, demonstramos que a assimilação (usando a técnica 3DVar) de mapas de água precipitável, derivados da fase interferométrica, pode melhorar a qualidade e a consistência temporal da previsão, no caso de um evento de precipitação extremo que teve lugar na cidade de Adra, Espanha, a 6 de setembro de 2015. A assimilação de mapas com elevada informação espacial, contida nos mapas de PWV-InSAR, altera a termodinâmica da atmosfera, aumentando a instabilidade e produzindo um sistema de precipitação convectiva sobre a área correta. As simulações (de temperatura, vapor de água, precipitação e outras), após assimilação dos dados InSAR, são comparadas com simulações obtidas por assimilação de uma rede densa de estações GNSS (*Global Navigation Satellite System*), na qual se estimou séries de PWV. Comparamos ainda com observações feitas por um radar meteorológico, situado próximo da área de estudo, com uma densa rede de estações meteorológicas (e pluviómetros) e, em particular, com uma estação meteorológica situada no centro da cidade de Adra. Os resultados confirmaram o impacto positivo e são extremamente encorajadores. Além desses resultados, verificou-se que a rede GNSS foi insuficiente para capturar a célula convectiva. De facto, as alterações nas simulações (após assimilação de PWV-GNSS) não são representativas. O trabalho é organizado da seguinte forma: As secções 2, 3 e 4 são dedicadas dos dados, à configuração do modelo e à descrição da metodologia. Nas secções 5 e 6, apresentamos alguns resultados e conclusões.

2. Dados e processamento interferométrico

A velocidade e a direção das ondas eletromagnéticas, quando se propagam através da troposfera, sofrem alterações devido ao índice de refração (n), superior à unidade. Em termos de atraso de propagação, o índice de refração n é frequentemente substituído pela refratividade (N). A refratividade pode ser dividida em quatro componentes: hidrostático, não hidrostático (ou húmida), líquida e ionosférica, da seguinte forma

$$N_{total} = 10^6(n - 1) = N_{dry} + N_{wet} + N_{liq} + N_{iono}. \quad (1)$$

A componente hidrostática (N_{dry}) e ionosférica (N_{iono}) apresentam pouca variação espacial e podem ser calculados com precisão usando simulações dos modelos de PNT e estimativas de TEC (*Total Electron Content*) obtidas do processamento de observações GNSS. Ambas representam mais de 90% do total da refratividade. A componente não hidrostática (N_{wet}) relaciona-se diretamente com a distribuição do vapor de água presente na troposfera. A componente líquida (N_{liq}) está relacionada principalmente com as gotículas de água suspensas em nuvens, e ambos as componentes são difíceis de observar e modelar com precisão. A componente N_{wet} e N_{liq} são aproximadas pela seguinte expressão

$$N_{wet} = Z_w^{-1} \cdot \left(k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right), N_{liq} = 1.4 \cdot W, \quad (2)$$

onde k_2 e k_3 são constantes de refratividade, Z_w^{-1} é a compressibilidade inversa da componente N_{wet} , e é a pressão parcial do vapor de água em hPa, T é a temperatura em Kelvin e W é o conteúdo de água líquida (Hanssen, R., 2001). N_{wet} pode ser convertido em atraso segundo a expressão

$$\Delta d_{wet} = \Delta \phi_{wet} / \left(10^{-6} \cdot 4 \pi / \lambda \cdot M(\vartheta(look)) \right), \quad (3)$$

onde $\Delta \phi_{wet}$ é a fase interferométrica (diferencial), λ é a frequência do sensor a bordo do Sentinel-1, M é uma função de mapeamento, $\vartheta(look)$ é o ângulo de visão ao longo da faixa. A equação 3 inclui duas assinaturas, a não hidrostática e a líquida, uma vez que não é possível distinguir ambas a partir da fase interferométrica.

Um total de 10 imagens SAR adquiridas pelo Sentinel-1 A na banda C foram utilizadas neste estudo. O processamento foi feito usando o software *Sentinel Application Platform* (<http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>). Foi aplicado um filtro espacial para reduzir o ruído antes do desenrolamento da fase e os pixels afetados pela perda de coerência (<0.2) são removidos para melhorar o desempenho do algoritmo de desenrolamento de fase. A resolução espacial final é de cerca de 350×350 m. Uma análise prévia indicou a ausência de deformação da superfície significativa, indicando que cada interferograma contém apenas as contribuições presentes na Equação 3 (depois de modeladas as componentes N_{dry} e N_{iono}). Os mapas de atraso são convertidos em água precipitável multiplicando os mesmos pela constante 6.4 (Bevis *et al.*, 1992). Os detalhes sobre os dados usados neste estudo (imagens SAR, GNSS, etc) assim como os detalhes sobre o processamento interferométrico podem ser vistos em Mateus *et al.* (2017, 2018).

3. Configuração do modelo

O modelo WRF (Skamarock *et al.*, 2008) foi configurado com 51 níveis verticais e 3 domínios horizontais, com resoluções de 27-, 9- e 3×3 km (ver Figura 1a), respetivamente. Foi usado o método *two-way nesting*, que permite a troca de informação nos dois sentidos entre domínios de diferente resolução horizontal a cada intervalo de tempo. O topo dos domínios foi fixo nos 10 hPa (cerca de 30 km de altitude). O domínio de maior resolução inclui a região sul do continente europeu e parte do continente norte-africano. O domínio de menor resolução (3×3 km) inclui toda a Península Ibérica (ver Figura 1a). As condições iniciais e de fronteira derivam dos dados de previsão do NCEP-GFS (*National Centers for Environmental Prediction - Global Forecast System*), disponíveis a uma resolução horizontal de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ e uma resolução temporal de 6 horas. As parametrizações físicas, selecionadas no modelo WRF, incluem o esquema *WRF Single Moment 6-class (WSM6)* para a microfísica, o esquema *Rapid Radioactive Transfer Model (RRTM)* para radiação (ondas curtas e longas), o esquema *Noah Land Surface Model (NOAH)* para a superfície terrestre e o esquema *Mellor-Yamada-Janjic (MYJ)* para a camada limite planetária. No método 3DVar, as observações são combinadas com o estado atmosférico inicial (*background*), derivado do produto NCEP-GFS, e as estatísticas de erro correspondentes, de forma a fornecer um estado atmosférico inicial melhorado. A técnica 3DVar consiste na minimização da função de custo, J (Wang *et al.*, 2015):

$$J(x) = \frac{1}{2} \quad (4)$$

onde x é o campo que representa uma estimativa de máxima verosimilhança do estado verdadeiro da atmosfera, sendo dadas duas fontes de dados. O *background* (x_b) e as observações (y) B e R são as matrizes de covariância dos erros do *background* e das observações, respetivamente. H é o operador usado para transformar as variáveis do modelo nas observáveis (PWV), sendo também usado como interpolador espacial entre a grelha do modelo e a grelha das observações. A matriz de covariância B foi obtida usando o método *National Meteorological Centre (NMC)* (Parrish *et al.*, 1992). No método NMC, as perturbações do modelo são definidas pelas diferenças entre previsões T+24 menos T+12 válidas ao mesmo tempo durante um período mínimo de um mês (setembro de 2015). A matriz de covariância R inclui erros instrumentais e uma estimativa de incertezas introduzidas pelo operador H . Neste estudo, foi utilizado um valor de 2 mm para todas as observações. A densidade de observações fornecidas pelo mapa PWV-InSAR aumenta significativamente o custo computacional do processo de assimilação e viola a suposição de que os erros das observações são espacialmente independentes (exigência no esquema WRF 3DVar). Para evitar esses problemas, usamos o método *Thinning* com uma grelha de 10 km. Este método gera uma grelha virtual sobre todo o domínio, de forma a selecionar a observação com menor distância ao centro de cada quadrícula. Foi escolhida a distância de 10 km, por ser bastante inferior à interdistância entre estações GNSS. Para uma compreensão geral sobre os métodos de assimilação e de *Thinning*, englobados no pacote *Weather Research and Forecast Data Assimilation Model (WRFDA)*, poderão consultar o manual disponível em: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.9/ARWUsersGuideV3.9.pdf.

4. Metodologia

Foram realizadas três experiências, de forma a avaliar o impacto da assimilação 3DVar dos mapas GNSS-PWV e InSAR-PWV. A primeira experiência, denominada por controlo (CTRL), teve início às 12:00 UTC do dia 6 de setembro de 2015 e terminou às

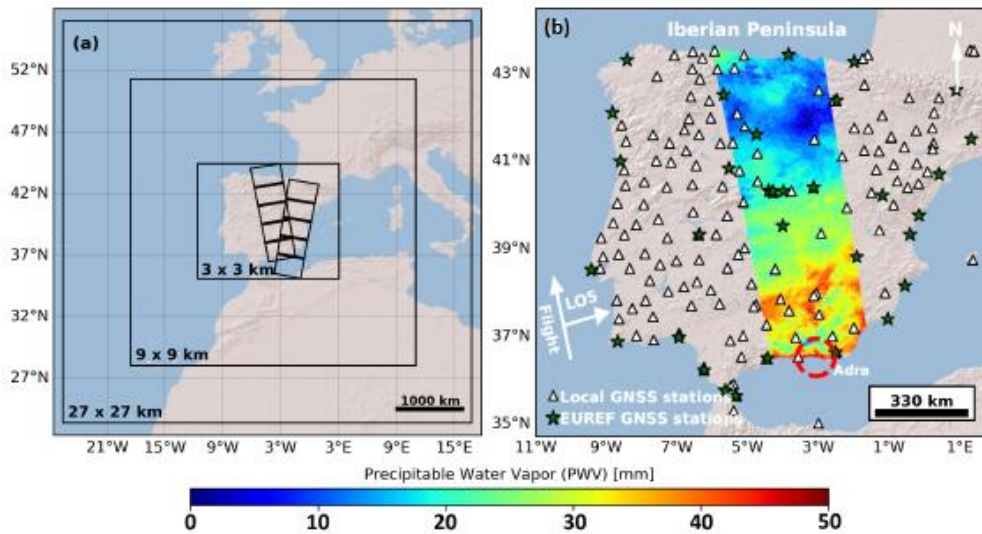


Figura 1 – (a) Domínios configurados no modelo WRF: 27-, 9- e 3x3 km; (b) Localização do mapa PWV-InSAR (imagem ascendente às 18:00 UTC, 6 setembro de 2015). A área de estudo está dentro do círculo a vermelho. Estrelas e triângulos são a localização das estações GNSS; as estrelas representam estações que pertencem à rede EUREF, usadas para avaliação da assimilação. Adaptado de Mateus *et al.* (2018)

06:00 UTC do dia 7 de setembro de 2015, sem assimilação de observações. Na segunda experiência, denominada por A-GNSS, usamos o *output* do CTRL às 18:00 UTC, de forma a assimilar valores de PWV estimados das observações de 130 estações GNSS, com recurso ao método 3DVar, criando novas condições iniciais e laterais, restringidas às condições impostas pelos mapas GNSS-PWV. Seguidamente, usamos essas condições para iniciar o modelo durante 12 horas (18:00 até 06:00 UTC). A terceira experiência, denominada por A-InSAR, usa a mesma abordagem descrita no caso da experiência A-GNSS, mas foi assimilado o mapa InSAR-PWV com elevada resolução espacial. Para avaliação dos resultados obtidos nas três experiências, usamos os valores de PWV estimados dos dados GNSS das 35 estações pertencentes à rede EUREF (estrelas na Figura 1b), diferente das 130 estações GNSS locais (triângulos na Figura 1b) utilizadas na experiência A-GNSS e pertencentes a institutos nacionais (de Portugal e Espanha). Em todas as experiências, as simulações do WRF foram avaliadas ao longo de 12 horas após a assimilação (18:00 até 06:00 UTC), usando um conjunto de dados independente (estimativas de PWV fornecidas por 35 estações GNSS). Os resultados são avaliados em termos de erro quadrático médio (RMSE - *Root Mean Square Error*), coeficiente de correlação de Pearson (ρ) e *forecast skill score* (SS). Para garantir a análise de quantidades comparáveis, ambas as fontes de dados precisam ser ajustadas, devido às diferentes geometrias de aquisição (GNSS-cone versus InSAR/WRF- tubo). Uma secção transversal, que resulta da sobreposição entre as duas geometrias, é usada para comparação. Detalhes sobre esta abordagem podem ser vistos em Hanssen (2011). Todas as etapas envolvidas no processo de estimativa do mapa Δ PWV, a partir da fase interferométrica (neste caso, derivada de imagens SAR adquiridas pelo Sentinel-1 A), assim como a metodologia para obter um mapa PWV absoluto, podem ser vistas com detalhe em Alshawaf *et al.* (2015), Mateus *et al.* (2016, 2017, 2018) e Pichelli *et al.* (2015).

5. Resultados

Avaliamos, no instante da assimilação, as anomalias do vapor de água e temperatura (relativamente ao CTRL) aos 850 hPa para ambas as experiências (A-GNSS e A-InSAR), a este nível de pressão o ciclo diário diurno da temperatura é, normalmente, insignificante (não mostrado). Na experiência A-InSAR, verifica-se um aumento na temperatura do ar e na velocidade do vento na direção oeste-leste a norte da Serra Nevada, com diminuições similares na velocidade do vento na direção sul-norte a sul da Serra Nevada. A orografia da área é bastante complexa, pois favorece o aumento da temperatura do ar que, em conjunto com a ampliação dos gradientes do vento, pode explicar o aumento da velocidade vertical (componente W) do vento, o que favorece a ocorrência de fenómenos de convecção profunda. Na análise ao A-GNSS, encontrando incrementos muito pequenos em ambas as variáveis (temperatura e vapor de água), sendo estes insuficientes para induzir um aumento na velocidade vertical, dificultando a ocorrência de fenómenos de convecção profunda.

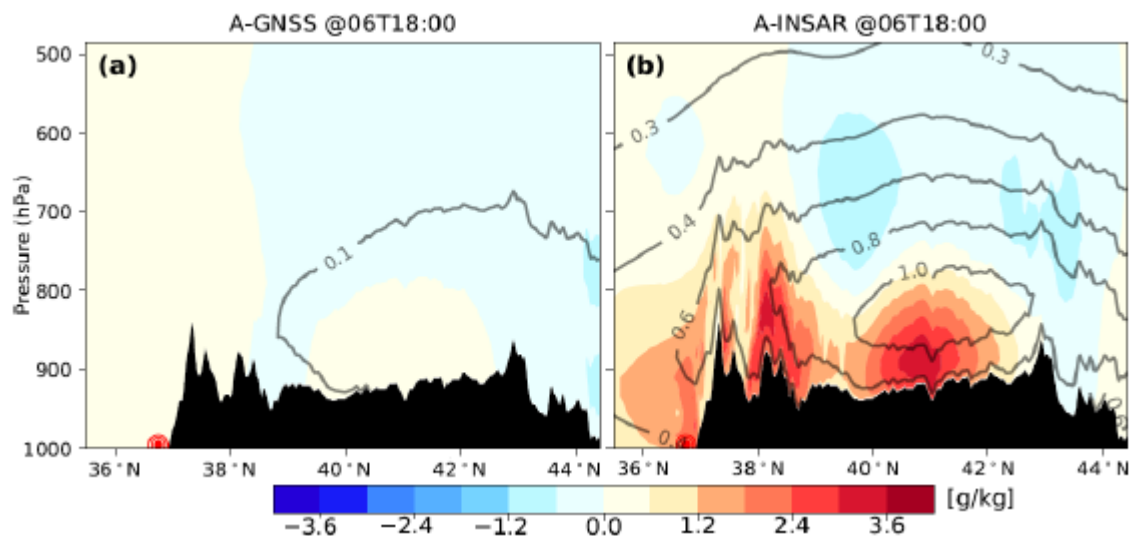


Figura 2 – Perfis latitudinais da anomalia do vapor de água e temperatura: (à esquerda) A-GNSS; e A-INSAR (à direita). Adaptado de Mateus *et al.* (2018)

Na Figura 2, mostramos perfis latitudinais (sobre a cidade de Adra) das anomalias do vapor de água e temperatura (isotermas), relativamente ao CTRL. Verifica-se que a assimilação de dados InSAR introduziu incrementos no vapor de água entre a superfície e os 850 hPa, com um aumento máximo de 2.7 g/kg sobre a cidade de Adra (uma longitude de cerca de 38°N) e um valor máximo de 3.7 g/kg a norte da Serra Nevada (uma longitude de cerca de 41°N). Verificou-se pequenas diminuições no vapor de água no centro do domínio e a cerca dos 700 hPa. Relativamente à temperatura, verificou-se um aumento positivo entre a superfície e os 500 hPa, atingindo um máximo de 1.1 K aos 800 hPa, resultando numa diminuição nos níveis de pressão em cerca de 1 hPa à superfície. A experiência A-GNSS mostrou um pequeno aumento positivo no vapor de água, cerca de 0.3 g/kg sobre Adra e apenas 0.2 g/kg a norte da Serra Nevada. O aumento positivo no campo da temperatura não é representativo. Estas diferenças (entre os resultados A-GNSS e A-InSAR) podem ser explicadas em termos das diferentes densidades de observação, mas devemos salientar que não está disponível nenhuma estação GNSS em Adra ou até mesmo nos arredores. No entanto, este resultado pode ser generalizado, uma vez que a densidade espacial dos recetores GNSS é sempre muito menor do que a dos mapas InSAR-PWV, mesmo quando se usa uma distância de 10 km no método *Thinning* (descrito na secção 2). O índice *Severe Weather Threat* (SWEAT) avalia a instabilidade atmosférica (através do Total Totais – TT) nas mudanças de velocidade e direção do vento e humidade a vários níveis de pressão, de forma a avaliar o potencial existente para sistemas de convecção. O valor SWEAT médio estimado (não mostrado), nas simulações CTRL, é inferior a 275 (sobre a área de interesse). Ou seja, não há potencial para condições meteorológicas severas. Por outro lado, o A-InSAR mostra um aumento generalizado do SWEAT médio, atingindo valores de 300 a 325 em pequenas áreas, principalmente a norte da Serra Nevada, indicando potencial para tempestades isoladas. O índice SWEAT médio estimado, no caso do A-GNSS, não mostra mudanças significativas. A Figura 3 mostra a análise estatística (RMSE, coeficiente de correlação de Pearson e forecast skill score) ao longo das 12 horas de simulação, após assimilação. O RMSE associado ao A-InSAR diminuiu para 1.5 mm no instante de assimilação e tende a igualar-se ao RMSE associado ao CTRL, ao longo das próximas 12 horas. Os coeficientes de correlação de Pearson foram também estimados e estão relatados na Figura 3. O A-InSAR revela um coeficiente superior, relativamente aos restantes, durante as primeiras 8 horas. O impacto do A-GNSS é inferior a 0.2 no instante da assimilação e tende a igualar o do CTRL nas próximas 8 horas. O último gráfico da Figura 3 mostra o *forecast skill score* (SS) de ambas as experiências. Um valor superior a zero indica um melhoramento relativamente à simulação de referência (CTRL), um valor inferior a zero indica uma degradação das simulações relativamente à referência e um valor próximo de zero revela um impacto nulo ou pouco significativo. Ambas as experiências mostram *skill score* positivos durante 8 a 9 horas, revelando uma melhoria relativa com valor máximo de 80% (A-InSAR) e 35% (A-GNSS), no instante da assimilação. Na Figura 4, comparamos os campos de 1 hora de precipitação acumulada entre o CTRL, A-GNSS e A-InSAR, assim como o observado por um radar meteorológico, situado na província de Almeria (entre as 21:00 e 22:00 UTC; hora do

evento de precipitação extremo sobre Adra). Comparativamente, o CTRL não previu o padrão e a quantidade de precipitação observados sobre a área de Adra, mostrando uma pequena concentração a nordeste, com um valor máximo de 8.2 mm (dentro de um círculo com raio de 18 km). Com base na simulação de referência, não existe uma razão evidente para emitir um aviso de risco de eventos de precipitação extrema. Em contraste, o A-InSAR prevê um padrão e uma quantidade equivalente sobre a área de interesse, e mostra um valor máximo de 43.4 mm, menos 14.8 mm em comparação com o observado pelo radar. O A-GNSS tem um impacto nas chuvas a norte da serra Nevada, provavelmente, devido à concentração de estações GNSS na área. Sobre a área de interesse, o máximo de precipitação manteve-se igual ao simulado pelo CTRL. Examinando a precipitação total de forma mais quantitativa, ao longo das 12 horas e focando mais diretamente a cidade de Adra, na Figura 5, mostramos a precipitação medida por uma estação meteorológica, situada no centro de Adra. O A-InSAR tem um *feedback* temporal preciso e as amplitudes tendem a ser comparáveis. No entanto, o lento decréscimo da previsão de precipitação observado (no caso do A-InSAR) após o evento, pode indicar um efeito inercial do sistema WRF, ao modelar efeitos rápidos, como precipitações severas locais com curta duração (cerca de 3 horas). O importante resultado deste trabalho é que a experiência A-InSAR conseguiu prever corretamente tanto o instante como a intensidade da chuva.

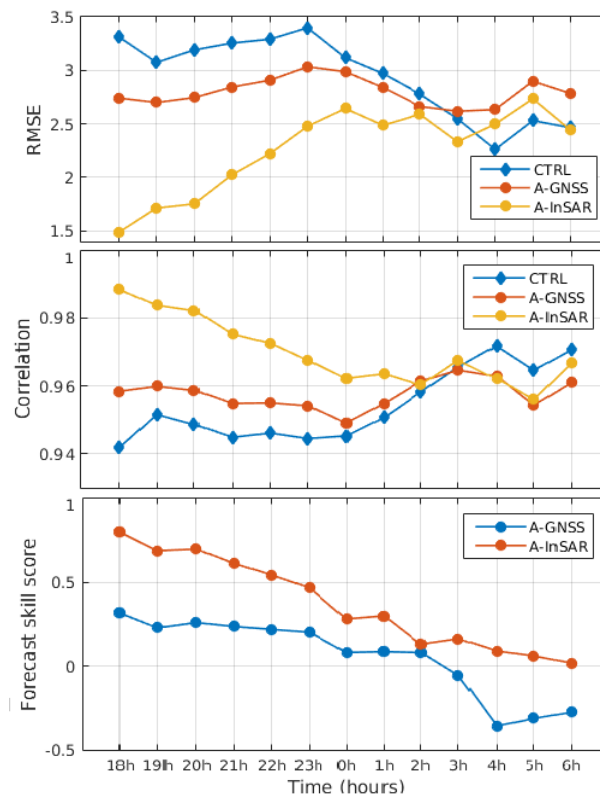


Figura 3 – Validação estatística: (em cima) *Root Mean Square Error* (RMSE); (no meio) coeficiente de correlação de Pearson e (em baixo) *Forecast Skill Score* (SS). Adaptado de Mateus *et al.* (2018)

6. Conclusões

Os resultados apresentados neste trabalho indicam que mapas InSAR-PWV, com resolução espacial elevada, podem fornecer informação útil aos modelos PNT, visando modelar as anomalias locais de temperatura, pressão do vapor de água e direção do vento, de forma a melhorar a previsão de eventos de precipitação extrema. Esta informação é mais precisa do que a fornecida pela rede de estações GNSS, devido à resolução espacial mais grosseira das observações de PWV. Uma descrição sobre os eventos extremos, ocorridos a 6 e 7 de setembro de 2015 sobre a cidade de Adra, assim como as experiências de assimilação realizadas para cada evento referido, podem ser vistas com detalhe em Mateus *et al.* (2018).

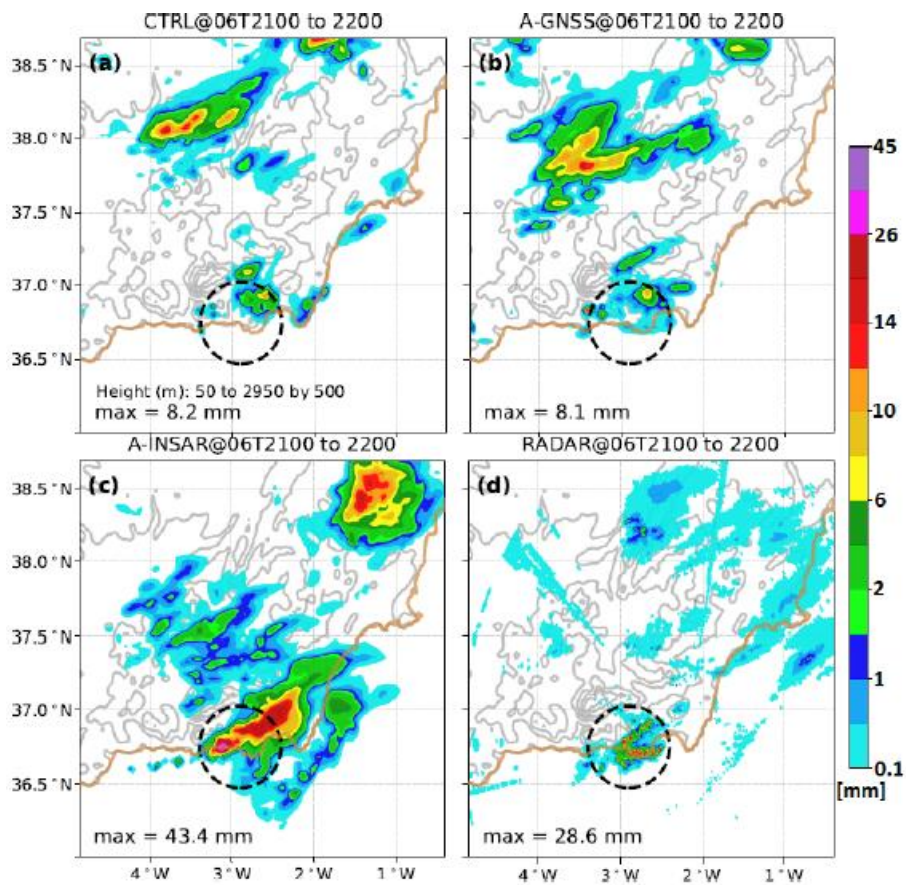


Figura 4 – 1 h de precipitação acumulada: (a) CTRL; (b) A-GNSS; (c) A-INSAR; e (d) radar meteorológico. Entre as 21:00 e 22:00 UTC. Adaptado de Mateus *et al.* (2018)

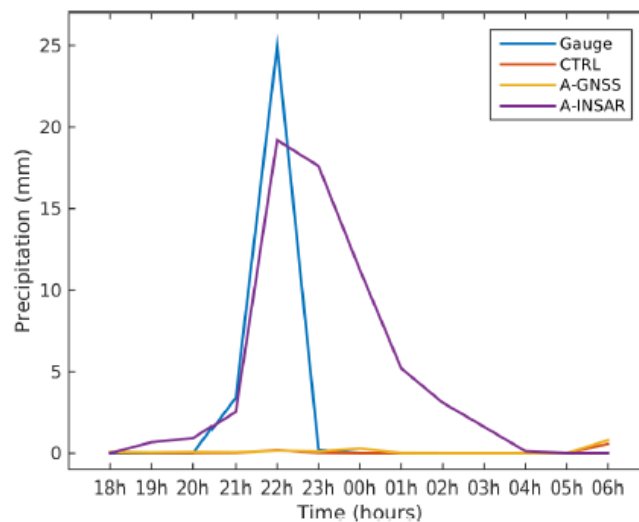


Figura 5 – Comparação dos dados observados na estação meteorológica, situada no centro de Adra (linha azul), com chuva do CTRL A-GNSS e A-INSAR. Os valores referem a média de todos os valores de precipitação, que ficam dentro de uma circunferência com um raio de 18 km. Adaptado de Mateus *et al.* (2018)

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), através da bolsa Pós-doutoramento com a referência SFRH/BPD/96069/2013 e pelo projeto UID/GEO/50019/2013.

Referências Bibliográficas

- Alshawaf, F.; Hinz, S.; Mayer, M.; Meyer, F.J. (2015). Constructing accurate maps of atmospheric water vapor by combining interferometric synthetic aperture radar and GNSS observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 120, pp. 1391–1403.
- Bevis, M.; Businger, S.; Herring, T.A.; Rocken, C.; Anthes, R.A.; Ware, R.H. (1992). GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 97, no. D14, pp. 15787–15801, 1992.
- Hanssen, R. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*, vol. 2 of *Remote Sensing and Digital Image Processing*, Springer, Netherlands, 1 edition.
- Kinoshita, Y.; Shimada, M.; Furuya, M. (2013). InSAR observation and numerical modeling of the water vapor signal during a heavy rain: A case study of the 2008 Seino event, central Japan. *Geophysical Research Letters*, vol. 40, no. 17, pp. 4740–4744.
- Mateus, P.; Catalão, J.; Nico, G. (2017). Sentinel-1 Interferometric SAR Mapping of Precipitable Water Vapor Over a Country-Spanning Area. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 55, no. 5, pp. 2993–2999.
- Mateus, P.; Miranda, P.M.A.; Nico, G.; Catalão, J.; Pinto, P.; Tomé, R. (2018). Assimilating InSAR maps of water vapor to improve heavy rainfall forecasts: A case study with two successive storms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 123, pp. 3341–3355.
- Mateus, P.; Nico, G.; Catalão, J. (2013a). Can spaceborne SAR interferometry be used to study the temporal evolution of PWV? *Atmospheric Research*, vol. 119, no. 17, pp. 70–80.
- Mateus, P.; Nico, G.; Tome, R.; Catalão, J.; Miranda, P.M.A. (2013b). Experimental Study on the Atmospheric Delay Based on GPS, SAR Interferometry, and Numerical Weather Model Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, no. 1, pp. 6–11.
- Mateus, P.; Tomé, R.; Nico, G.; Catalão, J. (2016). Three-Dimensional Variational Assimilation of InSAR PWV Using the WRFDA Model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 54, no. 12, pp. 7323–7330.
- Parrish, D.F.; Derber, J.C. (1992). The national meteorological center's spectral statistical interpolation analysis system," *Monthly Weather Rev.*, vol. 120, pp. 1747–1763.
- Pichelli, E.; Ferretti, R.; Cimini, D.; Panegrossi, G.; Perissin, D.; Pierdicca, N.; Rocca, F.; Rommen, B. (2015). InSAR Water Vapor Data Assimilation into Mesoscale Model MM5: Technique and Pilot Study. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 8, no. 8, pp. 3859–3875.
- Skamarock, W.C.; Klemp, J.B.; Dudhia, J.; Gill, D.O.; Barker, D.M.; Duda, M.G.; Huang, X.; Wang, W.; Powers, J.G. (2008). A description of the Advanced Research WRF Version 3," *Tech. Rep.*, NCAR, Tech. Note 475+STR.
- Wang, W.; Bruyère, C.; Duda, M.; Dudhia, J.; Gill, D.; Kavulich, M. (2015). User's guide for the Advanced Research WRF (ARW) modeling system version 3.7. Mesoscale and Microscale Meteorology Division · National Center for Atmospheric Research. Retrieved from http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/